

Д. т. н. Э. С. МАЛКИН, к. т. н. Ю. Е. НИКОЛАЕНКО,
к. т. н. И. Э. ФУРТАТ, А. М. ДАНИЛОВ, Т. Ю. НИКОЛАЕНКО

Украина, г. Киев, КНУСА, Министерство пром. политики Украины,
НТУУ «КПИ», Киевский нац. университет им. Тараса Шевченко
E-mail: tim_mail@ukr.net, tashka@industry.gov.ua

Дата поступления в редакцию
01.02 2008 г.

Оппонент д. т. н. В. Т. ДЕЙНЕГА
(НИИ «Шторм», г. Одесса)

СРАВНИТЕЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ ДВУХКАНАЛЬНОГО ЩЕЛЕВОГО ТЕПЛООБМЕННИКА И СУЩЕСТВУЮЩЕГО НА РЫНКЕ АНАЛОГА

Экспериментально показано, что по сравнению с водяным теплообменником фирмы Titan разработанный теплообменник позволяет увеличить отводимую мощность более чем на 50%.

Одной из основных проблем при конструировании перспективных высокопроизводительных электронных систем является обеспечение теплового режима электронных компонентов. Стремление к уменьшению их габаритных размеров и совершенствованию функциональных характеристик приводит к существенному росту удельной мощности тепловыделения на поверхности этих компонентов. Например, плотность теплового потока на поверхности перспективных высокопроизводительных микропроцессоров может достигнуть значений до 200 Вт/см² [1], что потребует применения высокоэффективных систем охлаждения.

С целью повышения эффективности охлаждения микропроцессоров в последнее время разработан ряд замкнутых систем охлаждения [2—5] с одним или несколькими жидкостными теплообменниками, соединенными системой трубопроводов с насосом (помпой), и воздушно-жидкостным теплообменником, с поверхности которого теплота отводится в окружающую среду.

Анализ рабочих характеристик известных водяных систем охлаждения показывает, что эффективность теплоотвода с помощью таких систем определяется, в основном, интенсивностью кондуктивно-конвективного теплообмена в жидкостном теплообменнике в зоне теплоподвода и интенсивностью теплообмена с внешней поверхности воздушно-жидкостного теплообменника. Повышения интенсивности теплообмена

в зоне теплоподвода можно достичь путем реализации в жидкостном теплообменнике специальных щелевых каналов для протекания жидкости, обеспечивающих высокоэффективный конвективный теплообмен [6].

С этой целью разработаны новые конструкции одноканального и многоканального жидкостных щелевых теплообменников, отличающихся сравнительно небольшими габаритными размерами и высокими теплопередающими характеристиками [7, 8]. В результате расчетных и первых экспериментальных исследований таких теплообменников [9—11] установлено, что коэффициент теплоотдачи в щелевом канале растет по мере уменьшения его высоты. Однако при этом увеличивается его гидравлическое сопротивление, а соответственно растут и энергетические затраты на прокачку теплоносителя через теплообменник. С учетом этого высота щелевого канала 0,2—0,3 мм считается оптимальной [11].

Целью настоящей работы являлось экспериментальное сравнение эффективности теплоотвода с помощью разработанного авторами алюминиевого двухканального щелевого теплообменника с высотой каналов 0,3 мм и жидкостного теплообменника фирмы Titan, поставляемого в комплекте с жидкостной системой охлаждения модели TWC-A05 для микропроцессоров Intel P3, P4 и AMD K7, K8.

Экспериментальная установка и методика проведения исследований

Схема экспериментальной установки для проведения исследований приведена на рис. 1. Она предусматривает возможность испытания обоих типов теплообменников как в составе системы жидкостного охлаждения Titan модели TWC-A05 с принудительной циркуляцией жидкости по замкнутому кон-

