

DOI: <https://doi.org/10.30898/1684-1719.2026.6.9>

УДК: 537.638.5, 538.953, 536.244

ТЕМПЕРАТУРНАЯ РЕЛАКСАЦИЯ ЭЛЕМЕНТОВ ГАЗОВОГО ТЕПЛОВОГО КЛЮЧА НА ОСНОВЕ КРИОМАГНИТНОЙ СИСТЕМЫ 10 ТЛ

К.А. Колесов^{1,2}, О.В. Белова³, С.С. Морковин³, И.И. Мусабилов⁴, А.В. Маширов^{1,3}

¹ Институт радиотехники и электроники им. В.А. Котельникова РАН,
125009, Москва, ул. Моховая, 11, корп. 7

² Челябинский государственный университет,
454001, г. Челябинск, ул. Братьев Кашириных, 129

³ Московский государственный технический университет им. Н.Э. Баумана,
105005, Москва, 2-я Бауманская, д. 5, стр. 1

⁴ Институт проблем сверхпластичности металлов РАН,
450001, Уфа, ул. Степана Халтурина, 39

Статья поступила в редакцию 15 мая 2026 г.

Аннотация. В статье исследуются рабочие параметры газового теплового ключа криогенного магнитного рефрижератора, реализованного на основе криостата сверхпроводящего магнита. В качестве теплообменного газа применялся гелий, а в качестве теплообменных элементов использовался диск магнитокалорического сплава $GdNi_2$ и медный цилиндр. Экспериментально было установлено время релаксации элементов газового ключа на температурных уровнях 24 К, 61 К, 75 К и 80 К. Показано, что времена релаксации контактной пары криогенного механического теплового ключа с индиевым термоинтерфейсом и криогенного газового теплового ключа практически одинаковы. Определена потенциальная холодопроизводительность и построен холодильный цикл единичного каскада криогенного магнитного рефрижератора с газовым тепловым ключом.

Ключевые слова: газовый тепловой ключ, механический тепловой ключ, криогенный магнитный рефрижератор.

Финансирование: Исследование выполнено за счёт гранта Российского научного фонда, проект № 25-19-20141, <https://rscf.ru/project/25-19-20141/>.

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

Введение

Тепловые ключи – это устройства, способные управляемо изменять свою теплопроводность, тем самым соединяя или разъединяя тепловые цепи в системах. Их способность приостанавливать или возобновлять теплообмен при внешнем воздействии используется в адсорбционных холодильниках, системах предварительного охлаждения криосистем и в криостатах, позволяя достигать и стабилизировать уровень сверхнизких температур при проведении научных экспериментов и, в частности, квантовых вычислений. В космических криогенных системах срок службы и эффективность при использовании теплового ключа увеличиваются за счет снижения тепловой нагрузки на сосуд Дьюара [1]. Тепловые ключи необходимы для реализации холодильных и криогенных циклов Карно, Стирлинга, Брайтона и Эриксона и др. [2,3].

Существуют различные способы реализации тепловых ключей, и каждый обладает рядом преимуществ и недостатков. Магниторезистивный тепловой ключ работает по принципу изменения теплопроводности за счет внешнего магнитного поля, поэтому не требует применения движущихся частей. Механический ключ работает по принципу тепловой проводимости контакта от соприкосновения двух поверхностей, имеет нулевую проводимость в выключенном состоянии, но обладает значительными массогабаритными характеристиками. Газовый тепловой ключ может не иметь движущихся частей, что обеспечивает его длительный срок службы и высокую надежность [4,5]. Схожим с газовым тепловым ключом принципом действия обладает жидкостной тепловой ключ. Рабочая жидкость приводится в движение перепадом давлений, переменным электрическим или магнитным полем, внешние поля так же могут

менять теплопроводность рабочей жидкости. Такой тепловой ключ может работать в широком диапазоне температур (от высоких до криогенных), при этом обеспечиваются высокие коэффициенты переключения – отношение тепловой проводимости во включенном и выключенном состоянии. Однако, подобные ключи сложны в эксплуатации, возможна утечка рабочей жидкости, а время срабатывания относительно велико [6].

В работе [7], посвященной исследованию газового теплового ключа на основе теплообменного газа в виде гелия, переключение между режимами происходит путем его адсорбции и десорбции с поверхности активированного угля или углеродных нанотрубок. Газовый тепловой ключ состоит из двух концентрических медных цилиндров, соединенных между собой тонкой оболочкой из нержавеющей стали (диаметр 10,9 мм). Между цилиндрами существует газовый зазор 0,1 мм, к которому подведена вакуумная линия и емкость с адсорбционным материалом. При нагревании адсорбционного материала происходит выделение теплообменного гелия в рабочий объем, таким образом восстанавливается тепловая связь между цилиндрами. В свете сравнения газовых и механических тепловых ключей для применения в криогенных магнитных рефрижераторах представляет интерес время переключения и время температурной релаксации их элементов. Если для углеродных нанотрубок на температурном уровне 4 К рассмотреть графики работы, то время переключения (время нагрева/охлаждения адсорбера) будет около 25 с / 150 с. Время температурной релаксации элементов (концентрических цилиндров) при нагреве равно 10 с (35 с от времени переключения) и при охлаждении 400 с (750 с от времени переключения). Для активированного угля же время переключения примерно равно 280 с/150 с, а время температурной релаксации элементов составляет на нагреве 20 с (300 с от включения) и на охлаждении 700 с (850 с от включения) [7].

