

К. т. н. В. Ю. КРАВЕЦ, к. т. н. В. И. КОНЬШИН,
Г. А. ПАРХОМЕНКО

Украина, г. Киев, НТУУ «Киевский политехнический институт»
E-mail: kravetz_kpi@ukr.net

Дата поступления в редакцию
14.09 2004 г.

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

СИСТЕМА ВОДЯНОГО ОХЛАЖДЕНИЯ МОЩНОГО ПРОЦЕССОРА ПЭВМ

Исследованы теплопередающие характеристики первичных теплообменников различных конструкций и определено влияние внутреннего оребрения на температурный режим процессора.

Повышение производительности современных персональных компьютеров и связанное с этим увеличение выделяемой мощности центральных процессоров приводит к значительным перегревам микросхем, что делает актуальной задачу поддержания их температурного уровня в заданном диапазоне. Поскольку увеличение температуры приводит к появлению ошибок в работе процессора, а также к выходу его из строя [1, с. 10], необходимость создания эффективных систем охлаждения не вызывает сомнения.

Большинство существующих систем охлаждения (СО) состоят из радиаторов с развитой поверхностью теплообмена, оснащенных мощными вентиляторами. Так, например, радиатор Zalman 6500B-CU [2] имеет площадь поверхности теплообмена $0,34 \text{ м}^2$ (высота ребер 80 мм) при массе 898 г. Очевидно, что такой радиатор может механически повредить материнскую плату, не говоря уже о шуме, создаваемом скоростным вентилятором (скорость вращения до 9000 мин^{-1}). При увеличении удельных тепловых нагрузок на поверхности процессора до 200 Вт/см^2 такие способы охлаждения перестают быть эффективными.

Поиск путей интенсификации теплосъема от мощных процессоров привел к созданию таких СО, в которых контактирующая с процессором поверхность омывается движущимся потоком воды [3]. Это способствует значительному повышению коэффициентов теплоотдачи в месте контакта и, соответственно, снижению температуры ядра процессора. В настоящее время имеются различные конструкции систем водяного охлаждения (СВО) [4—8], однако принцип их функционирования практически одинаков. В то же время сведений о теплопередающих характеристиках таких СО недостаточно, чтобы оценить влияние различных факторов на температурный режим работы процессора.

Данная работа посвящена изучению теплопередающих характеристик СВО [9] при различных тепловых нагрузках. Исследовалось влияние конструкции внутренней поверхности первичного теплообменника (основного элемента СВО) на температурный ре-

жим работы мощного процессора персонального компьютера.

Были изготовлены теплообменники из меди марки М1 и алюминия марки Д16Т с тремя вариантами внутренней поверхности: с шипами (см. рис. 1), с оребрением в виде продольных каналов и гладкой.

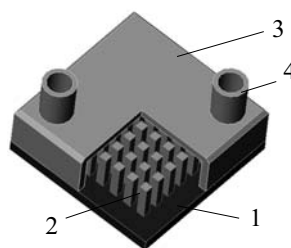


Рис. 1. Конструкция первичного теплообменника:

1 — нижняя часть теплообменника; 2 — шипы; 3 — крышка; 4 — штуцеры для подвода воды

Для проведения исследований первичный теплообменник устанавливался на имитатор мощного процессора. Имитатором процессора служил медный блок 1 (рис. 2), в нижней части которого размещался нихромовый нагреватель 2 мощностью до 200 Вт. В отверстия верхней части цилиндрического блока на определенном расстоянии друг от друга были установлены две хромель-алюмелевые термопары 3, по показаниям которых измерялся тепловой поток, подводимый к верхней площадке. Температура в месте контакта имитатора с теплопринимающей поверхностью первичного теплообменника определялась по показаниям верхней термопары с учетом падения температуры по высоте медного блока.

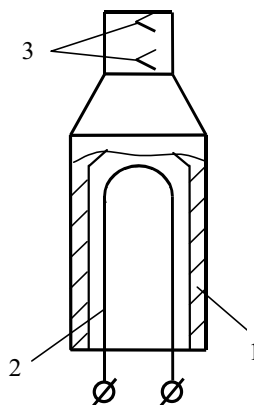


Рис. 2. Имитатор процессора:

1 — корпус; 2 — нихромовый нагреватель; 3 — термопары

Площадь контактной площадки имитатора ($0,1 \cdot 10^{-3} \text{ м}^2$) соответствовала площади кристалла центрального процессора компании AMD (минимальной по сравнению с другими производителями [10, 11]).