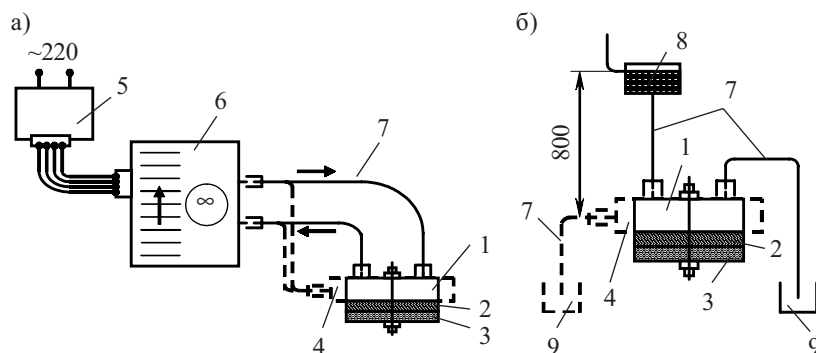


Рис. 1. Схема экспериментальной установки для исследования водяных теплообменников с замкнутым (а) и разомкнутым (б) циклом циркуляции воды: 1 — двухканальный щелевой теплообменник; 2 — медная пластина имитатора теплового потока; 3 — тепловыделяющие резисторы; 4 — теплообменник Titan; 5 — блок питания ПЭВМ (12 В; 5 В); 6 — внешний блок Titan для циркуляции и принудительного воздушного охлаждения воды; 7 — гибкие шланги; 8 — напорная емкость с водой; 9 — приемная емкость

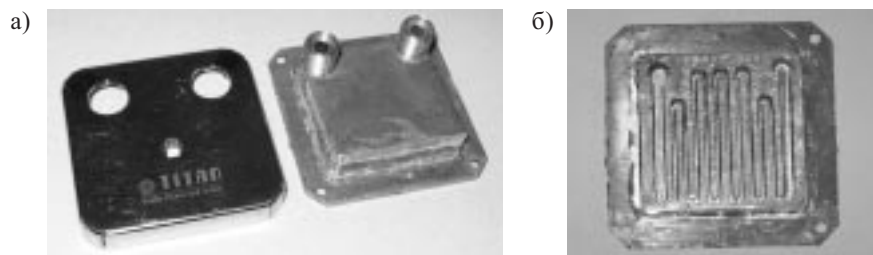


Рис. 2. Теплообменник Titan со снятой декоративной крышкой (а) и со снятой герметичной крышкой (б)

туру и воздушным охлаждением ее во внешнем воздушно-жидкостном теплообменнике с помощью встроенного вентилятора, так и в условиях разомкнутой системы водяного охлаждения.

Внешний вид теплообменника Titan показан на рис. 2. Под декоративной крышкой теплообменника находится металлический контейнер прямоугольной формы размерами 43×43×10 мм с внутренними водяными каналами и внешними входным и выходным штуцерами. Водяные каналы имеют зигзагообразную форму и выполнены в блоке высотой 7,5 мм из алюминиевого сплава, герметично припаянном одним основанием к медному основанию теплообменника, а другим — к верхней медной крышке со штуцерами. Размеры охлаждаемой части — 63×63×13 мм, ширина подводящего и отводящего водяных каналов — 2 мм, зигзагообразных охлаждающих каналов — 1,5 мм, толщина перегородок между зигзагообразными каналами — 2 мм. Внутренняя поверхность теплообмена составляет $47,24 \cdot 10^{-4} \text{ м}^2$, площадь основания активной части теплообменника — $18,49 \cdot 10^{-4} \text{ м}^2$, общая площадь основания теплообменника — $39,69 \cdot 10^{-4} \text{ м}^2$.

Для питания вентилятора и насоса теплообменного блока системы охлаждения Titan использовался блок

питания от серийной ПЭВМ, обеспечивающий стабилизированные напряжения постоянного тока 12 и 5 В. Размеры встроенного вентилятора — 80×80×25 мм, максимальная частота вращения — 2700 об/мин, максимальный объемный расход воздуха — 0,94 м³/мин (33,18 ft³/min).

Схема и внешний вид щелевого теплообменника показаны на рис. 3 и 4. Размеры его охлаждаемой части — 40×40×15,6 мм. Для подсоединения щелевого теплообменника к водяной системе охлаждения Titan со шлангами и накидными гайками, имеющими дюймовую резьбу, были использованы переходные резьбовые втулки.