Время переключения газового теплового ключа (и частично время температурной релаксации) в установках криогенных магнитных рефрижераторов в работе [8] на температурном уровне около 20 К равно 12.5 секунд как

для «горячего теплообменника», так и для «холодного теплообменника». В работе [9], посвященной исследованию криогенного магнитного рефрижератора работающего по циклу активного магнитного регенератора, использующего гелий в качестве теплообменного газа, в процессе «восходящего» потока тепло передается к теплому концу, процесс изменения температуры на температурном уровне 50 К занимает около 6 с. В работе [10], посвященной исследованию рефрижераторов конвекционного типа с адиабатическим размагничиванием, работающего по псевдо-циклу Карно, ключевым является время охлаждения рефрижератора до минимальной температуры, которое составляет 80 с с момента напуска гелия и достижения магнитным полем своего максимального значения. В работе [11] анализируется сопряжение рефрижератора с активным магнитным регенератором с теплообменниками, необходимыми для сжижения водорода. Эксперимент показал, что разница температур гелия на холодном конце регенератора сильно влияет на требуемый массовый расход гелия, который варьируется от 35 до 75 раз по сравнению с массовым расходом жидкого водорода при разнице температур 7 К и 3 К, соответственно.

В данной работе представлены результаты экспериментальных исследований параметров работы криогенного газового теплового ключа, обеспечивающего управляемый теплообмен между магнитокалорическим рабочим телом из GdNi_2 и медным теплоприемником. Созданные условия работы газового теплового ключа физически моделируют часть цикла Брайтона каскадного криогенного магнитного рефрижератора. Цикл Брайтона состоит из адиабатического намагничивания рабочего тела, затем передачи тепла теплоприемнику через слой гелия, адиабатического размагничивания и передачи тепла от охлаждаемого объекта рабочему телу в нулевом магнитном поле. Важное значение имеют время контакта и количество передаваемого тепла.

Магнитокалорический эффект заключается в изменении магнитной части энтропии вещества и, как следствие, температуры при воздействии внешнего магнитного поля в адиабатических условиях. Магнитокалорический эффект и его применение в магнитном охлаждении связывают с потенциальным

повышением энергоэффективности холодильных установок, систем вентиляции и контроля температуры. Так, с помощью этого эффекта впервые было успешно осуществлено сжижение метана, охлаждаемого с 285 К до 135 К, с использованием рефрижератора активного магнитного регенератора [12,13]. Криогенное магнитное охлаждение в данный момент находится в докоммерческой стадии, но может обладать большим потенциалом для создания высокоэффективной и экологически безопасной новой технологии твердотельного метода получения холода [14].

1. Образцы и методы эксперимента

На рис. 1а представлена конструктивная схема исполнения узла, сопрягаемые поверхности или поверхности теплообмена состоят из медного цилиндра и цилиндра из сплава GdNi_2 . Образец рабочего тела GdNi_2 дисковидной формы с диаметром 5 мм высотой 2 мм и массой $m_{\text{GdNi}_2} = 0,39$ г, с площадью поверхности $70,7 \text{ мм}^2$, поверхность которого шлифовалась абразивной бумагой зернистостью P1000 и P2000 и проводилась последующая полировка алмазными пастами 14/10 и 3/2 мкм. Перед сборкой образец очищался спиртом для удаления частиц абразива и предотвращения окисления. Медный теплоприемник изготавливался из высокочистой меди в форме цилиндра диаметром 15 мм и высотой 15 мм массой $m_{\text{Cu}} = 19,17$, с площадью поверхности $1059,8 \text{ мм}^2$. Его поверхность обрабатывалась по той же последовательности, что и поверхность GdNi_2 диска.

Рабочее тело GdNi_2 и медный теплоприемник закреплялись в держателе из АБС-пластика. Между теплоприемником и держателем размещалось разрезное кольцо из фторопласта с внутренней проточкой, обеспечивающей точечное касание, высокое контактное термосопротивление и минимальные паразитные теплопритоки. Указанная конструкция помещалась в шахту криостата диаметром 29 мм с возможностью создания как высокого вакуума, так и избыточного давления теплообменного газа и криогенной температуры на поверхности шахты (рис. 1б).

