

**Анализ эффективности теплоотвода  
в тепловыделяющих устройствах  
при использовании различных термоинтерфейсов**

**С.А. Кудж, В.С. Кондратенко, В.В. Кадомкин, А.А. Высоканов**

*МИРЭА – Российский технологический университет, г. Москва,  
Россия*

*vsk1950@mail.ru*

При проектировании технических устройств актуальной задачей является обеспечение эффективного теплоотвода от тепловыделяющего устройства к теплорассеивающему с минимизацией теплового сопротивления в контактной зоне. Главная роль в решении такой задачи отводится термоинтерфейсам. В работе представлена математическая модель тепловых процессов в новом металлгибридном термоинтерфейсе. Рассмотрены основные параметры, влияющие на эффективность термоинтерфейсов. Приведены расчетные соотношения для определения значения коэффициента эффективной теплопроводности металлгибридных интерфейсов при изменении отношения толщины металлического каркаса и заполняющей термопасты. Получены расчетные и экспериментальные значения коэффициента эффективности металлгибридного термоинтерфейса и проведено их сравнение с аналогичными значениями наиболее эффективного термоинтерфейса – жидкого металла. Подтверждена перспективность применения нового класса металлгибридных интерфейсов для повышения эффективности отвода тепла. По результатам моделирования рабочих процессов в металлгибридном интерфейсе получены соотношения, которые позволяют определять значения эффективного коэффициента теплопроводности при произвольном выборе геометрических параметров, а также сравнивать его эффективность и обычного термоинтерфейса.

**Ключевые слова:** математическая модель; тепловой процесс; тепловыделяющий элемент; теплорассеивающий элемент; теплоотвод; термоинтерфейс; теплопроводность

**Для цитирования:** Кудж С.А., Кондратенко В.С., Кадомкин В.В., Высоканов А.А. Анализ эффективности теплоотвода в тепловыделяющих устройствах при использовании различных термоинтерфейсов // Изв. вузов. Электроника. 2020. Т. 25. № 4. С. 347–357. DOI: 10.24151/1561-5405-2020-25-4-347-357.

## Analysis of Efficiency of Heat Dissipation in Heat-Generating Devices Using Various Thermal Interfaces

*S.A. Kudzh, V.S. Kondratenko, V.V. Kadomkin, A.A. Visokanov*

*MIREA – Russian Technological University, Moscow, Russia*

*vsk1950@mail.ru*

**Abstract:** In designing the technical devices the actual task is provision of the effective heat emission from the heat-emitting to the thermal-scattering one with the minimization of thermal resistance in the contact area. The decisive role in solving such a problem is assigned to thermal interfaces. In the work a mathematical model of thermal processes in the new metal-hybrid thermo-interface has been presented. The main parameters affecting the efficiency of thermo-interfaces have been considered. The calculation ratios for determining the value of the effective metal-hybrid thermo-interfaces thermal conductivity coefficient while varying the thickness of metal frame and the filling thermal paste have been given. The calculation and experimental values of metal-hybrid thermo-interface efficiency coefficient have been obtained and their comparison with analog values of efficient thermo-interface of a liquid interface has been carried out. The perspective of using a new class of metal-hybrid thermo-interfaces to increase the efficiency of heat removal has been verified. Based on modeling workflow in metal-hybrid thermo-interface the ratios, allowing the determination of the values of effective thermal conductivity for any choice of geometric parameters, as well as the its effectiveness and conventional thermal interface have been obtained.

**Keywords:** mathematical model; thermal process; heat-emitting element; heat-scattering element; heat sink; thermal interface; thermal conductivity

**For citation:** Kudzh S.A., Kondratenko V.S., Kadomkin V.V., Visokanov A.A. Analysis of efficiency of heat dissipation in heat-generating devices using various thermal interfaces. *Proc. Univ. Electronics*, 2020, vol. 25, no. 4, pp. 347–357. DOI: 10.24151/1561-5405-2020-25-4-347-357.

**Введение.** При проектировании современных технических устройств возникает необходимость рассмотрения дополнительных рабочих процессов и характеризующих их параметров, применения математических моделей рабочих процессов и методов их расчетов, а также установления функциональных связей между традиционными и новыми параметрами проектируемых устройств и степени их влияния. Один из таких процессов – механизм теплопередачи в устройствах, в которых при малых габаритах выделяются достаточно большие мощности. При эксплуатации подобных устройств температура отдельных элементов может достигать критических значений, и дальнейшая работа устройств будет невозможна по причинам потери производительности, выхода рабочих характеристик за допустимые границы, выхода из строя и т.д. Обеспечение эффективного теплоотвода от тепловыделяющего элемента (ТВЭ) к теплорассеивающему элементу (ТРЭ) с минимизацией теплового сопротивления в контактной зоне

является актуальной задачей. Решающая роль здесь отводится термоинтерфейсам. Существует ряд термоинтерфейсов, отличающихся как значением коэффициента теплопроводности применяемых материалов, так и конструктивными особенностями. Наиболее распространены теплопроводящие пасты, теплопроводящие упругоэластичные прокладки и жидкие металлы.