Исследуемый теплообменник устанавливался через тонкий слой теплопроводной пасты КПТ-8 на имитаторе теплового потока и прижимался к нему с помощью металлической скобы. В качестве имитатора теплового потока (см. рис. 5, а) использована медная пластина размерами 37×37×7 мм с полированными поверхностями, на одной из которых (на нижней) через слой пасты КПТ-8 устанавливались и с помощью винтов закреплялись два резистора типа РА-7. Максимальная мощность каждого резистора — 300 Вт, размеры — 18×37×5,5 мм, электрическое сопротивление — 5 Ом. Теплоотдающее основание ре-

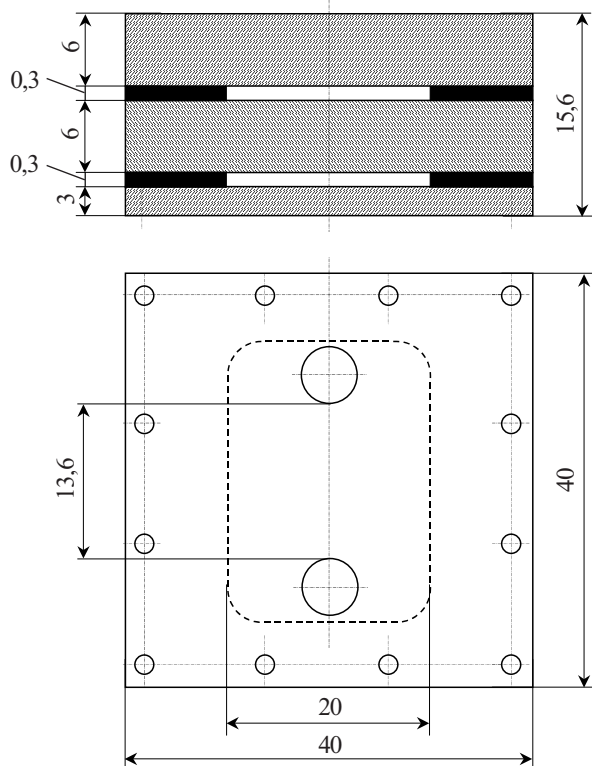


Рис. 3. Схема двухканального щелевого теплообменника



Рис. 4. Внешний вид двухканального щелевого теплообменника с переходными резьбовыми втулками

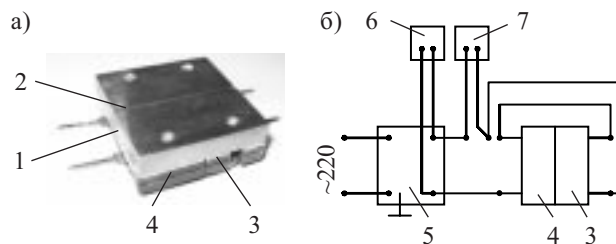


Рис. 5. Внешний вид имитатора теплового потока (а) и схема его электрического подключения (б): 1 — медная пластина; 2 — паз для установки термопар; 3, 4 — резисторы; 5 — автотрансформатор ЛАТР-1; 6 — вольтметр АСТВ; 7 — амперметр Э59

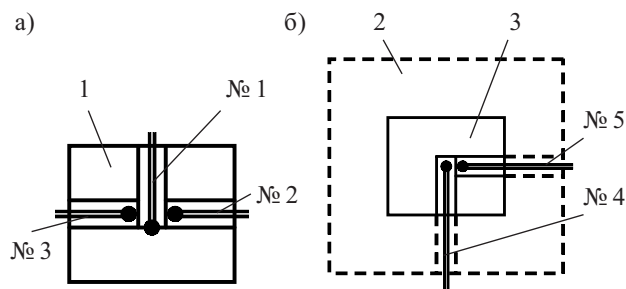


Рис. 6. Схема установки термопар (№ 1...№ 5) для измерения температуры на контактных поверхностях имитатора теплового потока (а) и водяных теплообменников (б): 1 — основание имитатора теплового потока; 2 — основание теплообменника Titan; 3 — основание щелевого теплообменника

зистора выполнено из нитридной керамики, корпус — из пластмассы. Подключение резисторов к питающей сети осуществлялось последовательно через автотрансформатор ЛАТР-1 (см. рис. 5, б), что обеспечивало возможность регулирования суммарной мощности на резисторах в диапазоне от 40 до 600 Вт. Электрическая мощность имитатора теплового потока определялась расчетным путем по показаниям амперметра типа Э59 и вольтметра типа АСТВ с классами точности 0,5.