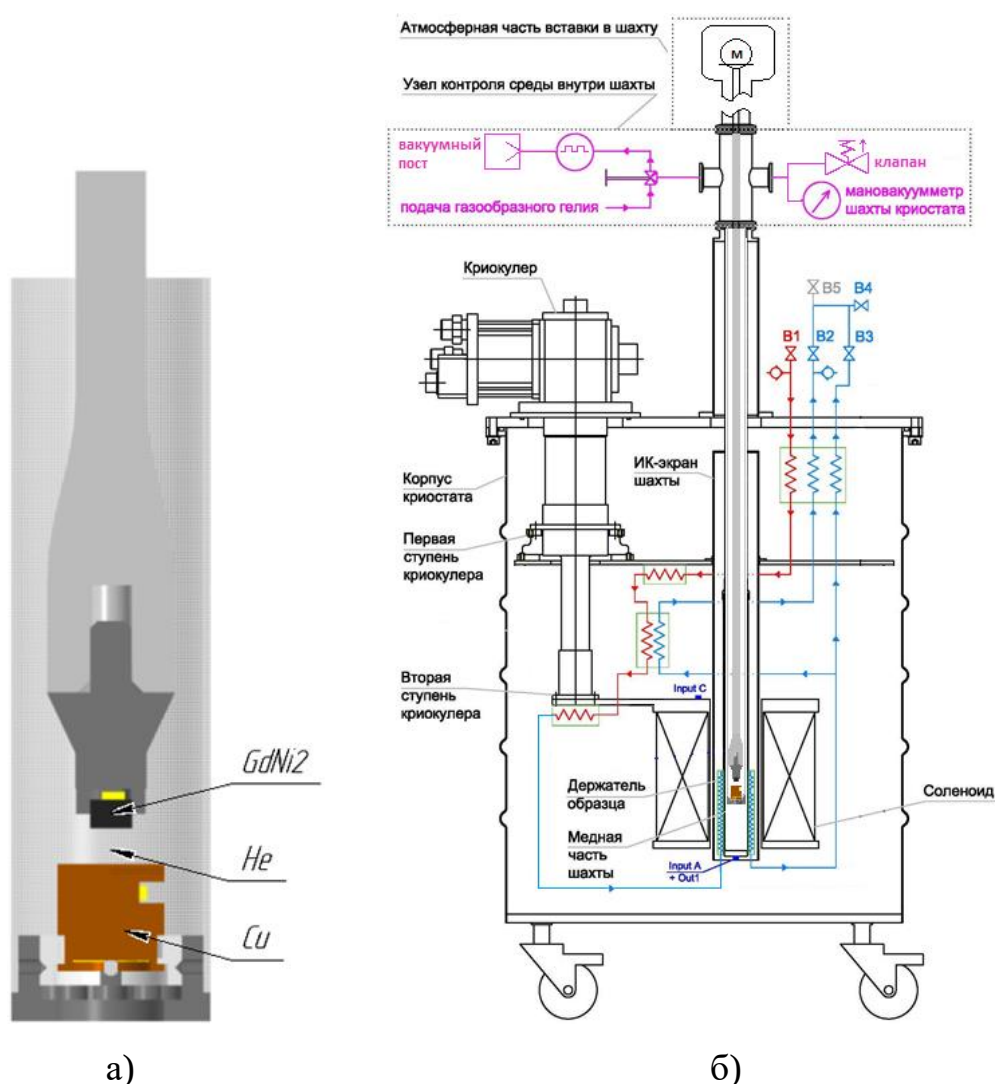


Рис. 1. Конструктивное исполнение газового теплового ключа узла теплообмена GdNi₂ и меди (а), расположение газового теплового ключа в криостате сверхпроводящего магнита 10 Тл (б).

Для регистрации температуры использовались датчики Cernox резистивного типа, установленные на внешней поверхности диска GdNi₂ и на медном теплообменнике (рис. 2). Они крепились с использованием клея БФ-6 через тонкий слой термопасты, обеспечивавшей хороший тепловой контакт. Нагрев GdNi₂ и медного теплоприемника осуществлялся нихромовой проволокой. Перед проведением экспериментов система вакуумировалась в течение пяти минут до давления $3 \cdot 10^{-2} - 9,5 \cdot 10^{-3}$ Па для удаления воздуха и влаги, что предотвращало неконтролируемый теплообмен с окружающей средой. Линейным электродвигателем устанавливалось расстояние от рабочего тела GdNi₂ до медного теплоприемника 5 мм. Эксперимент проводился на основе

криомагнитной системы с дальнейшей возможностью использования сверхпроводящего магнита и создания магнитного поля до 10 Тл включительно. Охлаждение, как сверхпроводящего магнита, так и рабочей области криостата осуществлялось с помощью криорефрижератора «SHI Cryogenics RDK-415D». Измерение с датчиков температуры «Серпих» происходило с помощью термоконтроллера «Lakeshore 336».

