

Системы охлаждения электронных устройств на основе оребренных тепловых труб

И.А. ПОПОВ,
д-р техн. наук,
А.В. ЩЕЛЧКОВ,
канд. техн. наук,
Ю.Ф. ГОРТЫШОВ,
д-р техн. наук,
Н.Т.А. АЛЬ-ХАРБАВИ,
магистр
(КНИТУ-КАИ, Казань)
lexa_kzn@mail.ru

Представлены результаты экспериментального исследования систем охлаждения на основе оребренных тепловых труб при нанесении на ребра систем сферических выемок/выступов. Показана возможность снижения общего термического сопротивления систем охлаждения на 20–40 % во всем диапазоне исследованных тепловых нагрузок. Даны рекомендации по рациональному нанесению интенсификаторов теплообмена.

Сферические выступы/выемки, интенсификация теплоотдачи, тепловые трубы, системы охлаждения, термическое сопротивление

Современная тенденция развития микроэлектронной техники – это увеличение удельных тепловых потоков в системах охлаждения чипов. Надежность и безопасность работы электронного оборудования зависит от эффективности их систем охлаждения. Первый шаг для выбора типа системы охлаждения при проектировании – определение уровня теплоотдачи, необходимого для отвода заданного теплового потока (тепловыделения) электронного компонента, и максимальной допустимой температуры устройства. Второй шаг – соблюдение требований по весогабаритным характеристикам. Системы охлаждения должны вписываться в габариты электронного оборудования и не приводить к резкому увеличению веса. Третий шаг – обеспечение бесперебойной и надежной работы электронных устройств в течение больших промежутков времени.

Тип системы охлаждения электронных устройств и его надежность эксплуатации обычно определяется уровнем коэффициента теплоотдачи и максимальной допустимой температуры устройства. Эти два параметра помогают определить метод охлаждения. Классификация применяемых в настоящее время систем охлаждения электронных устройств рассмотрена в работе [1].

Наиболее простыми и экономичными системами охлаждения являются воздушные естественно-конвективные (пассивные) и принудительные (активные) системы охлаждения. Они разрабатываются на основе оребрения и тепловых труб, позволяющих увеличивать поверхности теплообмена [2], однако необходим поиск эффективных конструктивных решений для уменьшения габаритов данных систем. Задача может быть решена с использованием интенсификации теплообмена на оребренных поверхностях.

Цель данной работы – исследование возможности интенсификации теплоотдачи на поверхности ребер системы охлаждения на основе тепловых труб с целью увеличения количества отводимого тепла с заданной поверхности системы охлаждения.

Одним из эффективных методов интенсификации теплообмена является нанесение рельефа из сферических выступов и выемок. Данный способ позволяет повысить коэффициент теплоотдачи в 2,5 раза, по сравнению с исходно гладкой поверхностью, в зависимости от геометрии выемок/выступов [1–7].

Данная статья является продолжением работ [8–10] и расширяет диапазон исследований по режимным параметрам.

Для проведения испытаний активной системы охлаждения электронных устройств (вынужденная конвекция охлаждающего воздуха) на основе оребренных тепловых труб используется экспериментальная установка, состоящая из системы подачи воздуха, рабочего участка (объекта исследований) и системы измерений (рис. 1). Систему подачи воздуха составляют последовательно установленные воздухозаборное устройство 11, кондиционер воздушного потока 6, расходомер 5, вентиль 4 и ресивер 3, в котором установлен компрессор 2. Система работает на всасывание. Компрессор оснащен частотно-регулируемым приводом для плавного изменения производительности. Вентиль служит для регулирования расхода воздуха. Объектом исследования 1 является система охлаждения на основе оребренных труб с электронагревателем 15, установленным в воздухозаборном устройстве с проходным сечением 0,17×0,38 м и длиной 0,6 м. Регулирование мощности электронагревателя, запитанного от электрической сети 220 В, проводится лабораторным автотрансформатором 14.