Измерение температуры контактирующей поверхности имитатора теплового потока и нижней поверхности каждого водяного теплообменника осуществлялось с помощью хромель-копелевых термопар с диаметром проводов 0,2 мм, зачеканенных в пазах на соответствующих контактирующих поверхностях (см. рис. 6). На имитаторе теплового потока было установлено три термопары, на каждом водяном теплообменнике — по две. Термо-эдс термопар измерялась с помощью цифрового вольтметра типа Ф283. Для обработки экспериментальных данных использовались средние значения температуры на каждой контактной поверхности. В случае разомкнутой системы подачи воды под действием статического давления измерение температуры охлаждающей воды осуществлялось в подающей и приемной емкостях с помощью ртутного термометра с ценой деления 0,1°C,

а объемный расход воды определялся с помощью мерного сосуда и секундомера.

Сравнительный анализ результатов исследований

На рис. 7 представлены зависимости мощности Q имитатора теплового потока от среднего значения температуры его поверхности t для режима циркуляции охлаждающей воды по замкнутому контуру и охлаждением ее потоком воздуха в системе Titan модели TWC-A05 и для режима движения воды по разомкнутому контуру.

Анализ результатов исследований тепловых характеристик разработанного теплообменника и теплообменника Titan в составе замкнутой системы водяного охлаждения (см. рис. 7, а) показывает, что в диапазоне температуры имитатора теплового потока $t=35\text{—}80^\circ\text{C}$ мощность, отводимая щелевым теплообменником, превышает мощность, отводимую теплообменником Titan, на 56—64 Вт, соответственно. В частности, для рекомендуемой из соображений надежной работы микропроцессора температуры 60°C мощность, отводимая алюминиевым щелевым теплообменником, составляет 172 Вт, что на 60 Вт выше по сравнению с медным теплообменником Titan. При этом удельный тепловой поток, подводимый к основанию щелевого теплообменника, в 2,5 раза выше, т. к. площадь базовой поверхности его основания ($16 \cdot 10^{-4} \text{ м}^2$) в 2,5 раза меньше, чем у теплообменника Titan ($40 \cdot 10^{-4} \text{ м}^2$), а весь подводимый тепловой поток практически равномерно распространяется по всему основанию обоих теплообменников.

Использование щелевого теплообменника при более высоких значениях отводимой мощности, например около 204 Вт, позволяло снизить температуру имитатора теплового потока более чем на 20°C .

Повышение мощности имитатора теплового потока выше 240 Вт приводило к нарушению нормального режима работы замкнутой системы водяного охлаждения Titan, поскольку существующей эффективности воздушного охлаждения нагретой воды во внешнем теплообменном блоке системы оказалось недостаточно для поддержания на постоянном уровне температуры воды на выходе из внешнего теплообменника.

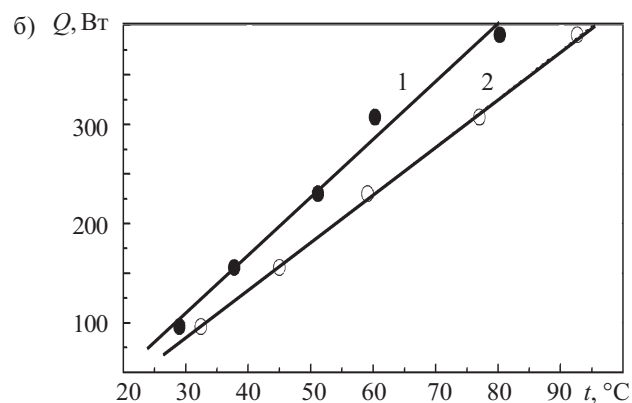
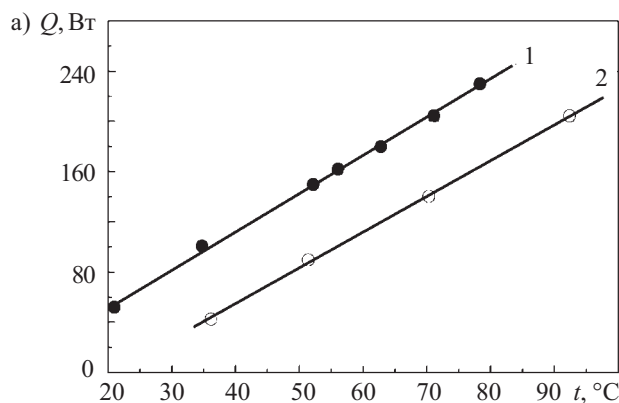


