



УДК 536.241  
ГРНТИ 55.47.07

## ПРИМЕНЕНИЕ МАЛОТЕПЛОПРОВОДНЫХ ДИСПЕРСНЫХ ЗАПОЛНИТЕЛЕЙ ДЛЯ ТЕРМОРЕГУЛИРОВАНИЯ ПРОЦЕССОВ ТЕПЛООБМЕНА В СОСТАВНЫХ КОНСТРУКЦИЯХ АВИАЦИОННО-КОСМИЧЕСКИХ СИСТЕМ

*О.Л. ЕРИН, кандидат технических наук  
ВУНЦ ВВС «ВВА имени профессора Н.Е. Жуковского и Ю.А. Гагарина» (г. Воронеж)  
В.М. ПОПОВ, доктор технических наук, профессор  
Воронежский государственный лесотехнический университет имени Г.Ф. Морозова (г. Воронеж)  
О.Р. ДОРНЯК, доктор технических наук, доцент  
Воронежский государственный лесотехнический университет имени Г.Ф. Морозова (г. Воронеж)*

В статье приведены результаты исследований по созданию теплоизоляционных экранов из малотеплопроводных порошков оксидов в составных конструкциях авиационно-космических систем. Рассматривается формирование контактного термосопротивления между металлическими поверхностями в контактной паре с порошковыми заполнителями из материалов малой теплопроводности. На основании данных специально проведенных экспериментов установлены повышение термосопротивления по сравнению с сопротивлением при непосредственном контакте поверхностей и зависимость сопротивления от дисперсности и количества частиц заполнителя. Рассмотрено влияние сочетания основных материалов контактных пар и материалов заполнителей, позволяющее создавать соединения с оптимальными теплофизическими свойствами.

*Ключевые слова:* теплоизоляция, контактное термосопротивление, теплопроводность, порошковый заполнитель, дисперсность, эквивалентная воздушная прослойка.

## THE LOW-HEAT-CONDUCTING DISPERSED AGGREGATES APPLICATION FOR THERMAL CONTROL OF HEAT EXCHANGE PROCESSES IN AEROSPACE SYSTEMS COMPOSITE STRUCTURES

*O.L. ERIN, Candidate of Technical sciences  
MESC AF «N.E. Zhukovsky and Y.A. Gagarin Air Force Academy» (Voronezh)  
V.M. POPOV, Doctor of Technical sciences, Professor  
G.F. Morozov Voronezh State Forestry University (Voronezh)  
O.R. DORNYAK, Doctor of Technical sciences, Associate Professor  
G.F. Morozov Voronezh State Forestry University (Voronezh)*

The article presents the results of research on the creation of heat-insulating screens from low-heat-conducting oxide powders in composite structures of aerospace systems. The formation of contact thermal resistance between metal surfaces in a contact pair with powder fillers made of materials of low thermal conductivity is considered. The increase in thermal resistance in comparison with the resistance at direct contact of surfaces and the dependence of the resistance on the dispersion and the number of filler particles is established on the basis of data from specially conducted experiments. The influence of the combination of the main materials of contact pairs and filler materials, which allows creating compounds with optimal thermal properties, is considered.

*Keywords:* thermal insulation, contact thermal resistance, thermal conductivity, powder filler, dispersion, equivalent air layer.



**Введение.** Надежное функционирование современных авиационных и космических летательных аппаратов в значительной степени зависит от температурного режима их конструкций. При проведении тепловых расчетов элементов конструкций необходима информация о величине контактного термосопротивления (КТС) через составные системы. Так, при проектировании авиационно-космических систем требуется знание КТС, как основного показателя качества теплоизоляции таких элементов, как отсеки с криогенным топливом, отражающие экраны, узлы крепления различных датчиков и антенн. Практически данная проблема решается применением различных теплоизоляционных материалов [1]. Их использование в каждом конкретном случае требует надежных сведений о формировании КТС.