Система измерений на установке включает хромель-копелевые термопары 8, установленные на концах ребер системы охлаждения и на рабочей поверхности электронагревателя; термопару 7 для измерения температуры воздуха перед расходомером 5; амперметр 13 и вольтметр 12 для контроля мощности

нагрева; лабораторный термометр для измерения температуры воздуха на входе в воздухозаборник. Показания всех термопар выводятся на милливольтметр 10 через переключатель входов 9. На рис. 2 показан внешний вид экспериментальной установки и систем охлаждения при испытаниях в условиях вынужденного (а) и свободноконвективного (б) движения воздуха.

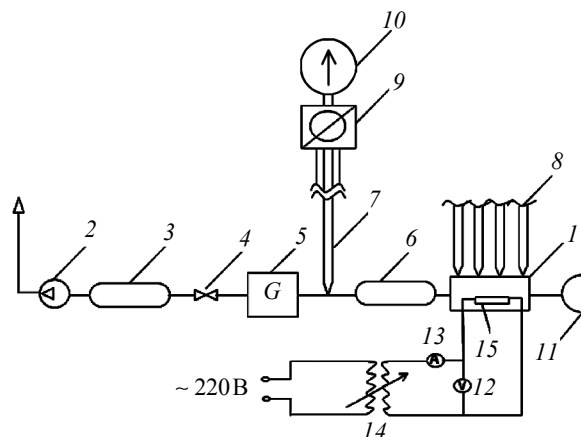


Рис. 1

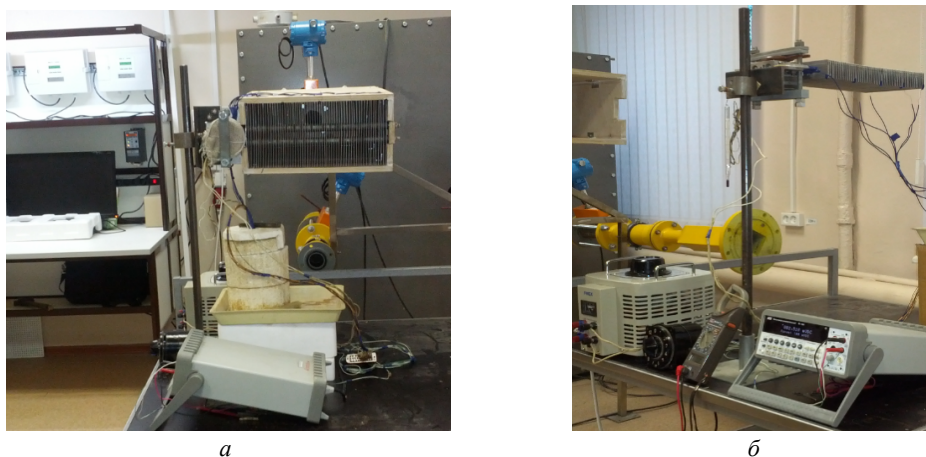


Рис. 2

Система охлаждения представляет собой устройство на основе тепловых труб, концы которых запрессовываются в массивное основание. На рис. 3 представлена система охлаждения с оребрением тепловых труб: а – внешний вид в сборе с нагревательным элементом; б – 3D-модель. Во всех системах охлаждения использовались медные тепловые трубы. В качестве фитиля использовались капиллярно-пористые покрытия из спеченного медного порошка с диаметром частиц $(0,1-0,2) \cdot 10^{-3}$ м. Объем воды в тепловых трубах составлял 5–7 г. В зоне конденсации тепловых труб использовалось внешнее гладкое алюминиевое оребрение (вариант К) (рис. 4, а) и оребрение с системами полусферических выемок/выступов (наносились штамповкой на листовый металл) с плотностью расположения 25 % (вариант В1) (рис. 4, б), 50 % (вариант В2) (рис. 4, в), 75 % (вариант В3) (рис. 4, г). Система охлаждения обеспечивает отвод тепловой мощности 200–400 Вт и имеет следующие параметры: габаритные размеры $0,17 \times 0,042 \times 0,38$ м; диаметр тепловых труб 0,014 м; толщина стенок тепловых труб – 0,001 м; размеры ребер – $0,17 \times 0,042$ м; число ребер – 60 шт.; шаг оребрения – 0,0054 м. Температура нагревателя поддерживалась на уровне 52–60 °С.

