

**К 90-ЛЕТИЮ
ВЛАДИМИРА ГРИГОРЬЕВИЧА ШАВРОВА**

УДК 536.241,537.638.5,536.212.2

**КОНТАКТНОЕ ТЕРМОСОПРОТИВЛЕНИЕ В ОБЛАСТИ
КРИОГЕННЫХ ТЕМПЕРАТУР В СИЛЬНЫХ МАГНИТНЫХ ПОЛЯХ**

© 2023 г. К. А. Колесов^а*, А. В. Маширов^а, А. С. Кузнецов^а, В. В. Коледов^а,
А. О. Петров^а, В. Г. Шавров^а

^а *Институт радиотехники и электроники им. В.А. Котельникова РАН,
ул. Моховая, 11, стр. 7, Москва, 125009 Российская Федерация*

*E-mail: kolesovkka@mail.ru

Поступила в редакцию 20.09.2022 г.

После доработки 03.10.2022 г.

Принята к публикации 09.10.2022 г.

Исследована физическая модель механического теплового ключа при криогенных температурах, в которой теплопередача происходит за счет контактной теплопроводности в разъемной контактной паре из двух медных цилиндров. На основе криомагнитной системы со сверхпроводящим соленоидом 10 Тл разработан механический тепловой ключ, определены значения контактной теплопроводности в диапазоне температур 10...160 К, в том числе в магнитном поле 5 Тл. В исследуемой области температур 60...80 К: близкой к фазовому переходу соединений DyAl₂ и GdNi₂, значение контактной теплопроводности составило 2300...3300 Вт/(м² К). Экспериментально определено влияние магнитного поля до 5 Тл на контактное термическое сопротивление в условиях вакуума.

DOI: 10.31857/S0033849423040058, **EDN:** PEZNZB

ВВЕДЕНИЕ

Основным фактором эффективной работы механического теплового ключа является параметр термической проводимости контакта (контактной теплопроводности) между источником тепла и теплоприемником [1]. Этот параметр оказывает основное влияние на эффективность охлаждения. При применении теплового ключа в качестве механизма теплопередачи в вакууме необходим надежный узел, который обладает высокой термической проводимостью и который можно сомкнуть и разомкнуть (включить и выключить тепловой ключ) при низких температурах в условиях вакуума. Так как при контакте часто остаются неизвестными реальные параметры деформации, топографии контактирующих поверхностей, а также влияния внешних параметров, таких как среда и внешнее магнитное поле, то необходимо проводить эксперименты при данных параметрах контактирующих пар и внешних условиях с конкретными образцами. Существует большое количество теоретических моделей [2, 3] для определения термической проводимости контакта и обратной ей величине – термического сопротивления контакта, построенные с учетом эмпирических коэффициентов и основанные на определенных допущениях, в зависимости от механической обработки образцов, условиях нагружения, рода материалов и др., справедливость данных допущений может быть определена лишь эксперимен-

тальным путем. На данный момент работ по экспериментальному определению контактного термического сопротивления (КТС) неразъемных пар довольно много [4, 5], в том числе и современных [6, 7]. В свою очередь работ по определению КТС при прикладывании внешнего магнитного поля не было найдено.

Цель данной работы – оценить влияние термомагнитных эффектов на КТС и дальнейшее применение механических тепловых ключей при магнитном охлаждении.

1. ПРОВЕДЕНИЕ ЭКСПЕРИМЕНТА

1.1. Метод определения КТС

Для исследования КТС был использован экспериментальный метод при нестационарном тепловом потоке [8], который заключается в том, чтобы измерить скорости изменения температуры dT/dt в нескольких точках контактной пары, затем, экстраполируя данное изменение температуры до плоскости разъема, найти параметры a и b (К/мин) – скорость подъема температуры на границах образцов и величина изменения скорости повышения температуры в контактной зоне соответственно. При этом проводимость контакта α_k определяется следующим образом:

