

Д. т. н. Э. С. МАЛКИН, д. т. н. Ю. Е. НИКОЛАЕНКО,
М. И. ДЬЯЧКОВ, Т. Ю. НИКОЛАЕНКО

Украина, г. Киев, КНУ строительства и архитектуры,
Министерство промышленной политики Украины,
КНУ им. Тараса Шевченко
E-mail: nikola@industry.gov.ua

Дата поступления в редакцию
14.01.2010 г.

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

ИССЛЕДОВАНИЕ ХАРАКТЕРИСТИК ЩЕЛЕВОГО ТЕПЛООБМЕННИКА С РАЗВИТОЙ ПОВЕРХНОСТЬЮ ТЕПЛООБМЕНА

Предложена конструкция водяного многоканального щелевого теплообменника, позволяющего отводить мощность до 750 Вт при температуре имитатора теплового потока 60°C, а также пути повышения технологичности изготовления теплообменника.

За последние десятилетия элементная база электронной аппаратуры существенным образом обновилась — вместо маломощных интегральных микросхем появились мощные полупроводниковые элементы, такие как одно- и многоядерные микропроцессоры, многокристальные модули, лазерные диоды, линейки и матрицы на их основе и т. п. Мощности микропроцессоров с повышением тактовой частоты постоянно возрастает [1] и уже достигла 130 Вт [2, 3]. Мировая тенденция к постоянному увеличению количества транзисторов на кристалле (1720 млн., 2006 г., микропроцессор Intel Itanium IA-64 Montecito [3, с. 58]) и стремление к уменьшению размеров электронных компонентов обуславливают дальнейший рост их удельного тепловыделения до 100 Вт/см² [4, с. 331—334], а в будущем ожидается его увеличение до 200 Вт/см² [5], что вызывает острую необходимость повышения эффективности охлаждения микропроцессоров. Создание микропроцессора «Pentium-5» оказалось труднейшей задачей именно из-за сложности решения проблемы его охлаждения [6].

С целью повышения эффективности охлаждения микропроцессоров в последнее время разработаны водяные системы охлаждения на основе теплообменников со щелевыми каналами [7—10]. В [10] показано, что благодаря высокому коэффициенту теплоотдачи в щелевых каналах использование алюминиевого двухканального щелевого теплообменника с высотой каждого канала 0,3 мм вместо штатного медного водяного теплообменника в составе замкнутой водяной системы охлаждения Titan модели TWC-A05 позволяет при одинаковой температуре имитатора теплового потока (плюс 60°C) отвести на 60 Вт больше — 172 против 112 Вт. Использование же разработанного щелевого теплообменника вместо теплообменника Titan в разомкнутой системе водяного охлаждения с температурой воды на входе 14°C позволяет при температуре имитатора плюс 60°C повысить отводимую мощность с 234 до 307 Вт.

Вместе с тем, дальнейшее повышение отводимого теплового потока с помощью такого теплообменника сдерживается ограниченностью поверхности теплообмена в щелевых каналах, параллельных основанию теплообменника, что не позволяет использовать его для охлаждения более мощной элементной базы перспективной электронной аппаратуры, в т. ч. и более мощных микропроцессоров.

Целью настоящей работы является разработка и экспериментальное исследование тепловых и гидравлических характеристик более эффективной конструкции щелевого теплообменника.

Разработанный теплообменник имеет развитую поверхность теплообмена и представляет собой медный теплообменный блок размерами 45×31×18 мм с щелевыми каналами шириной 0,2 мм и высотой 8 мм, плотно вставленный в окно основания полого медного корпуса теплообменника размерами 55×55×20 мм и запаянный в нем по периметру заподлицо с нижней поверхностью основания. Теплообменный блок размещается так, чтобы щелевые каналы были перпендикулярны основанию теплообменника. Нижняя поверхность собранного таким образом теплообменника дополнительно обрабатывалась механически и отполировывалась для создания гладкой контактной поверхности.

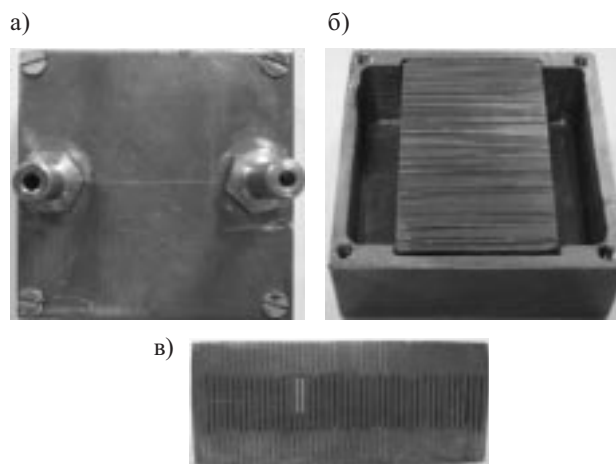


Рис. 1. Внешний вид многоканального щелевого теплообменника (а), вид сверху со снятой крышкой (б) и вид на теплообменный блок со стороны открытых торцов щелевых каналов (в)