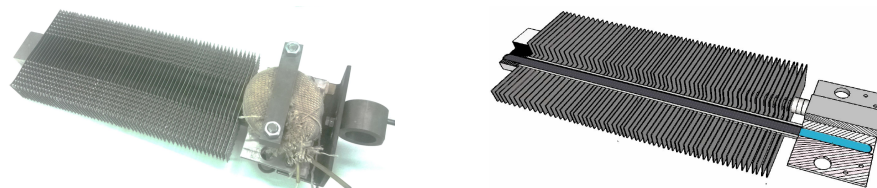


Рис. 3

Исследования проводились при свободно конвективном и вынужденном обтекании оребренных труб потоком воздуха. В ходе эксперимента измерялись: тепловая мощность электронагревателя, температура на нагревателе, температура на основании тепловых труб около нагревателя, температура на концах пяти характерных ребер, температура воздуха, натекающего на оребренные тепловые трубы (рис. 5). Тепловой поток от нагревателя практически полностью направлялся к основанию тепловых труб за счет эффективной тепловой изоляции.

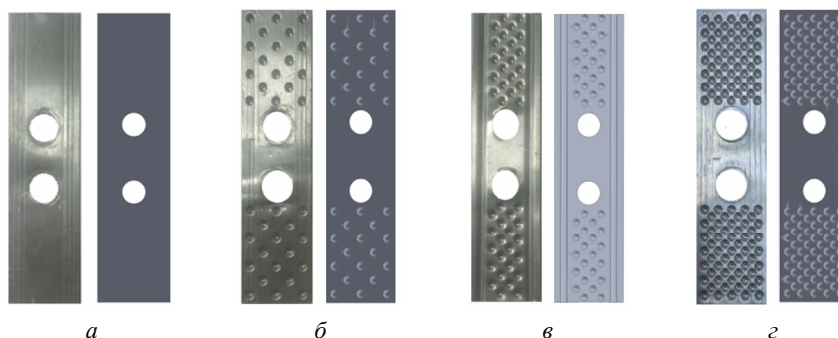


Рис. 4

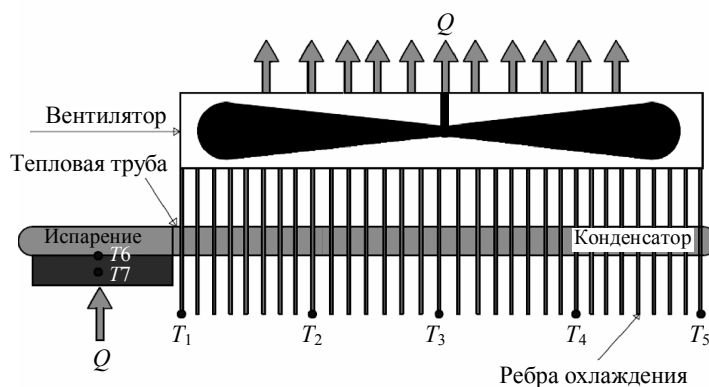


Рис. 5

По измеренным температурам и тепловому потоку определялись термические сопротивления (рис. 6):
 - всей системы охлаждения (отношение разности температур основания тепловых труб и натекающего воздуха к тепловому потоку):

$$R_t = R_{\text{ртт}} + R_a + R_{\text{конт}};$$

- системы основание – тепловая труба – ребра (отношение разности температур основания тепловых труб $T_{\text{тт}}$ и средней температуры на концах ребер $T_{\text{р'}}$ к тепловому потоку):

$$R_{\text{ртт}} = R_{\text{р}} + R_{\text{тт}},$$

где $R_{\text{р}}$ – термическое сопротивление ребер; $R_{\text{тт}}$ – термическое сопротивление тепловых труб);

- контакта нагревателя и основания тепловых труб $R_{\text{конт}}$ (отношение температуры нагревателя и температуры основания тепловых труб к тепловому потоку).