$$\alpha_k = \frac{1}{R_k} = \frac{a - b}{b(R_b + R_H)}, \quad (1)$$

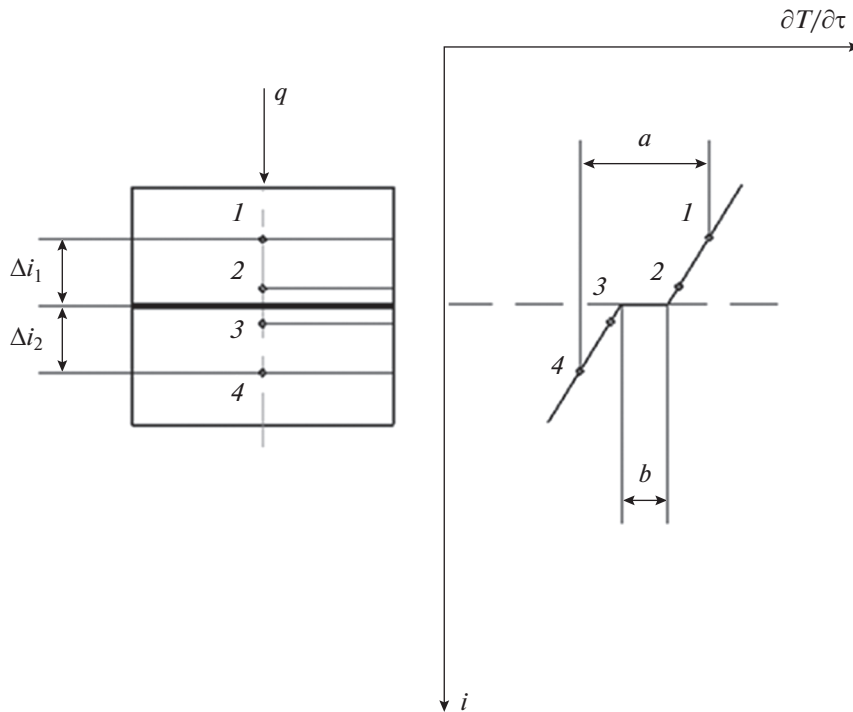


Рис. 1. Определение термического сопротивления в зоне контакта при нестационарном тепловом режиме; q — направление теплового потока.

где R_b и R_n — термические сопротивления материала соответственно верхнего и нижнего цилиндров контактной пары в данный момент времени при данной температуре. По полученным значениям температур (в точках 1...4) строится в относительных координатах график зависимости $\partial T/\partial \tau = f(i)$, где i — относительная координата (рис. 1).

Так, для каждой точки определяется разность температур по мере нагрева контактной пары ΔT и частное от деления $\Delta T/(\tau_2 - \tau_1)$ наносится в зависимости от относительной координаты. Затем методом линейной экстраполяции находится величина изменения скорости повышения температуры в контактной зоне:

$$b = \frac{\partial T_k(1, \tau)}{\partial \tau} - \frac{\partial T_k(0, \tau)}{\partial \tau}. \tag{2}$$

После этого определяется скорость повышения температуры на границах контактной пары a . Термические сопротивления R_b и R_n определяют расчетным путем:

$$R_b = \Delta_1/\bar{\lambda}_b, \tag{3}$$

$$R_n = \Delta_2/\bar{\lambda}_n, \tag{4}$$

где $\bar{\lambda}_b$ и $\bar{\lambda}_n$ — приведенные теплопроводности соответственно верхнего и нижнего цилиндров контактной пары.

1.2. Подготовка образцов

Контактная пара представляла собой два медных цилиндра, диаметр контактирующей поверхности — 15 мм. Предварительную шлифовку контактирующих поверхностей осуществляли с помощью шлифовальной бумаги с зернистостью P1000 и P2000 и алмазной пасты 14/10. Финишную полировку проводили с помощью алмазной пасты 3/2, что соответствует 8-му классу шероховатости. Измерение температуры осуществлялось предварительно откалиброванными датчиками “Серпох” CX-1050-SD-НТ для верхнего образца и CX-1050-SD-НТ для нижнего, смонтированными на внешней стороне образцов, а также дифференциальной термопарой, которая располагалась в отверстии, просверленном до оси цилиндра, на расстоянии 3 мм от датчика “Серпох” (рис. 2).

Выфрезерованная проточка под датчик “Серпох” также предварительно была обработана с помощью шлифовальной бумаги с зернистостью P1000 и P2000, сам датчик плотно вклеивали в проточку с помощью клея БФ-40. Нихромовый нагреватель образца также располагался в выфрезерованной кольцевой проточке и имел подковообразную форму. Элементы контактной пары крепились к держателю образцов через проставочные кольца из ABS-пластика с помощью винтов (рис. 3). Для уменьшения теплопритоков к элементам контактной пары предусмотрены конструкторские особенности, которые позволяют уменьшить площадь контакта между проставоч-