Рис. 7. Зависимость отводимой мощности от температуры имитатора теплового потока в режиме циркуляции воды по замкнутому контуру (а) и в режиме разомкнутой системы охлаждения (б): 1 — для двухканального щелевого теплообменника; 2 — для теплообменника Titan

ОБЕСПЕЧЕНИЕ ТЕПЛОВЫХ РЕЖИМОВ

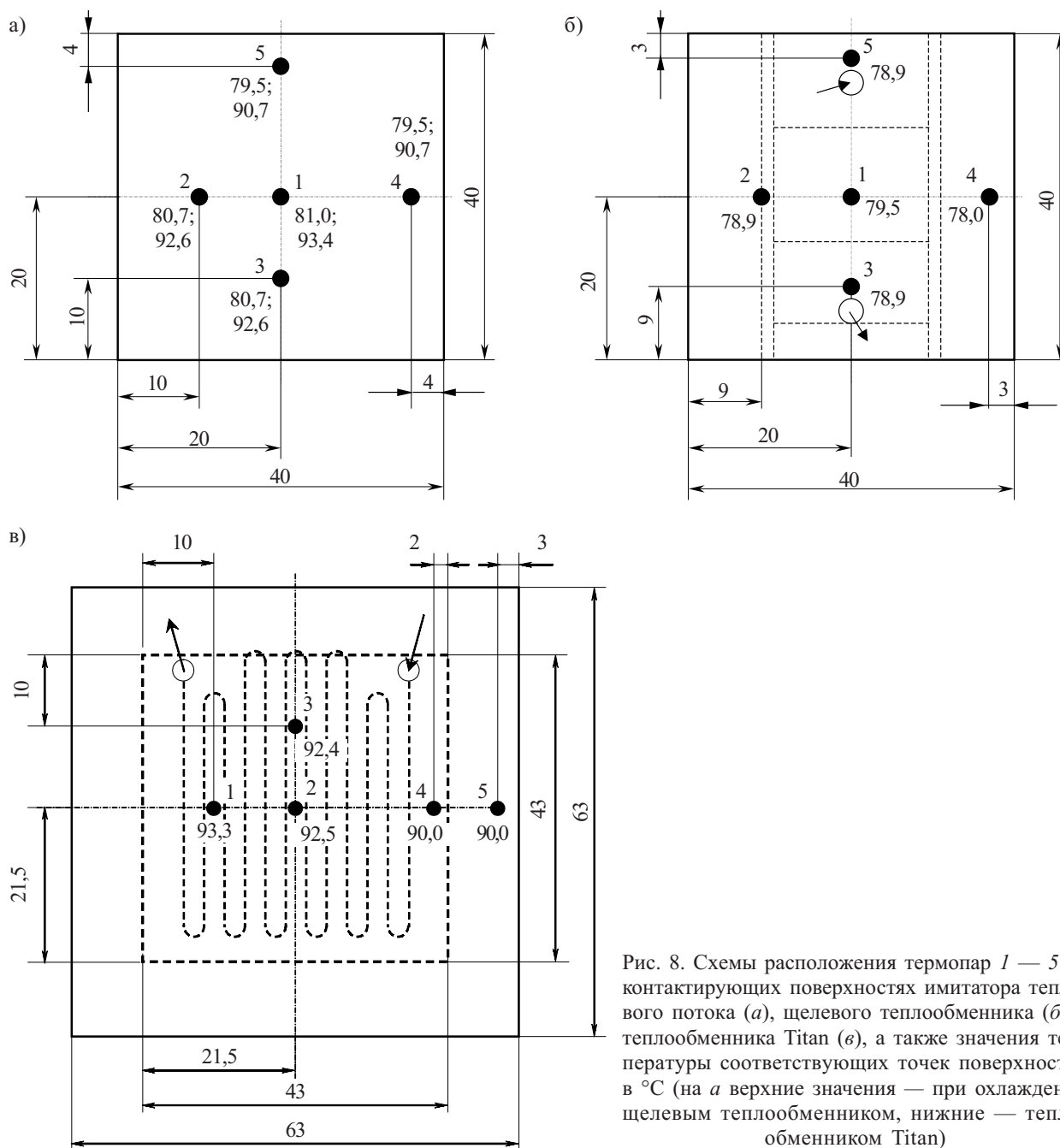


Рис. 8. Схемы расположения термпар 1 — 5 на контактирующих поверхностях имитатора теплового потока (а), щелевого теплообменника (б) и теплообменника Titan (в), а также значения температуры соответствующих точек поверхностей в °С (на а верхние значения — при охлаждении щелевым теплообменником, нижние — теплообменником Titan)

С целью определения эффективности теплоотвода щелевым теплообменником при более высоких значениях подводимой мощности аналогичные исследования были проведены в условиях разомкнутой системы подачи охлаждающей воды в теплообменник из бака, расположенного на 0,8 м выше относительно теплообменника. Это отвечает паспортному значению напора насоса, встроенного во внешний блок воздушно-водяного охлаждения системы Titan (рис. 1, б).

Как видно из рис. 7, б, в этом случае мощность, отводимая двухканальным щелевым теплообменником при объемном расходе воды 6,25 мл/с с температурой 14°С, составляет 96,3—390 Вт при $t=29$ —80,3°С, соответственно. При $t=60$ °С отводилась мощность 307,4 Вт, что на 135,4 Вт больше, чем тем же

теплообменником в условиях замкнутой системы охлаждения.

Исследование теплообменника Titan в разомкнутой системе охлаждения показало, что несмотря на более высокое значение расхода охлаждающей воды (8 мл/с) отводимая им мощность при $t=60$ °С была на 73,4 Вт меньше, чем щелевым теплообменником. В целом