Цель настоящей работы – определение основных параметров, влияющих на эффективность термоинтерфейсов, получение соотношений для расчета эффективности термоинтерфейсов при изменении конструктивных размеров и свойств используемых материалов.

**Металлогибридный термоинтерфейс.** С увеличением плотности тепловых потоков любые дефекты в системе отвода тепла от ТВЭ приводят к повышению температуры кристалла процессора, что служит причиной выхода процессора из строя. Рост термического сопротивления обычно связан с нарушением условия сплошности среды в объеме или на поверхности термоинтерфейса, когда в процессе соединения ТВЭ и ТРЭ через термоинтерфейс в зоне их контакта или внутри термоинтерфейса образуются воздушные полости. Часть поверхности или объема термоинтерфейса не будет функционировать в оптимальном режиме, происходит перераспределение тепловых потоков по поверхности термоинтерфейса с увеличением плотности тепловых потоков на основной площади термоинтерфейса, увеличивается перепад температур. Пространство между поверхностями ТВЭ и ТРЭ должно быть заполнено веществом с хорошими теплопроводными свойствами. Вещество должно заполнять все свободное в границах термоинтерфейса пространство, быть технологичным и долговечным. Выполнить одновременно перечисленные требования достаточно сложно.

Однако термоинтерфейсом может являться как монослой теплопроводящего материала, так и более сложные конструкционные элементы, например металлогибридный термоинтерфейс (МГТИ) [1–3]. Конструкционные особенности МГТИ (рис.1)

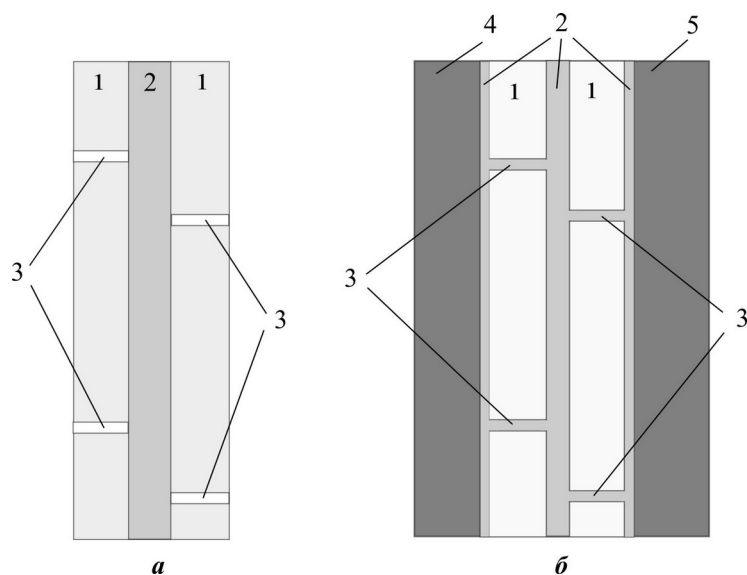


Рис.1. Эскиз металлогибридного термоинтерфейса до (а) и после (б) установки в оборудование: 1 – металлическая фольга МГТИ; 2 – термопаста в составе МГТИ; 3 – отверстия перфорации в металлической фольге; 4 – фрагмент тепловыделяющего элемента; 5 – фрагмент теплорассеивающего элемента

Fig.1. Sketch of a metal-hybrid thermal interface before installation in the equipment (a) and after installation in the equipment (b): 1 – MGTI metal foil; 2 – thermal paste as part of MGTI; 3 – perforation holes in the metal foil; 4 – a fragment of a heat-emitting element; 5 – a fragment of a heat-scattering element

имеют следующие преимущества перед конструкцией традиционных термоинтерфейсов:

- перфорированный металлический каркас обеспечивает высокую теплопроводность в поперечном направлении, что позволяет уменьшить масштаб неоднородности свойств термоинтерфейса и тепловых потоков в направлении по нормали к поверхностям ТВЭ и ТРЭ; в качестве каркаса могут использоваться фольга или тонкие пластины из металла с высокой теплопроводностью (алюминий, медь, серебро);

- наличие системы перфорации в металлической фольге позволяет уменьшить возможные размеры воздушных полостей за счет их перемещения в объеме термоинтерфейса в процессе сжатия; уменьшение размеров воздушных полостей также приводит к уменьшению масштабов неоднородности тепловых потоков в поперечном направлении и уменьшению термического сопротивления;

- использование перфорированной металлической фольги позволяет при сохранении первоначальной толщины термоинтерфейса уменьшить толщину слоя термопасты, что, в свою очередь, уменьшает тепловой перепад на термоинтерфейсе и температуру ТВЭ, так как материал каркаса имеет более высокую теплопроводность по сравнению с термопастой;

- термическое сопротивление МГТИ меньше термического сопротивления однослойного термоинтерфейса.

**Математические модели термоинтерфейсов.** В работе [4] построена математическая 3D-модель тепловых процессов и выполнены расчеты тепловых полей методом конечных элементов. В работах [5, 6] представлена математическая модель и проведены численные расчеты для стационарных тепловых процессов, протекающих в контактной зоне: ТВЭ – МГТИ – ТРЭ.