Теплообменный блок со щелевыми каналами образован путем набора пакета из 42-х медных пластин размером 18×31 мм, толщиной 1 мм, разделенных между собой сверху и снизу медными прокладками размером 5×31 мм, толщиной 0,2 мм. Пакет пластин с прокладками был плотно стянут и скреплен шестью медными стержнями с расклепанными концами, предварительно вставленными в просверленные в пакете сквозные отверстия.

Схема исследуемого теплообменника приведена в [11], а его внешний вид в собранном и разобранном виде — на рис. 1. Между входными и выходными торцами щелевых каналов и соответствующими стенками корпуса теплообменника образованы входной и выходной коллекторы, сообщающиеся соответственно с входным и выходным патрубками.

Экспериментальная установка и методика проведения исследований

Экспериментальные исследования разработанного щелевого теплообменника проводились по разомкнутой схеме водяного охлаждения, описанной в [10]. Рабочим участком экспериментальной установки служил исследуемый многоканальный водяной теплообменник, закрепленный через слой тонкой алюминиевой фольги на имитаторе теплового потока с помощью четырех металлических шпилек М6 с гайками. В качестве имитатора теплового потока использовали электрический нагреватель, представляющий собой медный стержень диаметром 65 мм длиной 180 мм с отполированной контактной торцевой поверхностью и с намотанной на его боковую поверхность через слой электроизоляции нихромовой спиралью из проволоки диаметром 1,0 мм с электрическим сопротивлением 14,8 Ом. Нагреватель обеспечивал подвод к основанию теплообменника электрической мощности до 3270 Вт. Подключение нагревателя к питающей сети 220 В осуществлялось последовательно через регулятор напряжения типа РНО-2,5, что обеспечивало возможность регулирования мощности нагревателя в широких пределах. Значения питающего напряжения и тока определялись по показаниям вольтметра типа АСТВ класса точности 0,5 и амперметра типа Е59 класса точности 0,5.

Температура поверхности имитатора теплового потока в зоне контакта и температуры нижнего основания щелевого теплообменника измерялась с помощью хромель-копелевых термоэлектрических преобразователей (термопар) с диаметром проводов 0,2 мм, зачеканенных в пазах на соответствующих контактирующих поверхностях. На имитаторе теплового потока было установлено 5 термопар, на водяном теплообменнике — 8 (6 — на нижнем основании и 2 — на верхнем). Термо-эдс термопар измерялась с помощью цифрового милливольтметра типа Ф283.

Температура охлаждающей воды на входе в теплообменник и выходе из него измерялась с помощью ртутных термометров с ценой деления 0,1°C, помещенных в специально предусмотренные вставки в водяной магистрали. Объемный расход воды определялся с помощью мерного сосуда и секундомера.

Для измерения потерь гидравлического давления при прохождении водяного потока через теплообмен-

ник на входе водяной магистрали в теплообменник и выходе устанавливались вертикальные пьезометрические трубки с нанесенными миллиметровыми делениями.

Методика исследования тепловых и гидравлических характеристик предусматривала получение экспериментальных зависимостей среднего значения температуры имитатора теплового потока и среднего значения температуры нижнего основания теплообменника от величины отводимого теплового потока, которая определялась калориметрическим методом по перепаду температуры воды на выходе и входе теплообменника и ее массовому расходу через теплообменник. По разности температур нагревателя и теплообменника определялся перепад температуры в зоне контакта.

Результаты исследований и их анализ

Основная тепловая характеристика разработанного теплообменника, приведенная на рис. 2, получена при расходе охлаждающей воды через теплообменник 11,8 мл/с и температуре воды на входе 19°C. Из рисунка видно, что при температуре основания охлаждаемого микропроцессора, например, 65°C, с помощью такого теплообменника от микропроцессора можно отвести мощность до 900 Вт. Отсюда также можно определить, что при рекомендуемой для более надежной работы микропроцессора температуре 60°C его мощность рассеяния не должна превышать 750 Вт.