**Актуальность.** Проблеме теплообмена через контактную площадку в составных конструкциях на сегодняшний день посвящено значительное число специальных исследований экспериментальных и теоретических [2, 3]. Вместе с тем, несмотря на значительный по объему расчетный и экспериментальный материал, прогнозирование КТС на данном этапе для пар с малотеплопроводными заполнителями в межконтактной зоне затруднено [4].

**Экспериментальное определение контактного термосопротивления.** Для возможности осуществления оценки КТС в качестве заполнителя в контактной зоне используются материалы, свойства которых в определенной степени мало зависят от нагрузки и чистоты обработки поверхностей контактной пары. В качестве таких заполнителей использовались порошки оксидов меди, магния и алюминия. Экспериментальное определение контактного термосопротивления слоя порошкового заполнителя осуществлялось на установке стержневого типа, функционирующей в режиме стационарности [5]. Экспериментальная установка состоит из пары металлических цилиндров. Верхний цилиндр (нагреватель) оснащен электронагревателем, тепловую мощность которого можно изменять с помощью регулятора напряжения и силы тока. Через нижний цилиндр (холодильник) для отвода тепла пропускается вода постоянной температуры. В месте соприкосновения металлических цилиндров устанавливается контактный рабочий блок, состоящий из двух латунных цилиндров марки Л80 длиной по 50 мм и диаметром 30 мм. В этом контактном рабочем блоке имеются несколько несквозных отверстий диаметром 1,5 мм на глубину радиуса, в них установлены по пять хромель-копелевых термопар, каждая из которых расположена в 8 мм друг от друга, а от поверхности контакта – 4 мм. Боковые поверхности контактной рабочей группы, а также металлические цилиндры имеют адиабатное покрытие для предотвращения обмена тепла с окружающей средой. Электродвижущая сила, развиваемая термопарами, измеряется с помощью электронного милливольтметра.

Изменение нагрузки на образцы реализуется с помощью специального винтового нагрузочного устройства, снабженного измерительным элементом.

Для определения контактного термического сопротивления  $R_k$  использовалось уравнение

$$R_k = \frac{\Delta T_k}{q_{cp}}, \quad (1)$$

где среднее значение теплового потока через верхний  $q_s$  и нижний  $q_n$  образцы находится в виде

$$q_{cp} = \frac{q_s + q_n}{2}. \quad (2)$$

Из одномерного уравнения Фурье по табличным значениям теплопроводности материалов образцов и градиента температур определяются плотности тепловых потоков  $q_s$  и  $q_n$  :



$$q_6 = \frac{\lambda_6 (T_n - T_{n-1})}{l_n - l_{n-1}}, \quad (3)$$

$$q_n = \frac{\lambda_6 (T_m - T_{m+1})}{l_m - l_{m+1}}. \quad (4)$$

Здесь  $T_n, T_{n-1}, T_m, T_{m+1}$  – температуры в соответствующих сечениях;  $l_n - l_{n-1}, l_m - l_{m+1}$  – промежуток между смежными сечениями;  $\lambda_6$  и  $\lambda_6$  – коэффициенты теплопроводности материалов образцов.

Входящий в (1) температурный перепад в зоне соприкосновения  $\Delta T_k$  находится согласно методу линейной экстраполяции [6].

В процессе постановки опытов исследовался процесс образования КТС для отдельных по природе порошковых заполнителей из оксидов металлов в зависимости от механической и тепловой нагрузки, а также дисперсности порошковых заполнителей и их концентрации [7].

Полученные результаты исследований отображены на графиках рисунка 1, где линия 1 соответствует CuO, линия 2 – Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, линия 3 – MgO с диаметром частиц  $\bar{d} \approx 0,15$  мм, а линии 1', 2', 3' – те же порошковые заполнители, но с диаметром частиц  $\bar{d} \approx 0,25$  мм, штриховая линия – непосредственный контакт взаимодействия поверхностей образцов [8].