Для обеспечения отвода тепла от процессора к радиатору используют термоинтерфейсы различных типов. Основная задача термоинтерфейса – беспрепятственная передача тепла от ТВЭ к ТРЭ. Перепад температуры на термоинтерфейсе определяется выражением

$$\Delta T = \frac{\delta_{\text{ти}} q}{\lambda_{\text{ти}}}$$

или через термическое сопротивление  $R_{\text{ти}}$ :

$$\Delta T = R_{\text{ти}} q,$$

где  $\delta_{\text{ти}}$ ,  $\lambda_{\text{ти}}$ ,  $q$  – соответственно толщина слоя термоинтерфейса, коэффициент теплопроводности материала термоинтерфейса, поверхностная плотность теплового потока.

Рассмотрим МГТИ (см. рис.1), состоящий из двух слоев перфорированной фольги и термопасты, заполняющей в рабочем состоянии свободное пространство между ТВЭ, листами фольги и ТРЭ. С учетом габаритных размеров рабочие процессы в МГТИ протекают так же, как в многослойной плоской стенке. Тогда термическое сопротивление МГТИ равно:

$$R_{\text{МГТИ}} = \frac{\delta_{\text{тп1}} + \delta_{\text{тп2}} + \delta_{\text{тп3}}}{\lambda_{\text{тп}}} + \frac{\delta_{\text{м1}}}{\lambda_{\text{м1}}} + \frac{\delta_{\text{м2}}}{\lambda_{\text{м2}}}, \quad (1)$$

где  $\delta_{\text{тп1}}$ ,  $\delta_{\text{тп2}}$ ,  $\delta_{\text{тп3}}$  – соответственно толщина слоя термопасты между ТВЭ и первым листом фольги, между двумя слоями металлической фольги МГТИ и между вторым листом фольги и ТРЭ;  $\lambda_{\text{тп}}$  – коэффициент теплопроводности термопасты;  $\delta_{\text{м1}}$ ,  $\lambda_{\text{м1}}$ ,  $\delta_{\text{м2}}$ ,  $\lambda_{\text{м2}}$  – соответственно толщина и коэффициент теплопроводности первого и второго листа металлической фольги МГТИ.

Перепад температуры на МГТИ при работе ТВЭ равен:

$$\Delta T_{\text{МГТИ}} = R_{\text{МГТИ}} q,$$

или

$$\Delta T_{\text{МГТИ}} = \left( \frac{\delta_{\text{тп1}} + \delta_{\text{тп2}} + \delta_{\text{тп3}}}{\lambda_{\text{тп}}} + \frac{\delta_{\text{м1}}}{\lambda_{\text{м1}}} + \frac{\delta_{\text{м2}}}{\lambda_{\text{м2}}} \right) q.$$

На рис.2 показано распределение температуры в системе охлаждения процессора Intel Core i7 при использовании пасты Arctic Silver 5 толщиной 0,35 мм; МГТИ, состоящего из двух слоев перфорированной медной фольги толщиной 0,15 мм и трех слоев термопасты Arctic Silver 5 общей толщиной 0,05 мм; МГТИ, состоящего из двух слоев перфорированной алюминиевой фольги толщиной 0,15 мм и трех слоев термопасты Arctic Silver 5 общей толщиной 0,05 мм. Процессор имеет площадь контактной поверхности 0,00141 м<sup>2</sup>, мощность порядка 165 Вт, и в нем достигается поверхностная плотность теплового потока 117 000 Вт/м<sup>2</sup>. Экспериментальные и расчетные значения температуры при использовании МГТИ совпадают с точностью 0,1 °С (таблица).

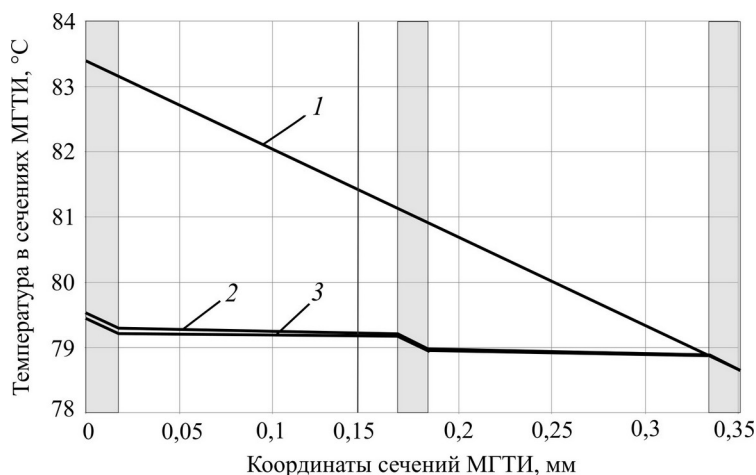


Рис.2. Распределение температуры в системе охлаждения процессора Intel Core i7 при одинаковой толщине теплопроводящего слоя: 1 – термопаста Arctic Silver 5; 2 – МГТИ с каркасом из алюминия и термопастой Arctic Silver 5; 3 – МГТИ с каркасом из меди и термопастой Arctic Silver 5 (1)