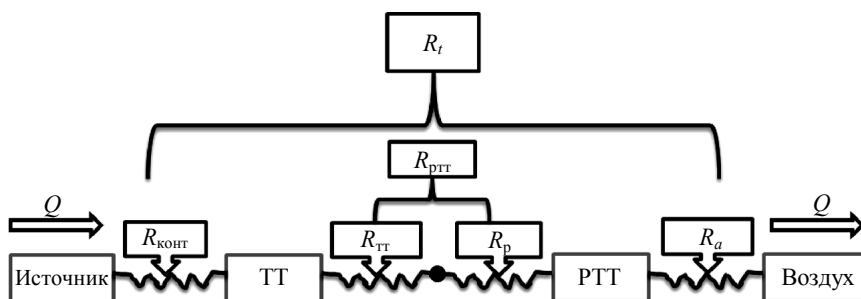


Рис. 6

Также рассчитывалось среднее «эффективное» сопротивление теплоотдачи на ребрах R_α (отношение разности средней температуры на концах ребер T_p' и температуры натекающего потока воздуха $T_{\text{воз}}$ к тепловому потоку).

Исследования эффективности систем охлаждения на основе оребрения тепловых труб проводились при свободной конвекции воздуха (пассивное охлаждение). Эффективность оценивалась по полному термическому сопротивлению $R_t = R_{\text{ртт}} + R_\alpha + R_{\text{конт}}$. В ходе исследования была проведена оценка и каждой из указанных составляющих термического сопротивления.

Результаты исследования тепловой эффективности систем охлаждения на основе оребренных тепловых труб при свободной конвекции представлены на рис. 7.

Стоит отметить, что практически все исследуемые системы имеют одинаковую тепловую эффективность. Нанесение выемок/выступов практически не оказывает влияния на термическое сопротивление системы основание – тепловая труба – ребра (рис. 7, а), теплоотдачу ребер (рис. 7, б), нагревателя и основания тепловых труб (рис. 7, в) и общее термическое сопротивление системы охлаждения (рис. 7, г).