же, диапазону отводимой мощности 96,3—390 Вт при использовании теплообменника Titan соответствовал диапазон температуры $t=32,4$ —92,7°С, т. е. при максимальной мощности 390 Вт средняя температура имитатора была на 12,4°С выше, чем при использовании щелевого теплообменника.

С целью определения равномерности температурного поля на поверхности основания обоих теплооб-

менников и имитатора теплового потока, а также оценки относительного количества теплоты, рассеиваемой их внешней поверхностью, были проведены дополнительные исследования в условиях разомкнутого цикла подачи охлаждающей воды при $Q=390$ Вт. При этом измерялась не только подводимая к имитатору теплового потока электрическая мощность, но и количество теплоты, отводимое охлаждающей водой. Для этого определялись расход и температура воды на входе и выходе из теплообменников. Температура воды на входе в теплообменники составляла 16°C , расход воды через теплообменник Titan — 8 мл/с, через двухканальный щелевой теплообменник — 8,7 мл/с.

Схема размещения термопар и значения температуры в этих точках приведены на **рис. 8**. Стрелками показан подвод и отвод охлаждающей воды.

Сравнительный анализ результатов измерений показал следующее.

При одинаковой подводимой тепловой мощности температура охлаждаемой поверхности (имитатора теплового потока) в случае применения двухканального щелевого теплообменника на 7—13 % ниже, чем при использовании теплообменника Titan.

Относительное количество теплоты, отведенное водой в двухканальном щелевом теплообменнике, составляет 85—97% от общего подводимого теплового потока, в теплообменнике Titan — 81—93%, т. е. отвод теплоты с внешней поверхности последнего выше, чем щелевого.