Fig.2. Comparison of the temperature distribution in the Intel Core i7 processor cooling system with the same thickness of the heat-conducting layer: 1 – Arctic Silver 5 thermal paste; 2 – MGTI with an aluminum frame and Arctic Silver 5 thermal paste; 3 – MGTI with a copper frame and Arctic Silver 5 thermal paste (1)

#### Расчетные и экспериментальные значения температуры при использовании МГТИ

#### Calculated and experimental temperature values when using metal-hybrid thermal interface

Параметр	Эксперимент	Расчет
Температура процессора, °С	79,5	79,4
Температура радиатора в зоне контакта с МГТИ, °С	78,7	78,7
Перепад температуры на МГТИ, °С	0,8	0,7

Для определения эффективности сравним перепад температуры на термоинтерфейсе обычной конструкции  $\Delta T_{\text{ти}}$  и на МГТИ  $\Delta T_{\text{МГТИ}}$  при одинаковом значении толщины интерфейса  $\delta_{\text{МГТИ}} = \delta_{\text{ти1}} + \delta_{\text{ти2}} + \delta_{\text{ти3}} + \delta_{\text{м1}} + \delta_{\text{м2}} = \delta_{\text{ти}}$ :

$$\Delta T_{\text{ти}} = \frac{\delta_{\text{ти}}}{\lambda_{\text{ти}}} q,$$

$$\Delta T_{\text{МГТИ}} = \left( \frac{\delta_{\text{ти1}} + \delta_{\text{ти2}} + \delta_{\text{ти3}}}{\lambda_{\text{ти}}} + \frac{\delta_{\text{м1}}}{\lambda_{\text{м1}}} + \frac{\delta_{\text{м2}}}{\lambda_{\text{м2}}} \right) q.$$

При практическом использовании МГТИ распределение термопасты между отдельными слоями определяется разными факторами и является случайным процессом с некоторыми средними значениями и дисперсией. На рис.3 представлены данные расчетов для МГТИ с различным распределением термопасты Arctic Silver 5 между отдельными слоями при сохранении суммарной толщины термопасты в МГТИ. Графики показывают, что при увеличении толщины одного слоя термопасты увеличивается перепад температур на данном слое. При этом толщины других слоев уменьшаются, что приводит к уменьшению перепада температуры на этих слоях и сохранению неизменными значений температуры на внешних границах МГТИ. Таким образом, реализуется условие стабильности (сохранения) режимов работы ТРЭ и ТРЭ при случайных законах распределения термопасты между отдельными слоями МГТИ.

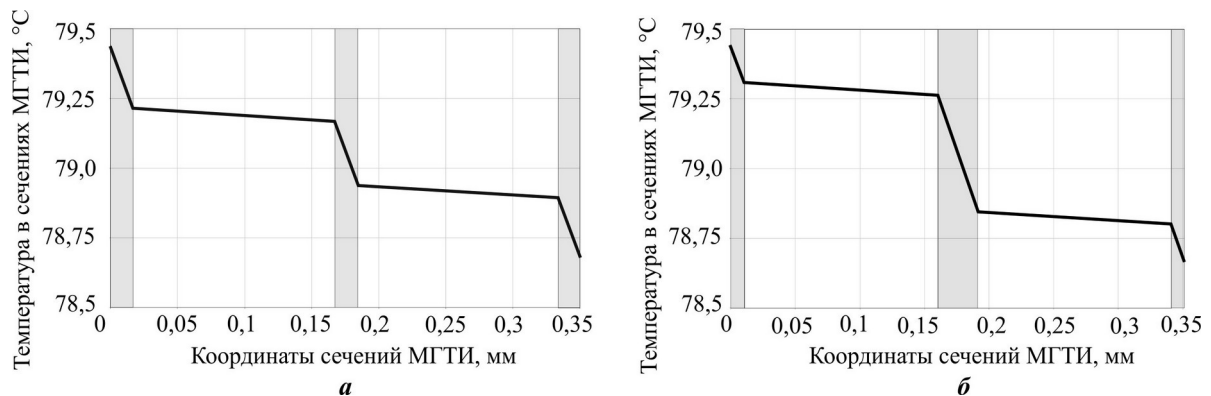


Рис.3. Распределение температуры в МГТИ толщиной 0,35 мм с медной фольгой толщиной 0,15 мм при равных (а) и разных (б) толщинах слоев термопасты Arctic Silver

Fig.3. Temperature distribution in MGTI 0.35 mm thick with 0.15 mm thick copper foil and equal (a) and different thicknesses (b) layers of Arctic Silver thermal paste

При использовании перфорации необходимы корректировка значений и замена коэффициента теплопроводности материала фольги на оценку среднего значения коэффициента теплопроводности металлической фольги в направлении теплового потока. Если обозначить отношение площади отверстий перфорации к площади листа фольги параметром  $k_{\text{прф}}$ , то нижней оценкой коэффициента эффективной теплопроводности материала фольги будет величина

$$\lambda_{\text{м.эфф}} = (1 - k_{\text{прф}}) \lambda_{\text{м}}$$

при исходном значении теплопроводности материала  $\lambda_{\text{м}}$ . Такая оценка получена при условии пренебрежения вкладом в теплопередачу вещества, заполняющего полости перфорации металлической фольги после формирования МГТИ.