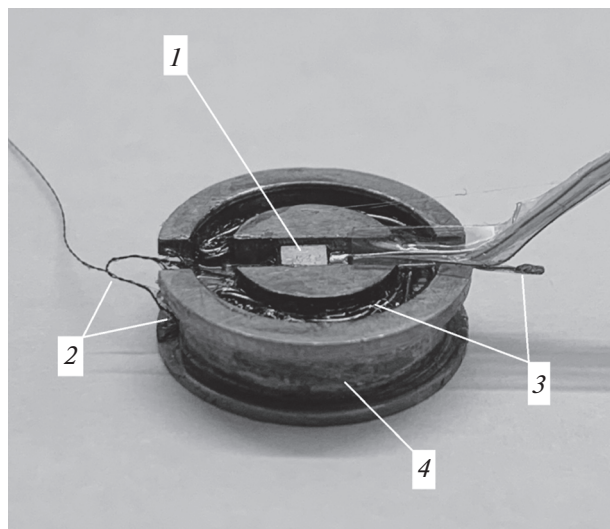


Рис. 2. Изображение исследуемых цилиндров контактной пары и монтажа измерительных элементов: 1 – датчик “Сенпох”, 2 – дифференциальная термопара, 3 – нихромовый нагреватель, 4 – проточка крепления.

ным кольцом и держателем образца. Нижний (неподвижный) держатель в сборе крепится к штанге, а верхний (подвижный) – через шток из ABS-пластика к штоку линейного электродвигателя.

Размыкание и замыкание контактирующих поверхностей происходит за счет возвратно-поступательного перемещения с помощью линейного электродвигателя, на штоке которого через длинный стержень из ABS-пластика крепится подвижный цилиндр контактной пары (рис. 4, слева), до контакта с неподвижным цилиндром (рис. 4, справа). Данную конструкцию помещали в “шахту” криостата диаметром 29 мм на базе криомагнитной системы 10 Тл.

2. ИЗМЕРЕНИЯ И РЕЗУЛЬТАТЫ ЭКСПЕРИМЕНТА

После монтирования контактной пары в криостат, происходила откачка до давлений $1.5 \times 10^{-4} \dots 7.2 \times 10^{-5}$ мбар и охлаждение как контактной пары, так и сверхпроводящего магнита с помощью криорефрижера. После охлаждения контактной пары и создания усилия прижатия 150...250 кПа между контактирующими поверхностями, включался нагреватель верхнего подвижного цилиндра контактной пары, в результате чего происходил теплоперенос за счет контактной теплопроводности от верхнего цилиндра к нижнему цилиндру контактной пары. По описанной выше методике определяли термическую проводимость контакта и контактное термическое сопротивление в диапазоне температур 60...80 К (рис. 5). Аналогичная последовательность была и для второй серии экспериментов, только с внешним магнитным полем 5 Тл. Контактное давление между поверхностями составляло 250 кПа, которое регулировалось значением подаваемого тока на катушку линейного электродвигателя. В результате проведенных измерений были получены значения термической проводимости контакта двух контактирующих медных цилиндров в широком диапазоне температур с учетом внешнего магнитного поля (рис. 6).

Интерес к механическим тепловым ключам в криогенной области температур связан с их применением в криогенных магнитных рефрижерах на основе интерметаллидов с магнитными фазовыми переходами (например, RNi_2 , RAI_2 и др., где R – редкоземельный металл). В таких интерметаллидах в криогенной области температур наблюдается точка Кюри и, как следствие, высокие значения магнитокалорического эффекта. В области температур 60...80 К, близкой к фазовому переходу соединений $DyAl_2$ и $GdNi_2$, терми-