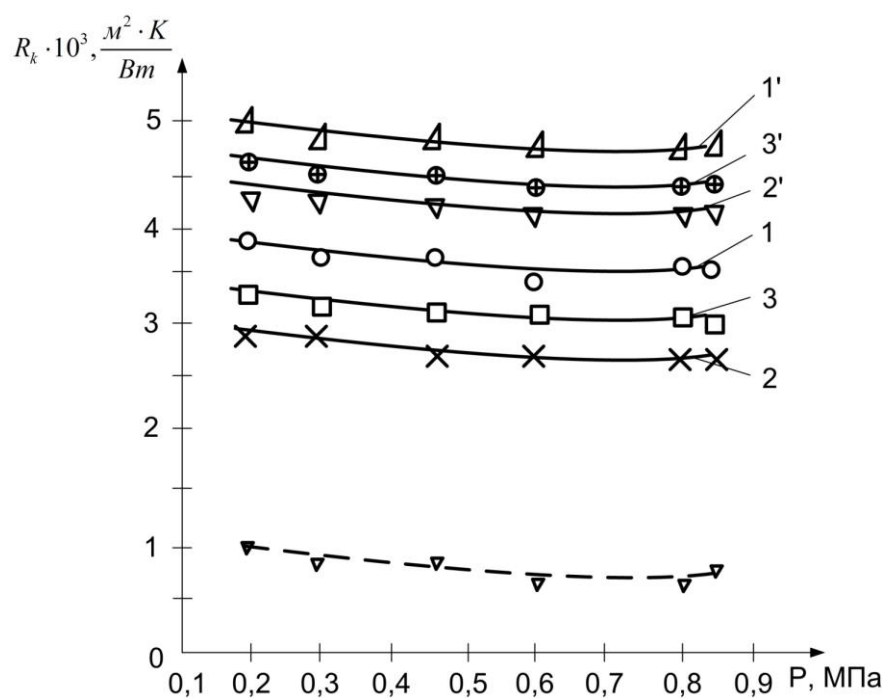


Рисунок 1 – Зависимость термического сопротивления для контактного рабочего блока из латуни от нагрузки с порошками в зоне контакта с приведенным диаметром частиц и числом 1050 частиц на 1 см<sup>2</sup>. Температура в зоне контакта  $T_k = 338$  K

Из рисунка 1 следует, что значительного увеличения КТС можно добиться, применяя сыпучие межконтактные вставки низкой теплопроводности. Контактное термосопротивление формируется исходя из влияния на нее частиц порошков (чем выше диаметр частиц, тем больше увеличивается КТС) [8]. Эффективность от использования сыпучих межконтактных вставок достигает 20–25 %. Этот эффект можно объяснить снижением площади



соприкосновения частиц порошка с поверхностью образцов, а также увеличением воздушной прослойки в зоне контакта.

Необходимо также отметить малую зависимость КТС от нагружения при наличии в зоне раздела порошков.

Определенную возможность варьировать величиной контактного термосопротивления в контакте рабочего блока можно использовать, уменьшая количество частиц порошка в межконтактной зоне. Специально проведенными экспериментальными исследованиями на контактных соединениях с порошками в количестве 300 штук на площадь в  $1 \text{ см}^2$  установлено повышение контактного термосопротивления, о чем свидетельствуют данные рисунка 2.