В математическую модель рабочих процессов в систему охлаждения ТВЭ следует включить и рабочие процессы в ТРЭ, к которым относятся теплопередача в материале ТРЭ и теплообмен с внешней средой и поступающим в ТРЭ внешним хладагентом и т.д.

При стационарном режиме работы ТВЭ для определения температуры теплоотводящего устройства (радиатора) в зоне его контакта с МГТИ можно использовать соотношение

$$T_{\text{ТРЭ}} = T_{\text{н}} + \frac{q}{\alpha_{\text{эфф}}},$$

где  $T_{\text{н}}$  – наружная температура, или температура охлаждающей среды;  $\alpha_{\text{эфф}}$  – эффективный коэффициент теплоотдачи теплоотводящего устройства, приведенный к выходному сечению МГТИ.

Более точная модель тепловых процессов ТРЭ должна включать в себя как теплообменные процессы с внешним хладагентом, так и распределение температуры в ТРЭ в пространстве между поверхностью контакта ТВЭ с МГТИ площадью  $F_{\text{МГТИ}}$  и охлаждаемой поверхностью площадью  $F_{\text{охл}}$ .

Плотность тепловых потоков при внешнем охлаждении ТРЭ определяется уравнением вида

$$q_{\text{охл}} = \alpha_{\text{охл}} (T_{\text{охл.ср}} - T_{\text{н}}),$$

где  $\alpha_{\text{охл}}$  – коэффициент теплоотдачи ТРЭ;  $T_{\text{охл.ср}}$  – среднее значение температуры на охлаждаемой поверхности ТРЭ.

Процессы теплопередачи в 3D-моделях ТРЭ имеют достаточно сложный вид, так как в ТРЭ изменяются и значения, и направления тепловых потоков, а также площади поперечных сечений в направлении распространения тепловых потоков. Площади увеличиваются от значения площади МГТИ  $F_{\text{МГТИ}}$  до значения площади охлаждаемой поверхности  $F_{\text{охл}}$ . Если выполнить замену пространственных тепловых процессы в ТРЭ на эквивалентные тепловые процессы в прямой призме, площадь основания которой равна площади МГТИ  $F_{\text{МГТИ}}$ , а высота равна  $\delta_{\text{ТРЭ}}$ , то температура  $T_{\text{охл.ср}}$  определяется соотношением вида

$$T_{\text{охл.ср}} = T_{\text{ТРЭ}} - \frac{\delta_{\text{ТРЭ}}}{\lambda_{\text{ТРЭ}}} q.$$

Численное значение высоты  $\delta_{\text{ТРЭ}}$  позволяет характеризовать эффективность процессов теплопередачи в материалах конструкции ТРЭ, оценивать обоснованность выбора геометрических размеров и их соотношений в конструкции.

Данная модель приемлема для воздушного, жидкостного и жидкокапельного охлаждения. Численные значения параметров теплоотдачи могут быть определены экспериментально или методами численного моделирования термогазодинамических процессов [7], а распределения температуры в ТРЭ – методами численного моделирования 3D-задач теплопроводности [8].

Температура ТВЭ на поверхности контакта с МГТИ определяется при известной температуре охлаждающей среды  $T_{\text{н}}$  уравнением вида

$$\Delta T_{\text{МГТИ}} = T_{\text{н}} + \left( \frac{\delta_{\text{ТРЭ}}}{\lambda_{\text{ТРЭ}}} + \frac{F_{\text{МГТИ}}}{F_{\text{охл}} \alpha_{\text{охл}}} \right) q + \left( \frac{\delta_{\text{тп1}} + \delta_{\text{тп2}} + \delta_{\text{тп3}}}{\lambda_{\text{тп}}} + \frac{\delta_{\text{м1}}}{\lambda_{\text{м1}}} + \frac{\delta_{\text{м2}}}{\lambda_{\text{м2}}} \right) q.$$

Нижнее значение внешней температуры поверхности ТРЭ дополнительно ограничено условиями возможности конденсации влаги из окружающей среды при снижении температуры поверхности ТРЭ ниже точки росы, что налагает ограничение на минимальное значение температуры охлаждающей среды. Верхнее значение внешней температуры поверхности ТРЭ ограничено условиями работы ТВЭ при максимально возможных значениях температуры, что налагает ограничение на максимальное значение температуры охлаждающей среды.