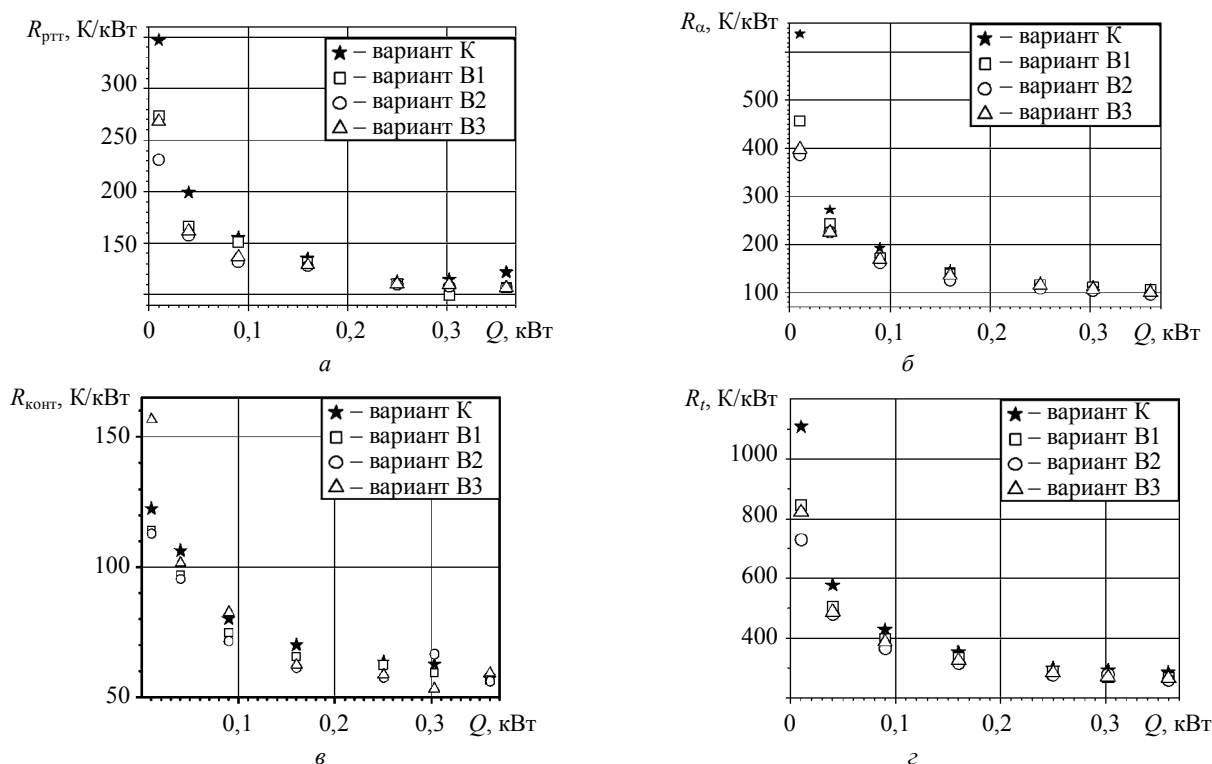


Рис. 7

Исследования при вынужденном обтекании оребренных тепловых труб проводились при различных расходах воздуха – от 51,5 до 220 м³/ч, что обеспечивало скорости обтекания ребер 0,348–1,487 м/с.

Результаты обработки данных для общего термического сопротивления, термического сопротивления системы основание – тепловая труба – ребра R_t (рис. 8, в), среднего «эффективного» сопротивления теплоотдачи на ребрах R_α (рис. 8, б) и сопротивления контакта нагревателя и основания тепловых труб $R_{\text{ртт}}$ (рис. 8, а) получены для фиксированной скорости обтекания ребер 1,487 м/с (расход 220 м³/ч).

Наименьшая эффективность свойственна системе охлаждения с гладкими ребрами (вариант К) (см. рис. 8, в). Ребра с выемками/выступами обеспечивают повышение тепловой эффективности системы охлаждения на 20–40 % во всем диапазоне тепловых нагрузок. Наибольшая тепловая эффективность практически всегда наблюдалась у оребрения с плотностью расположения выемок 50 %, что справедливо и при прочих расходах воздуха. Данные совпадают с результатами исследований [8–10], проведенных на подобных системах охлаждения (тепловое сопротивление охладителей с плотностью выемок/выступов до 50 % при скорости воздуха 6–12 м/с снижается на 15 % по сравнению с тепловыми трубами с гладкими ребрами).

Зависимости характерных термических сопротивлений исследованной системы охлаждения с оребренными тепловыми трубами при плотности нанесения выемок/выступов 50 % (вариант B2) при свободной и

вынужденной конвекции воздуха от тепловой нагрузки и скорости обтекания ребер представлены на рис. 9. Стоит отметить, что термические сопротивления тепловых труб с оребрением $R_{\text{ртг}}$ практически постоянны при различных скоростях обтекания потоком (рис. 9, а), однако термическое сопротивление теплоотдачи от ребер к воздуху R_a (рис. 9, б) ожидаемо резко зависит от скорости обтекания. В связи с этим увеличение скорости обтекания потоком воздуха ребер приводит к резкому уменьшению теплового сопротивления теплоотдачи от ребер R_a и, как следствие, уменьшению общего термического сопротивления систем охлаждения R_t (рис. 9, в) (увеличению тепловой эффективности системы охлаждения на основе оребренных тепловых труб).