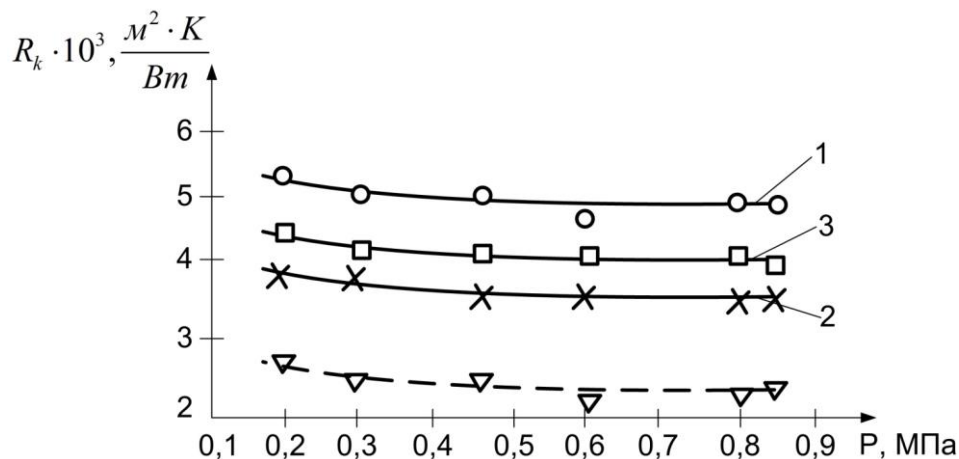


Рисунок 2 – Зависимость термического сопротивления для контактного рабочего блока из латуни от нагрузки с порошками в зоне контакта с приведенным диаметром частиц  $\bar{d} \approx 0,15 \text{ мм}$  и числом 300 частиц на  $1 \text{ см}^2$ .  
Температура в зоне контакта  $T_k = 338 \text{ К}$

На рисунке 2: линия 1 –  $\text{CuO}$ , линия 2 –  $\text{Al}_2\text{O}_3$ , линия 3 –  $\text{MgO}$  с диаметром частиц  $\bar{d} \approx 0,15 \text{ мм}$ . Штриховая линия – непосредственный контакт взаимодействия поверхностей образцов [8].

Как следует из рисунка 2, применение частиц в меньшем количестве на единицу площади контакта сопровождается ростом сопротивления контакта, что можно объяснить, во-первых, уменьшением площади фактического контакта поверхностей и, во-вторых, увеличением величины эквивалентной воздушной прослойки.

Отмеченные особенности формирования КТС в составных объектах, характерных для конструкций авиационно-космических устройств, позволят в процессе разработки рекомендовать в качестве теплоизоляционных переходов порошковые заполнители.

В процессе проведения проектных работ указанных систем могут возникнуть вопросы о влиянии сочетаний основных материалов контактной рабочей группы и материалов заполнителей. С целью регистрации данных сочетаний используется параметр согласно [9, 10], который представляется безразмерным. Данный параметр предлагается использовать в виде термосопротивлений, которые создаются в промежутках между смежными сечениями рабочей группы с межконтактной вставкой и без нее  $R_{np}/R_k$ . При расчетах также учитывается влияние расстояния промежутка между смежными сечениями рабочей группы и высоты межконтактной вставки  $\Delta/\delta$  [11], т.е.

$$K = \frac{R_{np}}{R_k} \cdot \frac{\Delta}{\delta} \quad (5)$$



Исходя из (5) все термосопротивления могут быть определены экспериментально. Расчет термосопротивлений выполняется на основании [12] с учетом микро- и макроотклонений. Измерение геометрических параметров межконтактной вставки выполняется после внесения сыпучего заполнителя между сечениями рабочей группы [11]. Высота в промежутке между смежными сечениями определяется из продольных и поперечных профилограмм, снятых с поверхности контакта [13].

Приведенные на рисунке 1 графики зависимости контактного термического сопротивления в зоне раздела от прилагаемой механической нагрузки, т.е.  $R_k = f(P)$  представлены в безразмерной форме  $K = f(P)$  на рисунке 3, где линия 1 – оксид меди, линия 2 – оксид алюминия, линия 3 – оксид магния с эквивалентным диаметром частиц  $\bar{d} \approx 0,15$  мм, а линии 1', 2', 3' – те же порошковые заполнители, но с диаметром частиц  $\bar{d} \approx 0,25$  мм.

Согласно предложенной расчетной формулы безразмерные термосопротивления физически выражают термические сопротивления соединений с порошками оксидов металлов, которые обладают в конечном итоге бесконечными термосопротивлениями на пути теплового потока. Таким образом, на основании вышеизложенного можно констатировать, что значение безразмерного параметра выше для заполнителей теплоизоляционных материалов с низкой теплопроводностью.