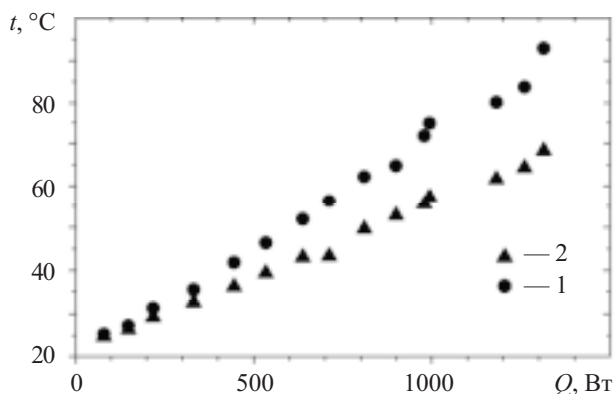


Рис. 2. Зависимость температуры t имитатора теплового потока в зоне контакта (1) и температуры основания многоканального щелевого теплообменника (2) от отводимого теплового потока Q

Использование данного теплообменника для охлаждения электронных компонентов на основе арсенида галлия, карбида кремния, алмаза и т. п., работоспособных при более высоких температурах, позволяет обеспечить более высокие значения отводимой мощности, вплоть до 1300 Вт. При этом температура основания охлаждаемого электронного компонента при расходе охлаждающей воды 11,8 мл/с не превышает 90°C.

Рис. 2 показывает также, насколько важной при отводе высоких мощностей является величина контактного термического сопротивления между охлаждаемым электронным компонентом и теплообменником.

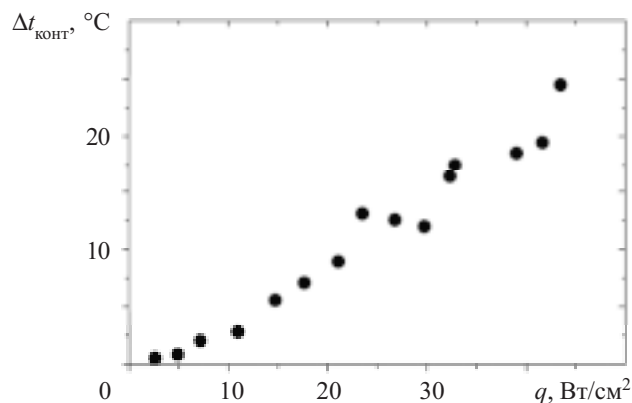


Рис. 3. Зависимость перепада температуры $\Delta t_{\text{конт}}$ между имитатором теплового потока и теплообменником в зоне контакта от плотности отводимого теплового потока q

Так, например, при отводимой мощности 1300 Вт перепад температуры в зоне контакта имитатора теплового потока с теплообменником достигает 25°C . Если бы удалось обеспечить близкий к идеальному тепловой контакт между ними (например, с помощью пайки серебросодержащим припоем), то за счет этого можно было бы снизить температуру имитатора в зоне контакта примерно на 20°C , что является достаточно существенным для современной элементной базы.

Рис. 3 наглядно показывает влияние уровня отводимого теплового потока, отнесенного к площади контактной поверхности теплообменника, составляющей $30,25 \text{ см}^2$, на перепад температуры в зоне контакта — можно сказать, эта зависимость близка к линейной. Попытки уменьшить контактное термическое сопротивление путем замены алюминиевой фольги пастой КПТ-8 ощутимого положительного эффекта не дали.

Дальнейшего увеличения отводимого теплового потока можно достичь, увеличив расход охлаждающей воды через теплообменник. Как видно из **рис. 4**, увеличение расхода воды с 11,8 до 16,3 мл/с позволяет повысить отводимую мощность с 1580 до 1988 Вт. Однако с увеличением отводимой мощности возрастают и средние значения температуры имитатора теплового потока, и температуры основания теплообменника — с $92,4$ до $121,4^\circ\text{C}$ и с $76,4$ до $91,6^\circ\text{C}$, соот-