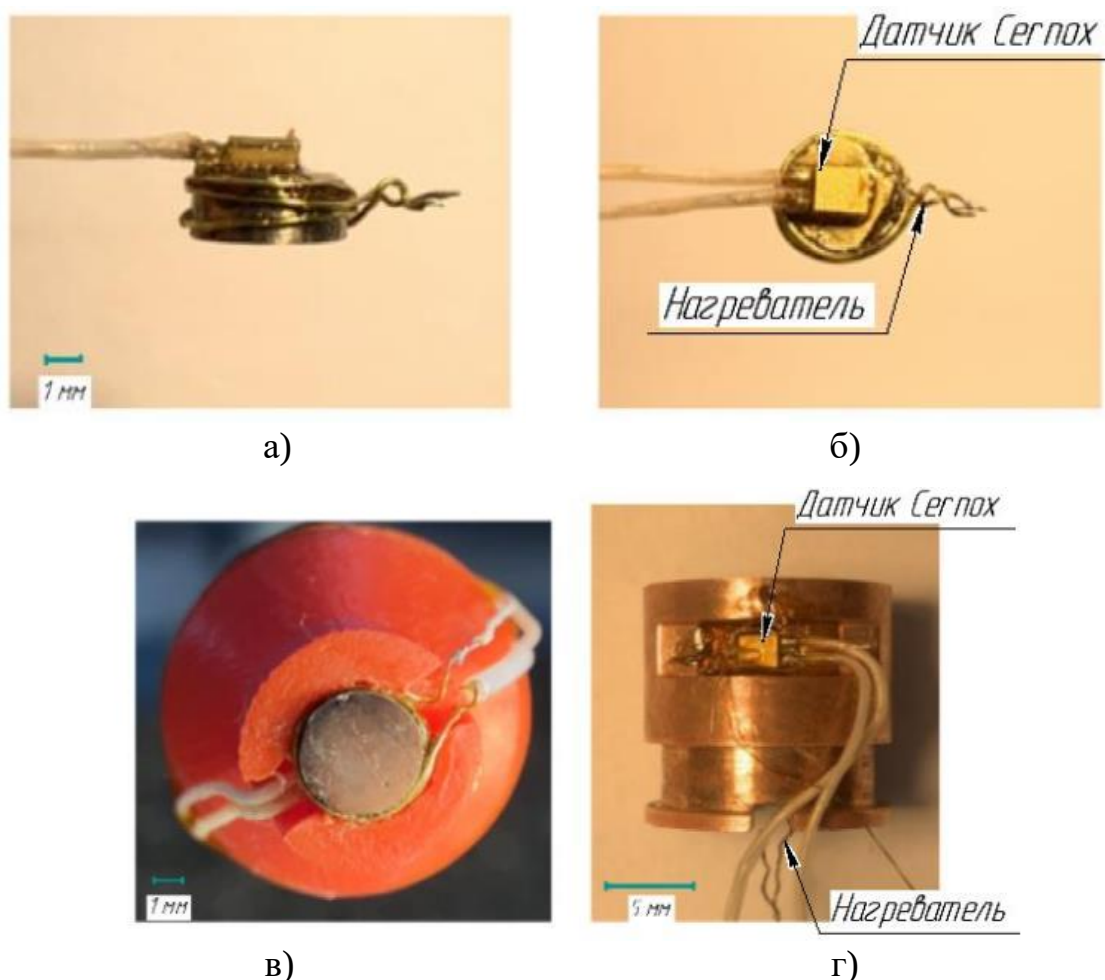


Рис. 2. Диск рабочего тела GdNi_2 : вид сбоку (а), вид сверху (б), закрепленный в ABS-держателе (в); цилиндр теплоприемника вид сбоку (г).

Эксперимент определения времени достижения термического равновесия строится на основе явления тепловой проводимости газа от более нагретого магнитокалорического сплава GdNi_2 к менее нагретому медному теплопринимающему цилиндру через слой инертного газа, что представляет собой рассматриваемый газовый тепловой ключ. Магнитокалорический сплав GdNi_2 в форме диска диаметром в вакуумной шахте криостата

термостабилизируется при температуре эксперимента $T_1 = T_{\text{GdNi}_2}$ таким образом, чтобы его температура T_1 была отлична на фиксированное значение ΔT_{span} от температуры $T_2 = T_{\text{Cu}}$ медного теплопринимающего цилиндра. Элементы находятся в вакууме $3 \cdot 10^{-2} - 9,5 \cdot 10^{-3}$ Па по данным теплоэлектрического датчика Пирани в адиабатических условиях. Затем в вакуумную камеру производится напуск гелия до 1,2 атмосфер абсолютного давления, регистрируется изменение температуры дисков, по данным которой определяется время наступления термического равновесия.