Эффективность конкретных реализаций МГТИ можно оценить путем введения коэффициента эффективной теплопроводности МГТИ, численное значение которого определяется как отношение толщины термоинтерфейса к термическому сопротивлению МГТИ:

$$\lambda_{\text{эфф}} = \frac{\delta_{\text{МГТИ}}}{(\delta_{\text{тп1}} + \delta_{\text{тп2}} + \delta_{\text{тп3}})/\lambda_{\text{тп}} + \delta_{\text{м1}}/\lambda_{\text{м1}} + \delta_{\text{м2}}/\lambda_{\text{м2}}},$$

где  $\delta_{\text{МГТИ}} = \delta_{\text{тп1}} + \delta_{\text{тп2}} + \delta_{\text{тп3}} + \delta_{\text{м1}} + \delta_{\text{м2}}$ , и коэффициента эффективности МГТИ, который определяется как отношение термического сопротивления обычного термоинтерфейса к термическому сопротивлению МГТИ:

$$K_{\text{эфф}} = \frac{R_{\text{ти}}}{R_{\text{МГТИ}}} = \frac{\delta_{\text{МГТИ}}/\lambda_{\text{тп}}}{(\delta_{\text{тп1}} + \delta_{\text{тп2}} + \delta_{\text{тп3}})/\lambda_{\text{тп}} + \delta_{\text{м1}}/\lambda_{\text{м1}} + \delta_{\text{м2}}/\lambda_{\text{м2}}}.$$

Коэффициент эффективности позволяет определить, во сколько раз уменьшится перепад температуры при использовании МГТИ при одинаковой толщине термоинтерфейсов:

$$K_{\text{эфф}} = \frac{\Delta T_{\text{ти}}/q}{\Delta T_{\text{МГТИ}}/q} = \frac{\Delta T_{\text{ти}}}{\Delta T_{\text{МГТИ}}} = \frac{\lambda_{\text{эфф}}}{\lambda_{\text{тп}}}.$$

На рис.4 приведена зависимость коэффициента эффективной теплопроводности МГТИ от отношения суммарных толщин металлической фольги и термопасты в термоинтерфейсе

$$l = (\delta_{\text{м1}} + \delta_{\text{м2}}) / (\delta_{\text{тп1}} + \delta_{\text{тп2}} + \delta_{\text{тп3}}).$$

В качестве термопасты МГТИ в расчетах используются данные для термопасты Arctic Silver 5 с коэффициентом теплопроводности 8,7 Вт/(м·К) [9]. Расчеты выполнялись для двух вариантов МГТИ: с двумя слоями медной фольги с коэффициентом теплопроводности 397 Вт/(м·К); с двумя слоями алюминиевой фольги с коэффициентом теплопроводности 220 Вт/(м·К). Прямоугольный сегмент 3 на рис.4 – экспериментальные значения коэффициента эффективной теплопроводности для жидкого металла Col-laborator Liquid Pro. Сравнение МГТИ с термоинтерфейсом с жидким металлом выполнено исходя из следующих соображений: так как  $K_{\text{эфф}} = \lambda_{\text{эфф}}/\lambda_{\text{тп}}$ , зависимости коэффициента эффективности МГТИ повторяют зависимость коэффициента эффективной теплопроводности МГТИ (см. рис.4), а численные значения коэффициента эффективности МГТИ изменяются в диапазоне от 2 до 9 для термопасты Arctic Silver 5. Для термоинтерфейсов, представленных на рис.2, коэффициент эффективности равен 6 для МГТИ с металлокаркасом из медной фольги и 5,5 для МГТИ с металлокаркасом из алюминиевой фольги.



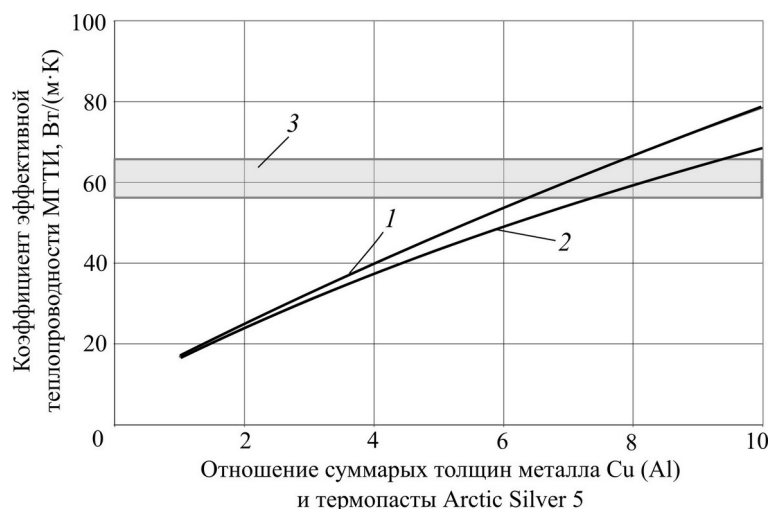


Рис. 4. Зависимость коэффициента эффективной теплопроводности МГТИ от относительной толщины металлического каркаса и термопасты: 1 – каркас из меди; 2 – каркас из алюминия; 3 – экспериментальные значения коэффициента эффективной теплопроводности для жидкого металла Collaborator Liquid Pro

Fig. 4. Dependence of the effective thermal conductivity coefficient of MGTI on the relative thickness of the metal frame and thermal paste: 1 – copper frame; 2 – aluminum frame; 3 – experimental values of the effective thermal conductivity for liquid metal Collaborator Liquid Pro

На сегодняшний день жидкий металл можно назвать самым эффективным среди всех термоинтерфейсов [10] в силу того, что его теплопроводность практически на порядок выше других известных теплопроводящих паст и прокладок. Кроме того, жидкий металл является негорючим и нетоксичным веществом. Несмотря на свои явные преимущества перед термопастами и теплопроводящими прокладками, жидкий металл имеет следующие недостатки: трудно наносится, поэтому требуется высокая квалификация обслуживающего персонала; нельзя наносить на алюминиевую поверхность из-за возможной коррозии; трудно удаляется с поверхности; имеет высокую стоимость по сравнению со стоимостью термопасты; не обеспечивает полного контакта между процессором и радиатором из-за образующихся в процессе нанесения воздушных полостей.