По данным рисунка 3 можно также сделать вывод, представляющий практический интерес, что с увеличением давления существенные изменения в эффективности порошков различных оксидов металлов снижаются.

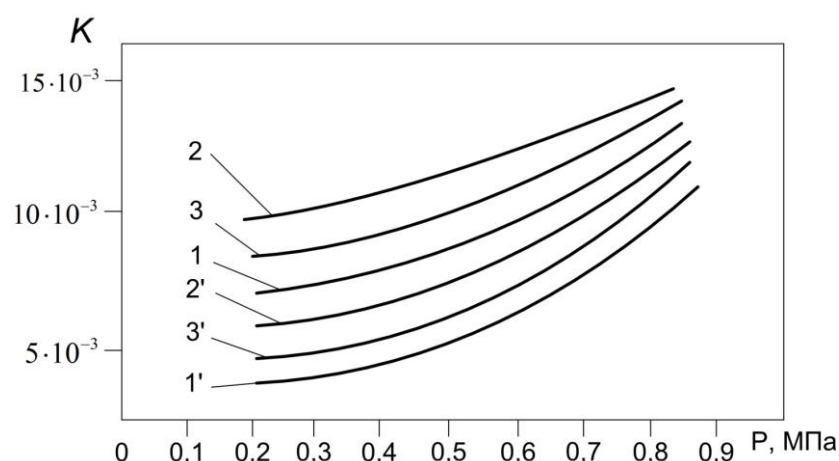


Рисунок 3 – Зависимость безразмерного термосопротивления от нагрузки при  $T_k = 338$  K для контактной рабочей группы из латуни с порошками в зоне контакта с приведенным диаметром частиц и числом 1050 частиц на  $1 \text{ см}^2$

Достаточно перспективными, в плане создания надежных теплозащитных контактных переходов, следует признать соединения клеевых композиций, которые при малом весе конструкции позволяют осуществлять функции хорошей теплозащиты.

Во многих современных конструкциях составных систем широкое применение находят клеевые соединения [14]. Это объясняется целым рядом преимуществ соединений на клеях по сравнению с такими традиционными способами крепления деталей и узлов, как сварка, пайка, клепка, болтовые соединения. Особенно широкое применение клеевые соединения получили в конструкциях авиационных и космических летательных аппаратов. Для расширения областей применения клеевых соединений, выполняющих роль теплоизоляторов, необходима информация о процессах формирования термосопротивлений, создаваемых клеевыми прослойками. Согласно ранее проведенным исследованиям [12], повысить термосопротивления



прослойки можно применением клеевых композиций с малотеплопроводными порошковыми наполнителями, особенно если они обладают способностью создавать и наполнять вокруг частиц газовый чехол. Применение данной технологии снижает вес концентрации и затормаживает процесс взаимного расположения поверхностей.

Необходимо отметить снижение разновидностей наполнителей, а также повышение экологической эффективности создаваемых систем.

В зависимости от химической природы клеевой композиции, используемые для создания клеевых соединений наполнители можно разделить на активные и пассивные. Пассивные в основном используются для снижения стоимости изделия, а активные (стекло, кварц, некоторые металлы) обладают высокой поверхностной энергией, что способствует хорошей смачиваемости поверхности наполнителя и субстрата. При этом каждая частица активного наполнителя окружена полимерным чехлом из ориентированных структурных элементов клеевой композиции. При высокой степени наполнения в клеевой композиции появляется возможность осуществлять направленное терморегулирование отдельного соединения и системы в целом в направлении повышения или снижения теплопередачи через клеевые соединения.

**Выводы.** В результате проведенных исследований можно рекомендовать применение малотеплопроводных порошков в качестве теплоизоляционных экранов в составных конструкциях авиационно-космических систем.