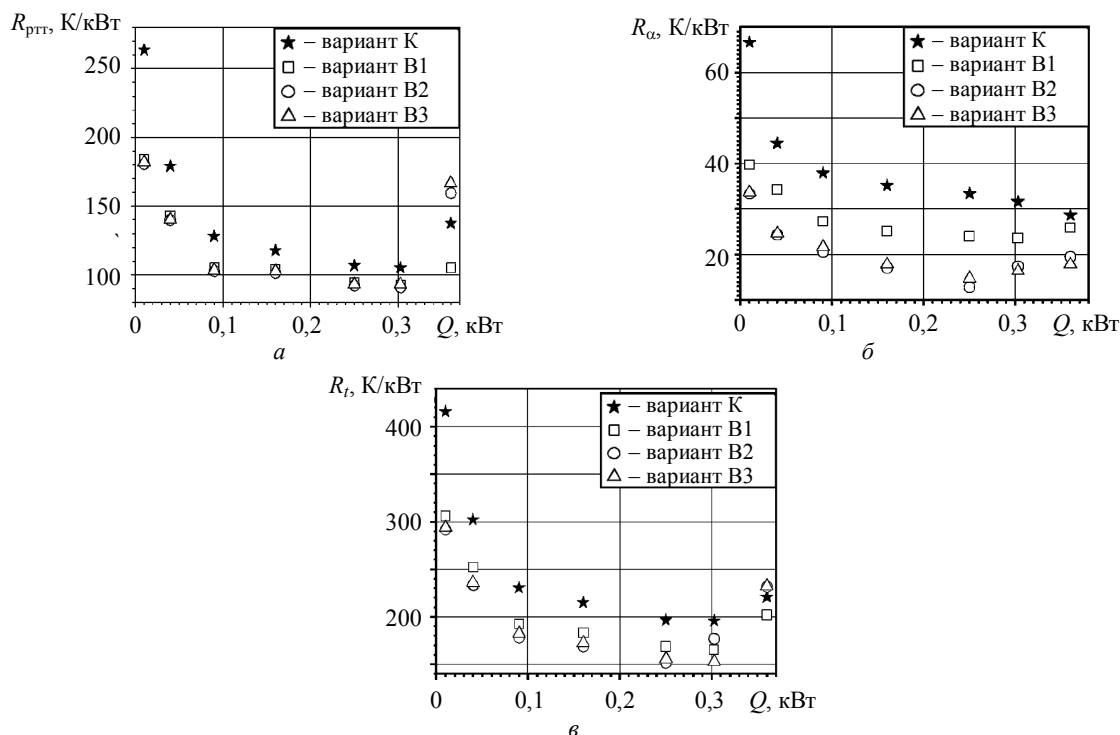


Рис. 8

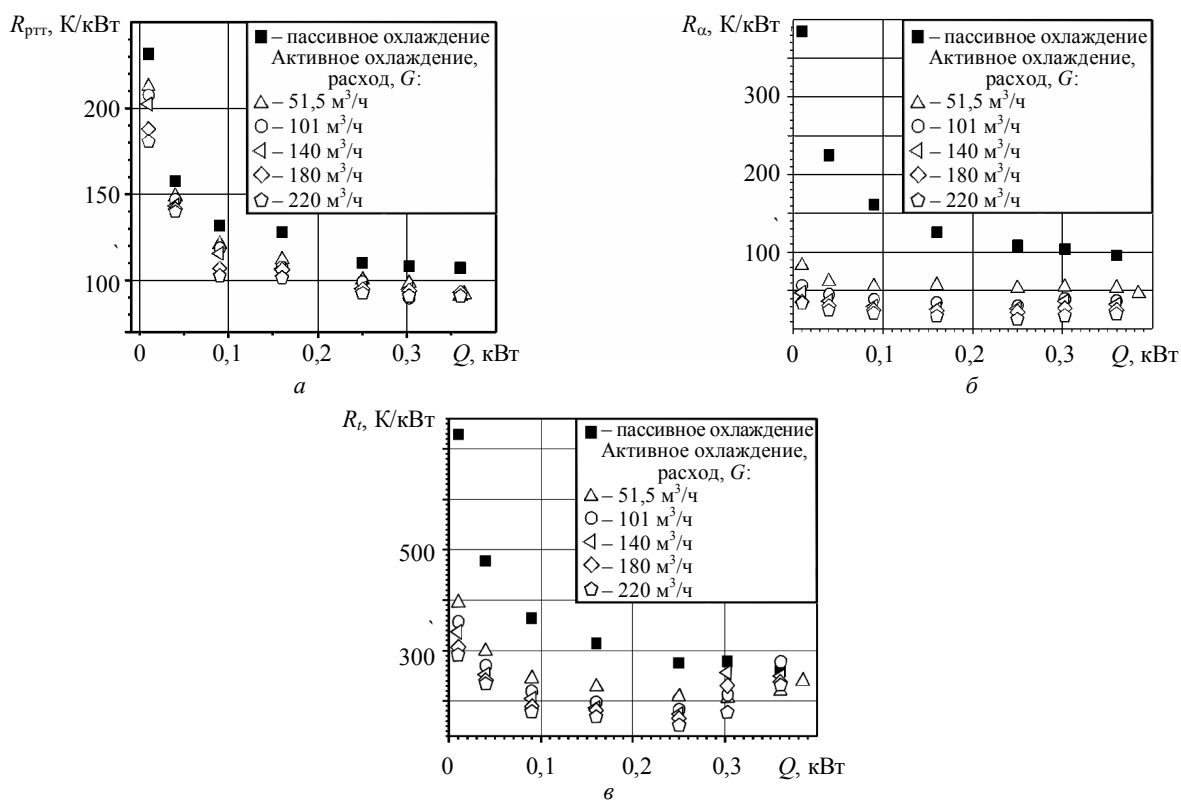


Рис. 9

Таким образом, установлено, что нанесение систем сферических выемок/выступов на ребра позволяет повысить эффективность систем охлаждения на основе оребренных тепловых труб до 20–40 % при принудительной подаче воздуха в диапазоне скоростей 0,348...1,487 м/с. Использование систем сферических выемок/выступов на ребра при использовании пассивной системы охлаждения на основе оребренных тепловых труб практически не приводит к повышению их эффективности. Максимальное повышение эффективности систем охлаждения при вынужденной конвекции воздуха наблюдается при использовании рельефов выемок/выступов с плотностью их расположения 50 % (вариант В2).

Работа выполнена в рамках выполнения договора № 14.Z50.31.0003 от 04.03.2014 по поддержке научных исследований, проводимых ведущими учеными в российских вузах.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Попов И.А. и др. Теплоотдача при кипении различных жидкостей на микроструктурированных поверхностях // Изв. вузов. Авиационная техника. 2014. № 4. С. 49–53.
2. Гортышов Ю.Ф. и др. Теплогидравлическая эффективность перспективных способов интенсификации теплоотдачи в каналах теплообменного оборудования. Интенсификация теплообмена: Монография. Казань: Центр инновационных технологий, 2009. 531 с.
3. Гортышов Ю.Ф., Попов И.А. Научные основы расчета высокоэффективных компактных теплообменных аппаратов с рациональными интенсификаторами теплоотдачи // Теплоэнергетика. 2006. № 4. С. 2–14.
4. Гортышов Ю.Ф. и др. Гидродинамика и теплообмен на поверхностях со сферическими выемками // Труды Академэнерго. 2009. № 1. С. 7–22.
5. Попов И.А., Щелчков А.В., Яркаев М.З. Теплогидравлические характеристики дискретно-шероховатых труб на переходных режимах течения // Изв. вузов. Авиационная техника. 2013. № 1. С. 61–65.