Обычно теплообменный газ в газовых тепловых ключах охлаждают до температурного уровня работы предварительным охлаждением, производя напуск предварительно охлажденного гелия в теплоизолированный объем [10]. Однако, особенностью работы рассматриваемого газового теплового ключа является то, что шахта криостата длиной $L = 875$ мм имеет по своей длине нелинейный температурный градиент длиной $L_{\text{гр}} = 755$ мм от «Input A» и захолаживающего теплообменника 20 К (60К, 76К или 80 К) до 293 К (рис. 1б). Так при первом температурном режиме эксперимента в нижней части шахты на ее торце, где установлен датчик «Input A» и на расстоянии 120 мм от этого датчика, где к шахте припаян захолаживающий теплообменник, температура составила $T_3 = 20,1$ К. Выше на 468 мм температура шахты равна 60 К, а также верхний фланец (KF-45 разъем) находится при температуре окружающей среды 293 К. Образцы располагаются на уровне захолаживающего теплообменника на расстоянии 100 мм от датчика «Input A» (рис. 1б) и до включения теплового ключа, как указано на рис. 3а, имеют температуры $T_2 = 20,7$ К и $T_1 = 26,2$ К. Поэтому теплообменный гелий испытывает предварительное охлаждение по мере натекания в шахту от комнатной температуры 293 К путем теплоотдачи к поверхности шахты с температурным градиентом и в области, в которой находятся образцы, гелий охлаждается до температуры T_3 , которой соответствует «Input A». Гелий занимает объем шахты за время около 10 секунд при приоткрытом впускном вентиле (линейные участки изменения температуры

медного образца T_2). То, что гелий занял весь объем, сигнализирует сбросной клапан (рассчитанный на давление 0,12 МПа).

2. Экспериментальные результаты и обсуждение

Эксперимент проводился на четырех температурных уровнях – 24 К, 61 К, 75 К и 80 К. По полученным графикам производилось экстраполирование для определения характерного времени температурной релаксации. Особенностью газовых тепловых ключей в отличие от механических является отсутствие потери температурного напора в конце процесса теплоотдачи. На рис. 3 для температурных уровней 24К, 61К, 75К и 80 К приводятся изменения температур T_1 , T_2 , T_3 , где время релаксации по линейной экстраполяции составило 4,6 с, 8,1 с, 10,4 с и 11,3 с соответственно. Время релаксации тем больше, тем выше температурный режим, значит результаты эксперимента подтверждают теоретические заключения о пропорциональной зависимости времени релаксации от температуры среды. Но в данных экспериментах температура T_3 шахты ниже T_1 и T_2 , гелий охлаждается до T_3 и охлаждает образец $GdNi_2$ и медный теплообменник. Однако, судя по графикам (рис. 3), охлаждения медного теплообменника не наблюдается. Рассмотрим теплообменный процесс (охлаждение $GdNi_2$), который однозначно проходит при температуре выше теплообменного газа. На рис. 3в в начальный момент срабатывания температура на дне шахты T_3 немного выше температурного уровня эксперимента. При напуске теплообменного газа происходит незначительный его нагрев на 0,025 К, что свидетельствует о том, что гелий поступает ко дну шахты предохлаждённым от продольного температурного градиента по длине шахты от 293 К до температуры выше температуры эксперимента. Тогда, на уровне образцов температура гелия будет выше температурного уровня эксперимента. Несмотря на это температура T_1 уменьшается при срабатывании газового теплового ключа, а T_2 растет, происходит теплообмен от $GdNi_2$ к медному теплоприемнику путем теплопроводности гелия и конвекции.

Время температурной релаксации составило 28,9 с, а время интенсивного процесса (90 % от релаксации температуры) 10,4 с.