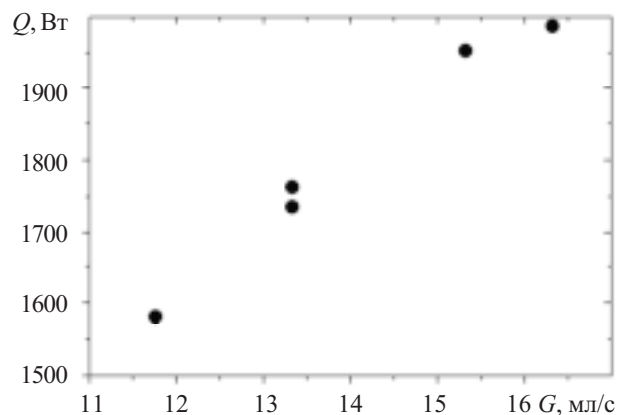


Рис. 4. Зависимость отводимого теплового потока Q от расхода охлаждающей воды G

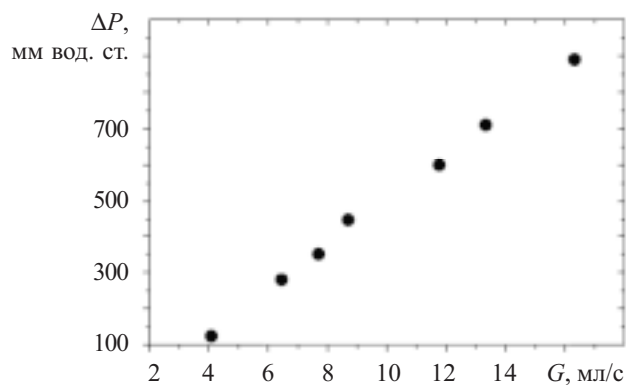


Рис. 5. Зависимость гидравлических потерь ΔP в теплообменнике от расхода охлаждающей воды G

ветственно. Кроме того, с увеличением расхода воды растут и гидравлические потери в теплообменнике (**рис. 5**), что необходимо учитывать при выборе насоса водяной системы охлаждения.

Проведенные исследования показали, что по сравнению с разработанным ранее двухканальным щелевым теплообменником [10] предлагаемый многоканальный щелевой теплообменник позволяет более чем в два раза (с 307 до 750 Вт) увеличить отводимую мощность в разомкнутой системе охлаждения при температуре имитатора теплового потока 60°C . Также на 200 мм вод. ст. (с 800 до 600 мм) снижаются гидравлические потери при одновременном увеличении почти вдвое (с 6,25 до 11,8 мл/с) расхода охлаждающей воды.

Вместе с тем, более глубокие сравнительные исследования указанных теплообменников свидетельствуют о несовершенстве разработанной конструкции многоканального теплообменника. Действительно, поверхность теплообмена разработанного многоканального щелевого теплообменника составляет 208 см^2 (41 канал сечением $0,2 \times 8 \text{ мм}$ и длиной 31 мм), в то время как у двухканального щелевого теплообменника — всего 13 см^2 (2 канала сечением $0,3 \times 20 \text{ мм}$ и длиной 13,6 мм). Полученное экспериментально увеличение отводимой мощности в многоканальном теплообменнике (в 2,4 раза) не адекватно увеличению теплоотдающей поверхности щелевых каналов (в 16 раз). Кроме того, габаритные размеры (без учета высоты патрубков) многоканального теплообменника ($55 \times 55 \times 20 \text{ мм}$) превышают габаритные размеры ($40 \times 40 \times 15,6 \text{ мм}$) двухканального.

В то же время, анализ конструкции исследуемого многоканального щелевого теплообменника показал, что потенциальные возможности данного технического решения в части отвода тепла не могли быть полностью реализованы в рассмотренной конструкции теплообменника по следующим причинам.

1) Высокие (18 мм) тонкие (1 мм) ребра-пластины, из которых набран пакет теплообменного (ТО) блока, имеют низкую эффективность.

2) Теплоноситель в каналах не имеет непосредственного контакта с теплоподводящей поверхностью, поскольку в ТО-блоке имеются сплошные части толщиной 5 мм для отверстий под стягивающие бол-

ты. При высокой плотности подводимого теплового потока (до 66 Вт/см²) это приводит к дополнительно термическому сопротивлению и, соответственно, перепаду температуры между нагреваемым основанием теплообменника и охлаждающей водой.

3) Одна из двух сплошных частей ТО-блока толщиной 5 мм практически не участвует в подводе теплоты к теплообменной поверхности стенок каналов, поскольку не имеет теплового контакта с тепловыделяющим элементом.

Кроме того, исследованная конструкция многоканального теплообменника является нетехнологичной, а его производство дорогостоящим.

Усовершенствованное конструктивно-технологическое решение теплообменника

С целью более полной реализации потенциальных возможностей многоканального щелевого теплообменника разработана более компактная и более технологичная в производстве конструкция, в определенной мере лишенная некоторых из указанных выше недостатков [13]. Она предусматривает изготовление теплообменника из двух оребренных с одной стороны заготовок, выполненных из теплопроводного материала (алюминия или меди) и соединенных между собой по периметру с обеспечением надежного теплового контакта (сваркой, пайкой и т. п.). Зазоры между теплообменными поверхностями смежных ребер заготовок выполняют роль щелевых каналов в таком теплообменнике (рис. 6). Ребра могут иметь прямоугольное, треугольное или трапециевидное сечение.