Для практических расчетов при проектировании систем охлаждения по результатам численных расчетов получены следующие аппроксимирующие зависимости для МГТИ типа медь – термопаста Arctic Silver 5:

- для коэффициента эффективной теплопроводности МГТИ, Вт/(м·К):

$$\lambda_{\text{Cu-Ar}} = 0,002618l^3 - 0,17678l^2 + 8,484138l + 0,002618;$$

- для коэффициента эффективности МГТИ (безразмерный):

$$K_{\text{Cu-Ar}} = 0,0030l^3 - 0,02032l^2 + 0,975188l + 1,002204.$$

Также получены зависимости для МГТИ типа алюминий – термопаста Arctic Silver 5:

- для коэффициента эффективной теплопроводности МГТИ, Вт/(м·К):

$$\lambda_{\text{Al-Ar}} = 0,006113l^3 - 0,288009l^2 + 8,249651l + 8,779356;$$

- для коэффициента эффективности МГТИ (безразмерный):

$$K_{\text{Al-Ar}} = 0,000703l^3 - 0,033105l^2 + 0,94823l + 1,009121.$$

Аппроксимирующие зависимости получены с максимальной относительной погрешностью не более 0,015 % для МГТИ типа медь – термопаста Arctic Silver 5 и максимальной относительной погрешностью не более 0,06 % для МГТИ типа алюминий – термопаста Arctic Silver 5. Данные зависимости позволяют после выбора толщины и материала фольги, а также толщины и материала термопасты определить коэффициент эффективной теплопроводности МГТИ и его термическое сопротивление МГТИ, найти перепад температуры на МГТИ при известном значении выделяемой ТВЭ тепловой мощности и площади МГТИ.

**Заключение.** Представленные в работе расчетные и экспериментальные данные подтверждают перспективность применения нового класса МГТИ для повышения эффективности отвода тепла. Полученные в результате моделирования соотношения позволяют определить тепловые режимы ТВЭ с МГТИ при произвольном выборе геометрических параметров МГТИ, что дает возможность создавать недорогие высокоэффективные термоинтерфейсы, легко встраиваемые в элементы электронной компонентной базы.

Корректность выполненных расчетов подтверждается тем, что экспериментальные и расчетные данные для температуры на термоинтерфейсе совпадают с точностью 0,1 °С.

### Литература

1. **Сакуненко Ю.И., Кондратенко В.С.** Устройство отвода тепла от тепловыделяющих элементов / Патент РФ № 2602805.2016. Бюл. № 32.
2. **Кондратенко В.С., Сакуненко Ю.И., Высоканов А.А.** Металлогибридные термоинтерфейсы с высокой теплопроводностью // Прикладная физика. 2017. №1. С. 85–89.
3. **Кондратенко В.С., Высоканов А.А., Сакуненко Ю.И.** Металлогибридные термоинтерфейсы для отвода тепла от тепловыделяющих элементов // Приборы. 2018. №4(214). С. 46–50.
4. Разработка металлогибридного термоинтерфейса: экспериментальное исследование и математическое моделирование / **В.С. Кондратенко, А.А. Высоканов, Ю.И. Сакуненко и др.** // Успехи прикладной физики. 2018. Т. 6. № 2. С. 166–173.
5. Моделирование тепловых процессов в тепловыделяющих элементах с применением металлогибридных термоинтерфейсов/ **В.С. Кондратенко, В.В. Кадомкин, А.А. Высоканов и др.** // Оборонный комплекс – научно-техническому прогрессу России. 2018. № 3 (139). С. 10–15.
6. **Kondratenko V.S., Kadomkin V.V., Vysokanov A.A., Kondratenko E.V.** Innovative metalhybrid thermal interface // Economic Management Information Technology. 2019. Vol. 5. No. 3. P. 61–67.
7. Основы теплопередачи в авиационной и ракетно-космической технике / **В.С. Авдеевский, Б.М. Галицкий, Г.А. Глебов и др.** / под общ. ред. В.С. Авдеевского, В.К. Кошкина. Изд. 2-е, перераб. и доп. М.: Машиностроение, 1992. 528 с.
8. **Щеляев А.Е., Маркова Т.В.** Моделирование тепловых режимов радиоэлектронной аппаратуры // Радиоэлектронные технологии. 2017. № 5(15). С. 83–86.
9. Arctic Silver Incorporated-Arctic Silver. URL: <http://www.arcticsilver.com/as5.htm> (дата обращения: 30.01.2017).
10. Coollaboratory Liquid Pro-Coollaboratory. URL: <http://www.coollaboratory.com/product/coollaboratory-liquid-pro> (дата обращения: 30.01.2017).