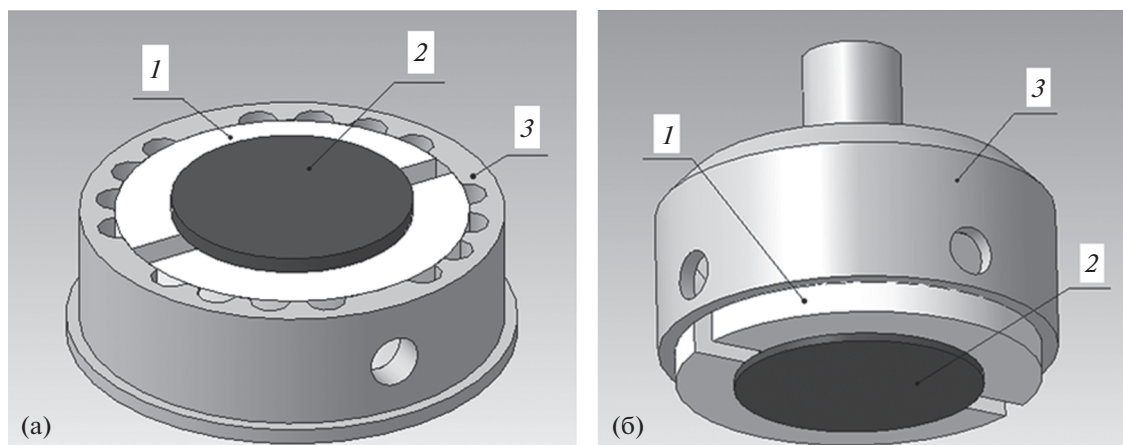


Рис. 3. Схема крепления цилиндров к неподвижному (а) и подвижному держателям (б): 1 – проставочное кольцо, 2 – образец, 3 – держатель.

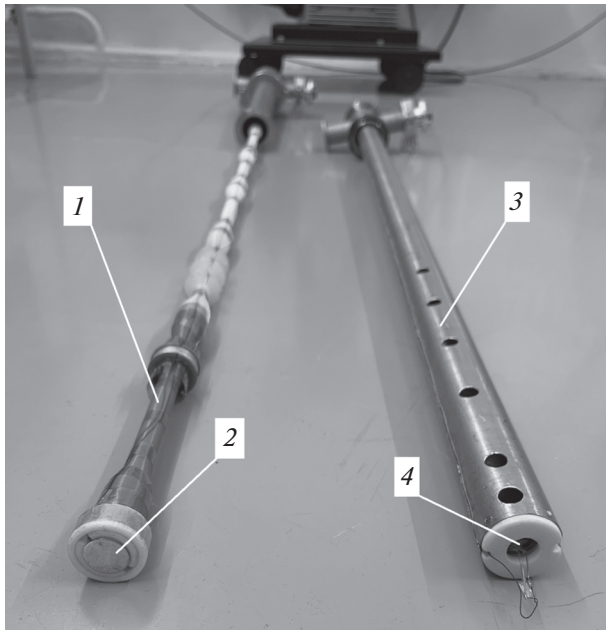


Рис. 4. Фото механического теплового ключа: 1 – шток из ABS-пластика верхнего цилиндра, 2 – верхний цилиндр контактной пары, 3 – штанга нижнего цилиндра, 4 – нижний цилиндр контактной пары.

ческая проводимость контакта с учетом внешнего магнитного поля составила около $3500 \text{ Вт}/(\text{м}^2 \text{ К})$. Полученная величина термической проводимости контакта согласуется с работой [9] для “сухого соединения” (отсутствует промежуточный интерфейс) контактной пары медь–медь, которая составляет при температуре 77 К и усилии прижатия 2.8 и 11 МПа значения 2050 и $8400 \text{ Вт}/(\text{м}^2 \text{ К})$, а при усилии 3.8 МПа в температурном диапазоне 110...300 К было получено значение $1680...3770 \text{ Вт}/(\text{м}^2 \text{ К})$.

3. ОБСУЖДЕНИЕ ПОЛУЧЕННЫХ РЕЗУЛЬТАТОВ

При передаче тепла в механическом тепловом ключе с помощью контактной теплопроводности для реализации единичного холодильного цикла в температурном диапазоне 60...120 К в разъемной контактной паре теплоотдатчик–теплоприемник возможно достижение термической проводимости контакта порядка $3000 \text{ Вт}/(\text{м}^2 \text{ К})$. Анализ литературных данных [9] показывает, что даже измерения объемной теплопроводности чистой меди могут отличаться в 2...5 раз. Также значительное воздействие оказывают поверхностные свойства контактных пар, что в свою очередь может влиять на полученные результаты. Как показал эксперимент, внешнее магнитное поле не оказывает существенного влияния на термическую проводимость контакта (ТПК): возрастание ТПК в диапазоне исследуемых температур как в магнитном поле, так и без него сохраняется.