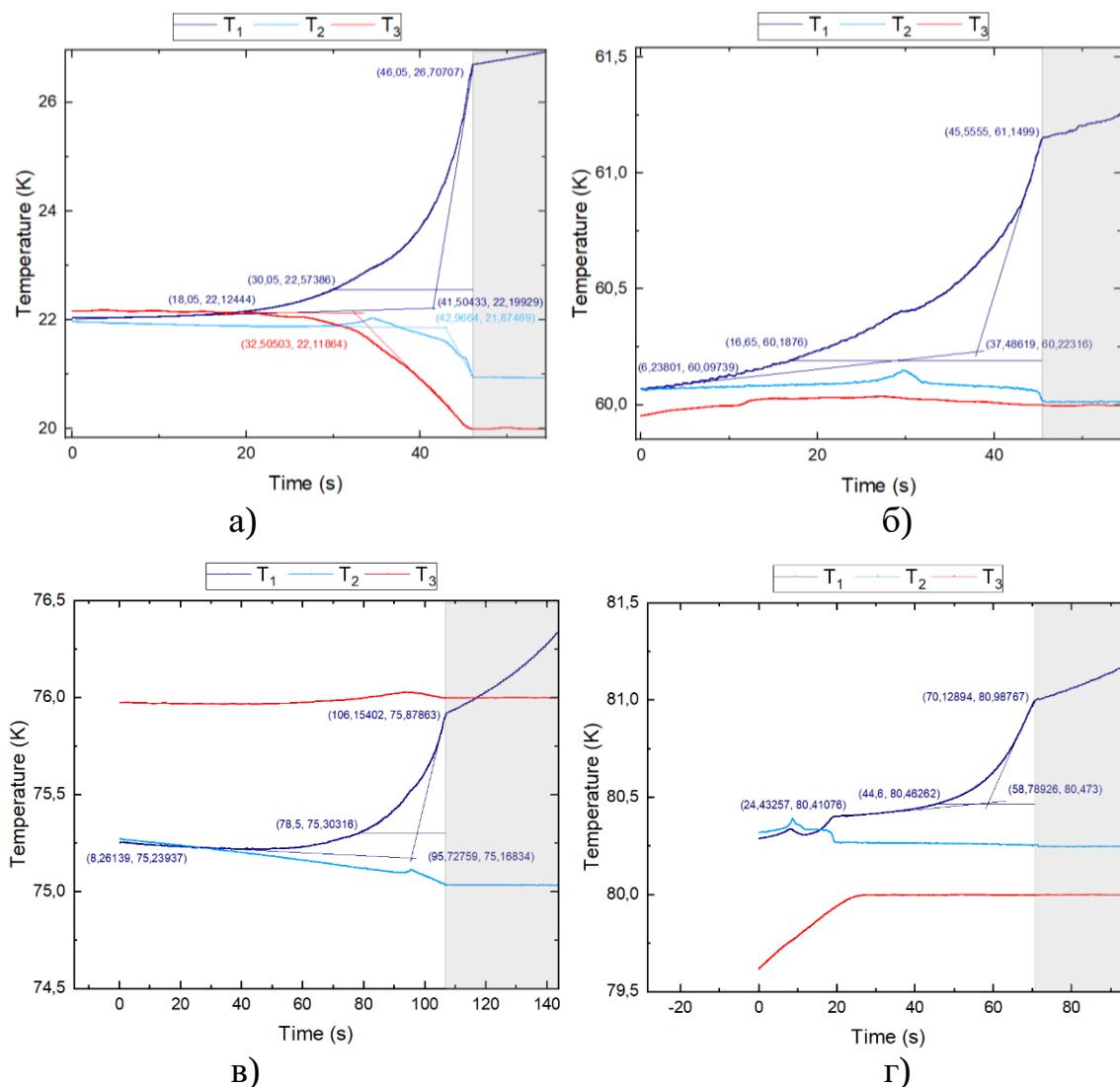


Рис. 3. Значения времени температурной релаксации образца GdNi_2 T_1 (синяя линия), медного теплопринимающего цилиндра T_2 (голубая линия) и изменение температуры шахты T_3 (красная линия) для температурных уровней: 24 К (а), 61 К (б), 75 К (в) и 80 К (г).

На рис. 4а приведено время релаксации, полученное путем линейной экстраполяции t_{ext} , измерения времени, когда теплообмен полностью завершился t_{relax} и когда прошло время интенсивного теплообмена при уменьшении температуры GdNi_2 на 90 % от общего изменения его температуры $t_{90\%}$ данных. Можно сказать, что время релаксации растет, если опираться на экстраполированные значения, что связано с увеличением теплоемкости образцов [15]. Если сравнить полученные значения с временем релаксации

в механическом тепловом ключе с приближенными или одинаковыми массогабаритными параметрами [15,16], то на температурном уровне 75 К время релаксации в механическом тепловом ключе без применения индиевого термоинтерфейса составит 60 секунд, а с индиевым термоинтерфейсом 10,7 секунд, против 10,4 секунд по экстраполяции, полученных в данной работе. Таким образом, нами установлено, что время релаксации сопоставимо для контактной пары криогенного механического теплового ключа с индиевым термоинтерфейсом и для криогенного газового теплового ключа. По характеру поведения в интервале температур 25-85 К значения также сходятся.

На рис. 4б представлены значения количества тепла, которое передается от GdNi_2 , вычисленное по изменению его температуры, для каждого температурного уровня. Понижение значений обусловлено условиями эксперимента, когда с повышением температурного уровня начальный температурный напор уменьшался с 5,8 К до 0,73 К. Эти значения могут послужить для экспериментальной оценки потенциальной холодопроизводительности единичной ступени криогенного магнитного рефрижератора в указанных массогабаритных параметрах.