При использовании порошковых наполнителей малой теплопроводности с различной дисперсностью можно добиться трехкратного повышения величины контактного термосопротивления за счет уменьшения числа контактов частиц порошка с поверхностью образцов, а также за счет увеличения воздушной прослойки и использования малотеплопроводных клеев или наполнителей.

Использование безразмерного термосопротивления (комплекса) позволит проектировщикам варьировать материалами контактной пары и наполнителя для создания надежной теплозащиты в авиационно-космических системах, а высокое значение этого безразмерного комплекса характерно для наполнителей из теплоизоляционных материалов с низкой теплопроводностью.

Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ (грант № 20-08-00165).

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Авдеевский В.С. Основы теплопередачи в авиационной и ракетно-космической технике. М.: Машиностроение, 1992. 327 с.
2. Шлыков Ю.П., Ганин Е.А., Царевский С.Н. Контактное термическое сопротивление. М.: Энергия, 1997. 328 с.
3. Madhusudana C.V. Thermal Contact Conductance. Sydney: Springer, 2014. 260 p.
4. Smuda P.A., Fletcher L.S., Gyroog D.A. Heat Transfer Between Surfaces in Contact: The Effect of Low Conductance Interstitial Materials. Part 1. Experimental Verification of NASA Test Apparats CR-73122. NASA, 1967.
5. Попов В.М. Теплообмен в зоне контакта разъемных и неразъемных соединений. М.: Энергия, 1971. 216 с.
6. Карслоу Г.С., Егер Д.К. Теплопроводность твердых тел. М.: Наука, 1954. 456 с.
7. Попов В.М., Кондратенко И.Ю., Швырев А.Н. и др. К вопросу о снижении энергопотерь через теплоконтактные переходы в теплоэнергетических установках // Наука и технологии: Шаг в будущее – 2014, Чехия, 27 января – 05 февраля 2014 г.: сб. трудов X Международной научно-практической конференции / Publishing House «Education and Science». Прага, 2014. 72 с.



8. Ерин О.Л. Регулирование контактного теплообмена в теплонапряженных технических системах: автореф. дис. ... канд. техн. наук. Воронеж, 2012. 16 с.
9. Попов В.М., Ерин О.Л., Новиков А.П. и др. Теплообмен через тонкослойные прослойки в зоне контакта металлических поверхностей // Вестник Воронежского государственного технического университета. 2011. Т. 7. № 6. С. 37–39.
10. Попов В.М., Ерин О.Л., Лушникова Е.Н. Терморегулирование в зоне контакта металлических поверхностей // Современные проблемы науки и образования. 2014. № 4. [Электронный ресурс]. Режим доступа: <http://science-education.ru/ru/article/view?id=14102> (дата обращения 14.11.2020).
11. Попов В.М., Новиков А.П., Ерин О.Л. Терморегулирование теплонапряженных энергетических систем с составными элементами // Энергетика: эффективность, надежность, безопасность: материалы XVIII Всероссийской научно-технической конференции / Томский политехнический университет. Томск: Изд-во ООО «СПБ Графикс», 2012. С. 161–163.
12. Попов В.М. Теплообмен через соединения на клеях. М.: Энергия, 1974. 304 с.
13. Демкин Н.Б., Рыжов Э.В. Качество поверхности и контакт деталей машин. М.: Машиностроение, 1981. 244 с.
14. Вильнав Ж.Ж. Клеевые соединения. М.: Техносфера, 2007. 384 с.