Разброс значений температуры по площади охлаждаемой поверхности в случае применения двухканального щелевого теплообменника не превышает $1,5^{\circ}\text{C}$, для теплообменника Titan он достигает $2,7^{\circ}\text{C}$. При этом для выравнивания температуры в теплообменнике Titan в качестве основания используется медная пластина толщиной 3 мм, в то время как в двухканальном щелевом теплообменнике никаких дополнительных мер для этой цели принимать не нужно.

Коэффициент теплоотдачи от теплоотдающей поверхности к воде в двухканальном щелевом теплообменнике более чем в 5 раз выше, чем в теплообменнике Titan (7380 и 1450 Вт/(м²·°C), соответственно). Расхождение экспериментальных и расчетных значений, полученных по методике [9], не превышает 3%.

Мощность теплоотвода, отнесенная к 1 см² основания теплообменника, для двухканального щелевого теплообменника достигает $24,5$ Вт/см² (при температуре охлаждаемой поверхности 80°C), в то время как для теплообменника Titan она не превышает 10 Вт/см² (при температуре охлаждаемой поверхности 92°C).

Выводы

Результаты проведенных исследований двух типов теплообменников убедительно свидетельствуют о более высокой эффективности теплоотвода с помощью разработанного двухканального щелевого теплообменника по сравнению с существующим на рынке теплообменником Titan. Это положение обосновано достигнутыми, с одной стороны, значительно более низкими температурами поверхности имитатора теплового потока при одинаковой отводимой тепловой мощности и, с другой стороны, более высокими значениями отводимой мощности при одинаковой температуре имитатора.

Разработанный теплообменник может найти широкое применение как для охлаждения микропроцессоров ЭВМ, так и для охлаждения других теплонагруженных компонентов и узлов электронной аппаратуры.

ИСПОЛЬЗОВАННЫЕ ИСТОЧНИКИ

1. Мельниченко А. Жидкостное охлаждение электронных компонентов // Электронные компоненты и системы.— 2005.— № 1.— С. 39—42.
2. Деклар. пат. 59101А України. Охолоджувач процесорів електронних пристроїв / Д. М. Тютюнник, Г. О. Пархоменко.— 2003.— Бюл. № 8.
3. Пархоменко Г. Водные процедуры // Мой компьютер.— 2004.— № 9/284.— С. 17—19.
4. Кравец В. Ю., Коньшин В. И., Пархоменко Г. А. Система водяного охлаждения мощного процессора ПЭВМ // Технология и конструирование в электронной аппаратуре.— 2005.— № 1.— С. 42—44.
5. Хачатрян Д., Марченко П. Вода против тепла // Домашний ПК.— 2006.— № 1.— С. 26—35.
6. Тимошенко А. В. Гидродинамика и теплообмен потока жидкости в щелевых микроканалах. Автореф. дис. ... канд. техн. наук.— Киев, ИТТФ НАНУ.— 2007.
7. Деклар. пат. 17091 України. Рідинний теплообмінник для охолодження потужного мікропроцесора / Е. С. Малкін, А. В. Тимошенко, Ю. Є. Ніколаєнко, Т. Ю. Ніколаєнко.— 2006.— Бюл. № 9.
8. Пат. 22628 України. Рідинна система охолодження потужного електронного компонента / Е. С. Малкін, А. В. Тимошенко, Т. Ю. Ніколаєнко, Ю. Є. Ніколаєнко.— 2007.— Бюл. № 5.
9. Малкін Е. С., Фуртат І. Е., Ніколаєнко Ю. Є., Ніколаєнко Т. Ю. Методика розрахунку нових високоефективних двоканальних теплообмінників на базі щілинних мікроканалів для відводу теплоти за допомогою води // Новая тема.— 2007.— № 4.— С. 11—12.
10. Малкин Э. С., Тимошенко А. В., Николаенко Ю. Е., Николаенко Т. Ю. Повышение эффективности охлаждения процессоров // Труды 8-й МНПК “Современные информационные и электронные технологии”.— Одесса, Украина.— 2007.— С. 265.
11. Николаенко Ю. Е., Малкин Э. С., Фуртат И. Э., Николаенко Т. Ю. Экспериментальное исследование одноканального щелевого теплообменника жидкостной системы охлаждения для микропроцессора // Технологические системы.— 2007.— № 4.— С. 54—62.