При измерении квазиизотермического выделения тепла ΔQ -эффекта [10] исследуемый интерметаллический образец с помощью термоконтактного интерфейса крепится к массивному медному блоку, далее при вводе данной конструкции в магнитное поле по изменению температуры медного блока определяется величина ΔQ -эффекта. Однако при использовании данной величины для оценки холодопроизводительности криогенных магнитных рефрижераторов с механическими тепловыми ключами необходимо учитывать КТС контактирующих поверхностей. В таком случае величина ΔQ -эффекта будет передаваться путем контактной теплопроводности с полученным значением ТПК. Основываясь на работе [11], ΔQ -эффект для сплавов Al_2 возьмем равным $600 \text{ Дж}/\text{кг}$,

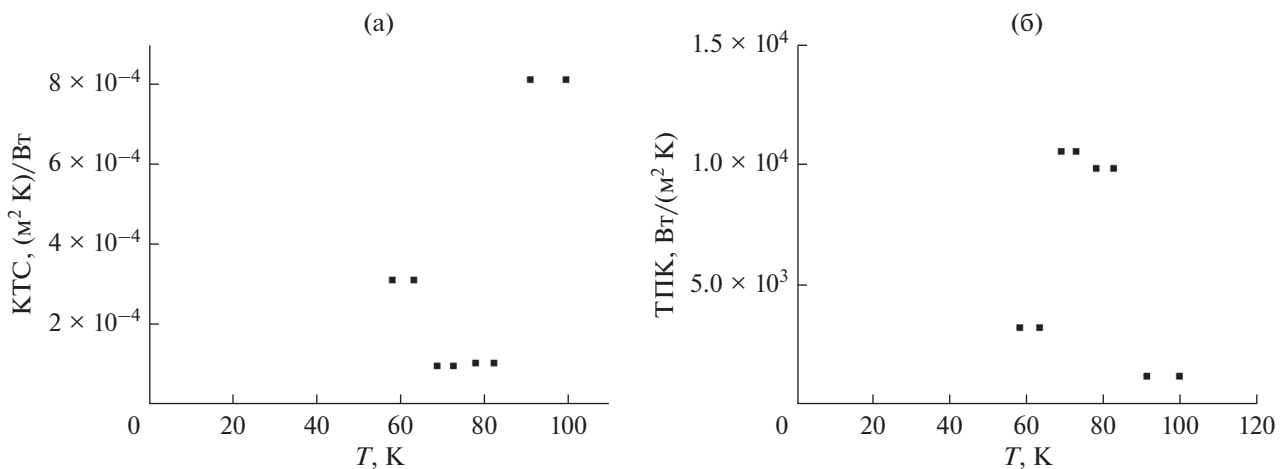


Рис. 5. Зависимость контактного термического сопротивления КТС (а) и термической проводимости контакта ТПК (б) от температуры.

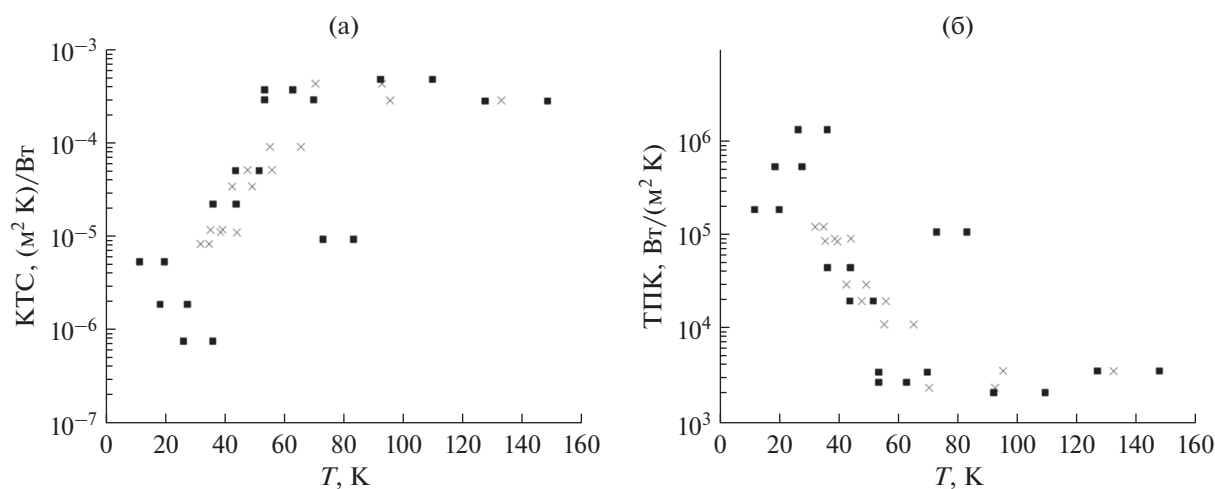


Рис. 6. Зависимость ТПК (а) и КТС (б) контактной пары Cu—Cu в диапазоне температур 20...160 К при контактном давлении 200 кПа без внешнего магнитного поля — квадратный символ, зависимость ТПК КТС контактной пары Cu—Cu в диапазоне температур 20...160 К при контактном давлении 200 кПа в магнитном поле 5 Тл — перекрестный символ.