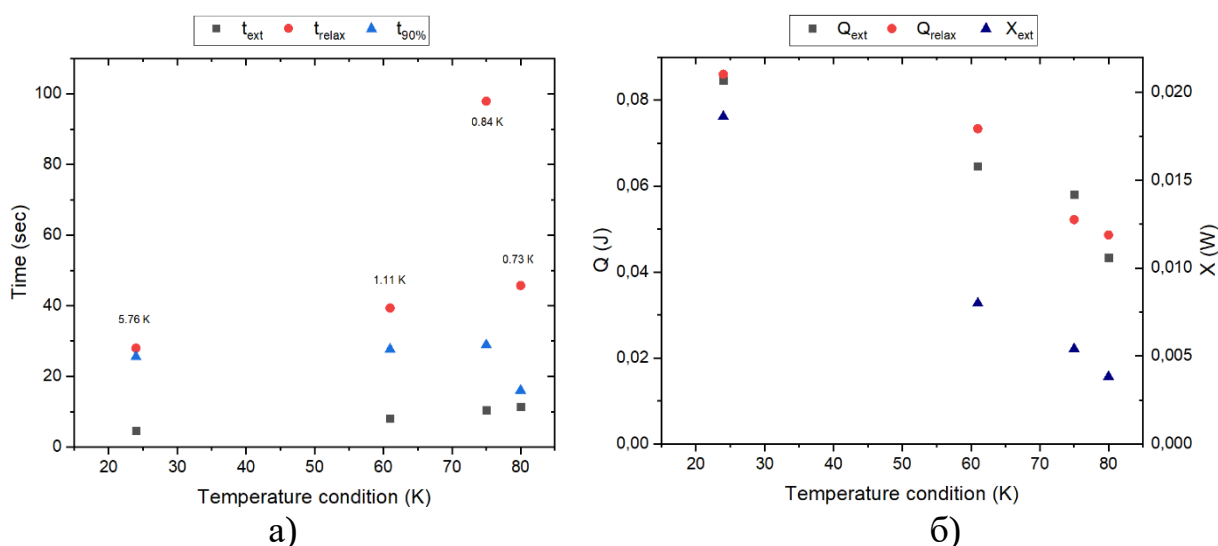


Рис. 4. Время температурной релаксации, полученное путем линейной аппроксимации производной t_{ext} (черные квадраты), полученные при полном окончании релаксационного процесса t_{relax} (красные треугольники) и при 90 процентов $t_{90\%}$ изменении температуры релаксации (синие треугольники) (а); количество тепла Q , отведенного от GdNi_2 (шкала слева) и мощность теплосъема W (шкала справа) при различных температурных уровнях (б).

Используя полученные экспериментальные значения количества тепла, переданного медному теплоприемнику, был построен холодильный цикл единичной ступени криогенного магнитного рефрижератора (рис. 5). Цикл магнитного охлаждения Брайтона может быть реализован на основе процессов адиабатного намагничивания и размагничивания, а также двух процессов теплопередачи при постоянном магнитном поле при помощи газовых тепловых ключей [16]. При увеличении внешнего магнитного поля (процесс 1-2) происходит адиабатическое увеличение температуры рабочего тела вследствие магнитокалорического эффекта, при этом полная энтропия остается постоянной. Далее при помощи газового теплового ключа происходит передача тепла к горячему теплоприемнику при постоянном магнитном поле (процесс 2- 3), таким образом температура рабочего тела уменьшается, тепло отводится в соответствии с данными рис. 4б. В процессе 3-4 происходит уменьшение внешнего магнитного поля, в результате чего температура рабочего тела адиабатически уменьшается, при этом, как и в процессе 1-2, полная энтропия остается постоянной. На завершающем цикл процессе 4-1 происходит подвод тепла газовым тепловым ключом от объекта охлаждения. Данный экспериментальный цикл Брайтона реализуется в течение 24,8 секунд. Таким образом экспериментально полученная потенциальная холодопроизводительность единичной ступени криогенного магнитного рефрижератора с газовым тепловым ключом на температурном уровне 75 К составила 5,4 мВт (13,8 Вт/кг) при массе рабочего тела 0,39 г. Приведенная к массе холодопроизводительность в два раза выше по сравнению с холодопроизводительностью цикла Брайтона, реализованного на основе механического теплового ключа без термоинтерфейса, который исследовался в нашей предыдущей работе [16].

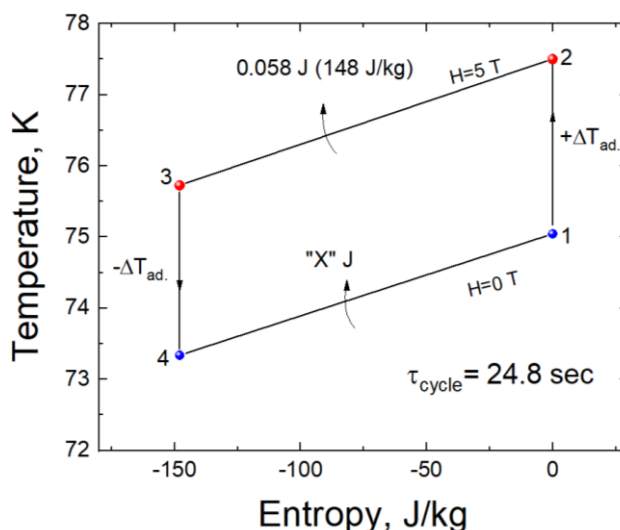


Рис. 5. Холодильный цикл Брайтона единичной ступени криогенного магнитного рефрижератора с газовым тепловым ключом.