#### REFERENCES

1. Avduevskij V.S. Osnovy teploperedachi v aviacionnoj i raketno-kosmicheskoj tehnikе. М.: Mashinostroenie, 1992. 327 p.
2. Shlykov Yu.P., Ganin E.A., Carevskij S.N. Kontaktnoe termicheskoe soprotivlenie. М.: `Energiya, 1997. 328 p.
3. Madhusudana C.V. Thermal Contact Conductance. Sydney: Springer, 2014. 260 p.
4. Smuda P.A., Fletcher L.S., Gyrog D.A. Heat Transfer Between Surfaces in Contact: The Effect of Low Conductance Interstitial Materials. Part 1. Experimental Verification of NASA Test Apparats CR-73122. NASA, 1967.
5. Popov V.M. Teploobmen v zone kontakta raz'emnyh i neraz'emnyh soedinenij. М.: `Energiya, 1971. 216 p.
6. Karslou G.S., Eger D.K. Teploprovodnost' tverdyh tel. М.: Nauka, 1954. 456 p.
7. Popov V.M., Kondratenko I.Yu., Shvyrev A.N. i dr. K voprosu o snizhenii `energopoter' cherez teplokontaktnye perehody v teplo`energeticheskikh ustanovkаh // Nauka i tehnologii: Shag v buduschee – 2014, Chehiya, 27 yanvaryа – 05 fevralya 2014 g.: sb. trudov X Mezhdunarodnoj nauchno-prakticheskoy konferencii / Publishing House «Education and Science». Praga, 2014. 72 p.
8. Erin O.L. Regulirovanie kontaktnogo teploobmena v teplonapryazhennyh tehniceskikh sistemah: avtoref. dis. ... kand. tehn. nauk. Voronezh, 2012. 16 p.
9. Popov V.M., Erin O.L., Novikov A.P. i dr. Teploobmen cherez tonkoslojnye proslojki v zone kontakta metallicheskih poverhnostej // Vestnik Voronezhskogo gosudarstvennogo tehniceskogo universiteta. 2011. Т. 7. № 6. pp. 37–39.
10. Popov V.M., Erin O.L., Lushnikova E.N. Termoregulirovanie v zone kontakta metallicheskih poverhnostej // Sovremennye problemy nauki i obrazovaniya. 2014. № 4. [Elektronnyj resurs]. Rezhim dostupa: <http://science-education.ru/ru/article/view?id=14102> (data obrascheniya 14.11.2020).
11. Popov V.M., Novikov A.P., Erin O.L. Termoregulirovanie teplonapryazhennyh `energeticheskikh sistem s sostavnymi `elementami // `Energetika: `effektivnost', nadezhnost', bezopasnost': materialy XVIII Vserossijskoj nauchno-tehniceskoy konferencii / Tomskij politehnicheskij universitet. Tomsk: Izd-vo ООО «SPB Grafiks», 2012. pp. 161–163.
12. Popov V.M. Teploobmen cherez soedineniya na kleyah. М.: `Energiya, 1974. 304 p.
13. Demkin N.B., Ryzhov `E.V. Kachestvo poverhnosti i kontakt detalej mashin. М.: Mashinostroenie, 1981. 244 p.



14. Vil'nav Zh.Zh. Kleevye soedineniya. M.: Tehnosfera, 2007. 384 p.

© Ерин О.Л., Попов В.М., Дорняк О.Р., 2020

Ерин Олег Леонидович, кандидат технических наук, старший научный сотрудник научно-исследовательского центра (проблем применения, обеспечения и управления авиацией Военно-воздушных сил), Военный учебно-научный центр Военно-воздушных сил «Военно-воздушная академия имени профессора Н.Е. Жуковского и Ю.А. Гагарина» (г. Воронеж), Россия, 394064, г. Воронеж, ул. Старых Большевиков, 54А, ol-er85@mail.ru.

Попов Виктор Михайлович, доктор технических наук, профессор, профессор кафедры электротехники, теплотехники и гидравлики, ФГБОУ ВО «Воронежский государственный лесотехнический университет имени Г.Ф. Морозова», Россия, 394087, г. Воронеж, ул. Тимирязева, 8, etgvglta@mail.ru.

Дорняк Ольга Роальдовна, доктор технических наук, доцент, заведующий кафедрой электротехники, теплотехники и гидравлики, ФГБОУ ВО «Воронежский государственный лесотехнический университет имени Г.Ф. Морозова», Россия, 394087, г. Воронеж, ул. Тимирязева, 8, etgvglta@mail.ru.