используя полученное экспериментальное значение термической проводимости контакта около $10000 \text{ Вт}/(\text{м}^2 \text{ К})$ и параметры теплопередающих контактирующих дисков, при условии, что процесс в первом приближении является квазистационарным, получим:

$$\Delta T = Q / (\text{ТПК} \times S), \quad (5)$$

где Q — тепловой поток от интерметаллического соединения, S — площадь контактирующей поверхности. Можно прийти к выводу, что при разности температур теплоотдатчика и теплоприемника около 6 К в диапазоне температур 60...80 К потеря теплового напора составит около 2.6 К, что будет существенно влиять на работу криогенного магнитного рефрижератора.

Также из литературных источников [12] известно, что при контакте разнородных материалов наблюдается эффект, при котором тепловой поток усиливается или ослабляется в зависимости от его направления от одного образца к другому. Поэтому для определения контактной термической проводимости планируется заменить подвижный медный цилиндр контактной пары на интерметаллический материал (DyAl_2 и GdNi_2), обладающий магнитокалорическим эффектом, для проведения серии экспериментов с учетом разнородности материалов.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Таким образом, получены значения ТПК и обратной ей величине КТС для разъемного соединения Cu—Cu модели механического теплового

ключа в широком диапазоне температур, а также при воздействии внешнего магнитного поля до 5 Тл. Показано, что воздействие внешнего магнитного поля не оказывает существенного влияния на измеряемые величины. Проведена оценка потери температурного напора в диапазоне 60...80 К, который может составлять порядка 2.6 К. При вычислении ТПК использовались литературные данные по теплопроводности меди [13], по этой причине в районе температур около 20 К наблюдается высокое значение ТПК.

ФИНАНСИРОВАНИЕ РАБОТЫ

Работа выполнена при финансовой поддержке Российского научного фонда (проект № 20-79-10197).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Klinar K., Swoboda T., Munoz M., Kitanovski A.* // Adv. Electronic Mater. 2021. V. 7. № 3. Article No. 2000623. <https://doi.org/10.1002/aelm.202000623>
2. *Lambert M.A., Fletcher L.S.* // J. Thermophysics Heat Transfer. 1997. V. 11. № 2. P. 129. <https://doi.org/10.2514/2.6221>
3. *Xian Y., Zhang P., Zhai et al.* // Appl. Therm. Engineering. 2018. V. 130. P. 1530. <https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2017.10.163>
4. *Clausing A.M., Chao B.T.* // J. Heat Transfer. 1965. V. 87. № 2. P. 243. <https://doi.org/10.1115/1.3689082>
5. *Bahrami M., Culham J.R., Yananovich M.M., Schneider G.E.* // Appl. Mechanics Rev. 2006. V. 59. № 1. P. 1. <https://doi.org/10.1115/1.2110231>

6. *Tariq A., Asif M.* // Heat Mass Transfer. 2016. V. 52. № 2. P. 291.
<https://doi.org/10.1007/s00231-015-1551-1>
7. *Drobizhev A., Reiten J., Singh V., Kolomensky Y.G.* // Cryogenics. 2017. V. 85. P. 63.
<https://doi.org/10.1016/j.cryogenics.2017.05.008>
8. *Понов В.М.* Теплообмен в зоне контакта разъемных и неразъемных соединений. М.: Энергия, 1971.
9. *Gmelin E., Asen-Palmer M., Reuther M., Villar R.* // J. Phys. D: Appl. Phys. 1999. V. 32. № 6. R19.
<https://doi.org/10.1088/0022-3727/32/6/004>
10. *Koshkid'ko Yu.S., Dilmieva E.T. et al.* // J. Alloys Compounds. 2022. V. 904. Article No. 164051.
<https://doi.org/10.1016/j.jallcom.2022.164051>
11. *Кошкидько Ю.С., Дильмиева Э.Т., Каманцев А.П. и др.* // РЭ. 2023. Т. 68. № 4. С.
12. *Fukuoka T., Nomura M.* // J. Pressure Vessel Technol. 2013. V. 135. № 2. P. 021403.
<https://doi.org/10.1115/1.4007958>
13. *Berman R., MacDonald D.* // Proc. Royal Soc. A: Math., Phys., Engineering Sci. 1952. V. 211. № 1104. P. 122.
<https://doi.org/10.1098/rspa.1952.0029>