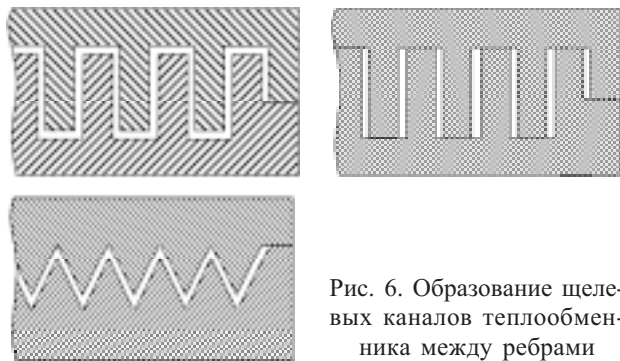


Рис. 6. Образование щелевых каналов теплообменника между ребрами

Такая конструкция позволяет изготавливать теплообменник из оребренных заготовок, легко получаемых методом экструзии. При этом качество теплообменной поверхности ребер может быть достаточно высоким, что положительно скажется на гидравлических характеристиках теплообменника.

Для обеспечения более надежного теплового контакта и лучшего подвода теплоты от нижнего основания к верхнему они могут быть соединены между собой с помощью миниатюрных тепловых труб, что несущественно увеличит габариты теплообменника, но повысит его теплоотводящую способность. Для подачи и отвода воды в теплообменнике предусмотрены соответствующие патрубки и коллекторы.

В дальнейшем планируется изготовление и исследование предложенного теплообменника.

Выводы

Таким образом, исследования показали, что разработанная конструкция водяного многоканального щелевого теплообменника позволяет по сравнению с известным двухканальным теплообменником увеличить более чем в два раза (с 307 до 750 Вт) отводимую мощность в разомкнутой системе охлаждения при температуре имитатора теплового потока 60°C. При этом данная конструкция теплообменника может быть усовершенствована и в части повышения эффективности отвода тепла, и в части повышения технологичности изготовления.

Разработанные теплообменники могут найти широкое применение не только для охлаждения микропроцессоров, но и для других теплонагруженных компонентов и узлов электронной аппаратуры.

ИСПОЛЬЗОВАННЫЕ ИСТОЧНИКИ

1. Mahajan R., Chia-pin Chiu, Chryster G. Cooling a Microprocessor Chip // Proceedings of the IEEE.— 2006.— Vol. 94, N. 8.— P. 1476—1486.
2. Валентинова М. 64-бит процессоры дают плотно упакованные решения // Электроника: Наука. Технология. Бизнес.— 2004.— № 3.— С. 30—37.
3. Максимов Н. В., Партыка Т. Л., Попов И. И. Технические средства информатизации.— М.: ФОРУМ: ИНФРА-М, 2008.
4. Фостер Л. Нанотехнологии. Наука, инновации и возможности.— М.: Техносфера, 2008.
5. Мельниченко А. Жидкостное охлаждение электронных компонентов // Электронные компоненты и системы.— 2005.— № 1.— С. 39—42.
6. Булат Л. П. Новое поколение твердотельных охладителей // Холодильная техника.— 2004.— № 8.— С. 2—7.
7. Патент України на корисну модель № 22628. Рідина система охолодження потужного електронного компонента / Е. С. Малкін, А. В. Тимошенко, Т. Ю. Ніколаєнко, Ю. Є. Ніколаєнко.— 2007.— Бюл. № 5.
8. 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.
9. 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».— Украина, Одесса.— 2007.— С. 265.
10. Малкин Э. С., Николаенко Ю. Е., Фуртат И. Э. и др. Сравнительные исследования двухканального щелевого теплообменника и существующего на рынке аналога // Технология и конструирование в электронной аппаратуре.— 2008.— № 3.— С. 50—54.
11. Малкин Э. С., Николаенко Ю. Е., Фуртат И. Э. и др. Аналитическое обоснование размеров высокоэффективных теплообменников с гребенчатыми щелевыми каналами // Труды 10-й МНПК «Современные информационные и электронные технологии». Том II.— Украина, Одесса.— 2009.— С. 81.
12. Патент України на корисну модель № 48048. Рідина система охолодження потужного електронного компонента / Е. С. Малкін, Ю. Є. Ніколаєнко, І. Е. Фуртат, М. І. Дячков.— 2009.— Бюл. № 12.
13. Заявка u2010 00477 від 19.01 2010 на видачу патенту України на корисну модель. Щілинний теплообмінник з розвинутою поверхнею теплообміну / Ю. Є. Ніколаєнко, Т. Ю. Ніколаєнко, Е. С. Малкін, В. Ф. Новіков.