Поступила в редакцию 23.12.2019 г.; после доработки 10.01.2020 г.; принята к публикации 16.06.2020 г.

**Кудж Станислав Алексеевич** – доктор технических наук, ректор МИРЭА – Российский технологический университет (119454, Россия, г. Москва, пр-т Вернадского, 78), [rector@mirea.ru](mailto:rector@mirea.ru)

**Кондратенко Владимир Степанович** – доктор технических наук, профессор, советник ректората, заведующий кафедрой оптических и биотехнических систем и технологий Физико-технологического института МИРЭА – Российский технологический университет (119454, Россия, г. Москва, пр-т Вернадского, 78), [vsk1950@mail.ru](mailto:vsk1950@mail.ru)

**Кадошкин Виктор Викторович** – кандидат технических наук, доцент кафедры защиты информации Института комплексной безопасности и специального приборостроения МИРЭА – Российский технологический университет (119454, Россия, г. Москва, пр-т Вернадского, 78), vvkadomkin@yandex.ru

**Высоканов Андрей Александрович** – аспирант кафедры оптических и биотехнических систем и технологий МИРЭА – Российский технологический университет (119454, Россия, г. Москва, пр-т Вернадского, 78), maestro\_777@mail.ru

### References

1. Sakunenko Y.I., Kondratenko V.S. *The device of heat removal from fuel elements*. RF Patent No. 2602805.2016. (in Russian).
2. Kondratenko V.S., Sakunenko Y.I., Vysokanov A.A. The metal hydride thermal interface materials with high thermal conductivity. *Prikladnaya fizika = Applied Physics*, 2017, no. 1, pp. 85–89. (in Russian).
3. Kondratenko V.S., Vysokanov A.A., Sakunenko Y. I. The metal hydride thermal interface materials for heat removal from fuel elements. *Pribory = Devices*, 2018, no. 4(214), pp. 46–50. (in Russian).
4. Kondratenko V.S., Vysokanov A.A., Sakunenko Y. I., Tretyakova O.N., Molotkov A.A., Tikmenov V.N. Development of a metal-hybrid thermal interface: experimental research and mathematical modeling. *Uspekhi prikladnoy fiziki = Successes of Applied Physics*, 2018, vol. 6, no. 2, pp. 166–173. (in Russian).
5. Kondratenko V.S., Kadomkin V.V., Vysokanov A.A., Sakunenko Y.I., Sleptsov M.A., Lysenko O.G. Modeling of thermal processes in fuel elements using metal – hybrid thermal interfaces. *Oboronnyj kompleks – nauchno-tekhnicheskomu progressu = Defense complex-scientific and technical progress of Russia*, 2018, no. 3 (139), pp. 10–15. (in Russian).
6. Kondratenko V.S., Kadomkin V.V., Vysokanov A.A., Kondratenko E.V. Innovative metalhybrid thermal interface. *Economic Management Information Technology (EMIT)*, 2019, vol.5, no.3, pp. 61–67.
7. Avduevskii V.S., Galitseisky B.M., Glebov G.A. et al. *Fundamentals of heat transfer in aviation and rocket and space technology*. Under the General editorship of V.S. Avduevskii, V.K. Koshkin. Moscow, Mechanical engineering Publ., 1992. 528 p. (in Russian).
8. Shelaev A.E., Markova T.V. Modeling of thermal modes of electronic equipment. *Radio-Electronic Technologies*, 2017, no. 5(15), pp. 83–86. (in Russian).
9. *Arctic Silver Incorporated – Arctic Silver*. Available at: <http://www.arcticsilver.com/as5.htm> (accessed: 30.01.2017).
10. *Coollaboratory Liquid Pro – Coollaboratory*. Available at: <http://www.coollaboratory.com/product/coollaboratory-liquid-pro> (accessed: 30.01.2017).

Received 23.12.2019; Revised 10.01.2020; Accepted 16.06.2020.

### Information about the authors:

**Stanislav A. Kudzh** – Dr. Sci. (Eng.), Rector, MIREA – Russian Technological University (Russia, 119454, Moscow, Vernadsky pr., 78), rector@mirea.ru

**Vladimir S. Kondratenko** – Dr. Sci. (Eng.), Professor, Rector's Adviser, Head of the Optical and Biotechnical Systems and Technologies Department, Institute of Physics and Technology, MIREA – Russian Technological University (Russia, 119454, Moscow, Vernadsky pr., 78), vsk1950@mail.ru

**Viktor V. Kadomin** – Ph. Sci. (Eng.), Assoc. Prof. of the Information Security Department, Institute of Comprehensive Security, MIREA – Russian Technological University (Russia, 119454, Moscow, Vernadsky pr., 78), vvkadomkin@yandex.ru

**Andrey A. Vysokanov** – PhD Student of the Optical and Biotechnical Systems and Technologies Department, Institute of Physics and Technology, MIREA – Russian Technological University (Russia, 119454, Moscow, Vernadsky pr., 78), maestro\_777@mail.ru