6. Popov I.A. et al. Vortex generation in flows past differentially dimpled surfaces // Heat Transfer Research. 2012. Vol. 43. Iss. 4. С. 285–295.
7. Leontiev A.I. et al. Hydrodynamics and heat transfer in heat exchanger channels with spherical holes // Proc. of the ASME International Mechanical Engineering Congress and Exposition, Nov. 5–10, 2006, Chicago. IMECE 2006. P. 625–635.
8. Дилевская Е.В., Каськов С.И. Применение вихревой интенсификации теплообмена для повышения эффективности охладителей силовых электронных устройств // Труды 4-й Рос. нац. конф. по теплообмену. Т. 6. М.: МЭИ, 2006. С. 204–206.
9. Дилевская Е.В., Каськов С.И., Леонтьев А.И. Вихревая интенсификация теплообмена – нетрадиционный способ повышения энергоэффективности охладителей силовых электронных устройств // Вестник международной академии холода. 2007. № 4. С. 30–32.
10. Дилевская Е.В., Каськов С.И., Леонтьев А.И. Исследование тепловых режимов мощных полупроводниковых преобразователей энергии // Там же. 2008. № 4. С. 34–38.

Поступила в редакцию 25.04.14

Cooling Systems for Electronic Devices Based on the Ribbed Heat Pipe

I.A. POPOV, A.V. SHCHELCHKOV, YU.F. GORTYSHOV, AND N.T.A. AL-HARBAVI

We present the results of an experimental study of cooling systems on the basis of the finned heat pipes by applying a system of spherical recesses/projections at the ribs. The possibility of reducing the total thermal resistance of the cooling systems by 20-40% is presented in the entire range of thermal loads studied. Recommendations for rational application of heat transfer intensifier are given.

Spherical recesses / projections, heat transfer enhancement, heat pipes, cooling system, thermal resistance