Заключение

В ходе работы было установлено время релаксации газового гелиевого теплового ключа на температурных уровнях 24 К, 61 К, 75 К и 80 К, которое по линейной экстраполяции равно 4,6 с, 8,1 с, 10,4 с и 11,3 с, соответственно. Особенностью газовых тепловых ключей в отличие от механических является отсутствие потери температурного напора в конце процесса теплоотдачи. Установлено, что времена релаксации контактной пары криогенного механического теплового ключа с индиевым термоинтерфейсом и криогенного газового теплового ключа практически одинаковы. Потенциальная мощность теплосъема единичной ступени криогенного магнитного рефрижератора с газовым тепловым ключом на температурном уровне 75 К составила 5,4 мВт в массогабаритных параметрах при соотношении масс $m_{\text{Cu}}/m_{\text{GdNi}_2} = 49$ и соотношения теплообменных площадей $S_{\text{Cu}}/S_{\text{GdNi}_2} = 15$.

Финансирование: Исследование выполнено за счёт гранта Российского научного фонда, проект № 25-19-20141, <https://rscf.ru/project/25-19-20141/>.

Литература

1. Bywaters R. P., Griffin R. A. A gas-gap thermal switch for cryogenic applications //Cryogenics. – 1973. – Т. 13. – №. 6. – С. 344-349. [https://doi.org/10.1016/0011-2275\(73\)90059-3](https://doi.org/10.1016/0011-2275(73)90059-3)
2. Lucia U., Grisolia G. Magnetocaloric refrigeration in the context of sustainability: A review of thermodynamic bases, the state of the art, and future prospects //Energies. – 2024. – Т. 17. – №. 14. – С. 3585. <https://doi.org/10.3390/en17143585>
3. Kitanovski A., Egolf P. W. Thermodynamics of magnetic refrigeration //International journal of refrigeration. – 2006. – Т. 29. – №. 1. – С. 3-21. <https://doi.org/10.1016/j.ijrefrig.2005.04.007>
4. Duband L., Ravex A. A thermal switch for use at 0.3 k in space borne cryogenic systems. – SAE Technical Paper, 1994. – №. 941278. <https://doi.org/10.4271/941278>
5. Duband L. A thermal switch for use at liquid helium temperature in space-borne cryogenic systems //Cryocoolers 8. – Boston, MA : Springer US, 1995. – С. 731-741. https://doi.org/10.1007/978-1-4757-9888-3_72
6. Klinar K. et al. Fluidic and mechanical thermal control devices //Advanced electronic materials. – 2021. – Т. 7. – №. 3. – С. 2000623. <https://doi.org/10.1002/aelm.202000623>
7. Yu F. Q. et al. The study of active gas-gap heat switch using carbon nanotubes as the adsorption material //IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. – IOP Publishing, 2024. – Т. 1301. – №. 1. – С. 012037. <https://doi.org/10.1088/1757-899X/1301/1/012037>
8. Kamiya K. et al. Hydrogen liquefaction by active magnetic regenerative refrigeration //Cryogenics. – 2025. – С. 104205. <https://doi.org/10.1016/j.cryogenics.2025.104205>
9. 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. <https://doi.org/10.1016/j.cryogenics.2017.09.008>

10. 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. <https://doi.org/10.1016/j.cryogenics.2015.06.006>
11. Angelica Liponi, Mathieu Tenda, Rasmus Bjørk, Umberto Desideri. Analysis of configurations for coupling an active magnetic regenerator with heat exchangers for hydrogen liquefaction //Fuel Processing Technology. – 2025. – Т. 278. – С. 108337. <https://doi.org/10.1016/j.fuproc.2025.108337>
12. Archipley C. et al. Methane liquefaction with an active magnetic regenerative refrigerator //Cryogenics. – 2022. – Т. 128. – С. 103588. <https://doi.org/10.1016/j.cryogenics.2022.103588>
13. Franco V. et al. Magnetocaloric effect: From materials research to refrigeration devices //Progress in Materials Science. – 2018. – Т. 93. – С. 112-232. <https://doi.org/10.1016/j.pmatsci.2017.10.005>
14. Cirillo L. et al. A review of the state of the art of the cryogenic magnetocaloric systems for gas liquefaction //International Journal of Refrigeration. – 2025. <https://doi.org/10.1016/j.ijrefrig.2025.08.007>
15. Kolesov K. A. et al. Parameters of the cryogenic mechanical thermal switch with temperature range 15–300 K for magnetic refrigerators //Cryogenics. – 2024. – Т. 142. – С. 103899. <https://doi.org/10.1016/j.cryogenics.2024.103899>
16. Kolesov K. A. et al. Experimental Brayton cycle of a cryogenic magnetic refrigerator based on GdNi₂ alloy //International Journal of Heat and Mass Transfer. – 2024. – Т. 235. – С. 126120. <https://doi.org/10.1016/j.ijheatmasstransfer.2024.126120>

Для цитирования:

Колесов К.А., Белова О.В., Морковин С.С., Мусабилов И.И., Маширов А.В. Газовый тепловой ключ криогенного магнитного рефрижератора на основе сплава GdNi₂. // Журнал радиоэлектроники. – 2026. – № 6. <https://doi.org/10.30898/1684-1719.2026.6.9>