На контактную площадку имитатора наносили тонкий слой термопасты КПТ-8 и устанавливали первичный теплообменник. Далее имитатор тщательно теплоизолировался.

На рис. 3 представлена схема экспериментальной установки СВО. Циркуляция воды в системе обеспе-

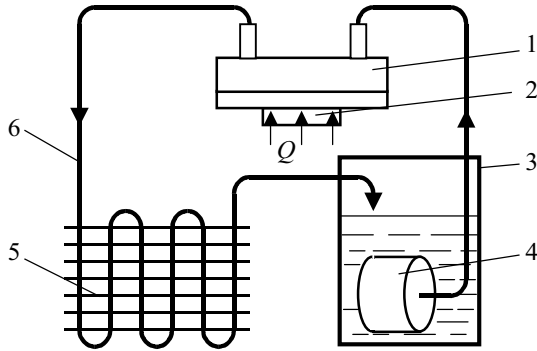


Рис. 3. Схема экспериментальной установки СВО: 1 — первичный теплообменник; 2 — имитатор процессора; 3 — емкость с водой; 4 — помпа; 5 — вторичный теплообменник (радиатор); 6 — соединительные шланги

чивалась помпой погружного типа AquaEl Pat Midi. Радиатор вторичного теплообменника позволял отводить при естественной конвекции до 2 кВт тепловой энергии. Расход воды через систему (G) измерялся с помощью мерной емкости и поддерживался в течение эксперимента постоянным.

В результате проведенных экспериментов были получены зависимости температуры поверхности в зоне контакта имитатора процессора с первичным теплообменником ($t_{пр}$) от величины отводимой мощности (Q). На рис. 4 приведены такие зависимости для теплообменников различных конструкций, выполненных из сплава Д16Т.

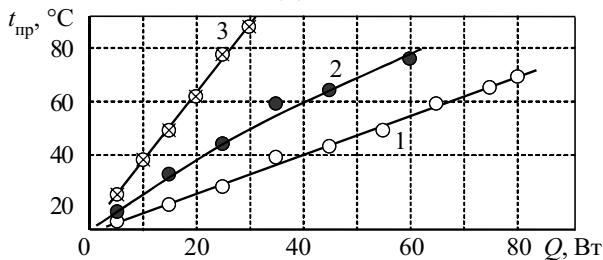


Рис. 4. Зависимость $t_{пр}$ от Q для теплообменников различных конструкций ($G=55$ мл/с): 1 — с шипами; 2 — с продольными каналами; 3 — гладкая поверхность

Как видно из рисунка, наилучший теплосъем обеспечивает теплообменник с внутренним оребрением в виде шипов: при температуре 60°C , максимально допустимой для корпуса процессора, его эффективность в 2 раза выше, чем теплообменника с каналами, и почти в 4 раза выше, чем с гладкой внутренней поверхностью.

Рассчитаем средние коэффициенты теплоотдачи внутри теплообменников, используя зависимость

$$\alpha = \frac{Q}{F_{ст}(\bar{t}_{ст} - \bar{t}_{ж})},$$

где Q — отводимый тепловой поток;
 $F_{ст}$ — площадь внутренней поверхности теплообменника;
 $\bar{t}_{ст}$, $\bar{t}_{ж}$ — средние температуры стенки и жидкости внутри теплообменника.

Площадь внутренней поверхности теплообменника без оребрения составляет $1,3 \cdot 10^{-3} \text{ м}^2$, а с каналами и с шипами примерно одинакова и равна $3,6 \cdot 10^{-3} \text{ м}^2$.

Средняя температура жидкости $\bar{t}_{ж}$ находилась по показаниям термопар на входе в теплообменник и выходе из него.

По данным термопар на наружной стенке теплообменника со стороны подвода теплоты определялась ее средняя температура $\bar{t}_{нар}$. Затем рассчитывалась средняя температура внутренней стенки.

Для теплообменника без оребрения

$$\bar{t}_{ст} = \bar{t}_{нар} - \frac{Q\delta}{\lambda F_{ст}},$$

где δ — толщина стенки;
 λ — коэффициент теплопроводности материала теплообменника.

Расчеты показали, что перепад температуры по толщине стенки теплообменника из сплава Д16Т при максимальном тепловом потоке 80 Вт не превышает $0,6^\circ\text{C}$. Для медного теплообменника этот перепад еще меньше. Поэтому с достаточной для практики степенью точности можно для теплообменника без оребрения принимать показания термопар на внешней стороне за температуру внутренней поверхности.

Среднюю температуру стенки внутри оребренного теплообменника можно определить следующим образом.

Тепловой поток, передаваемый жидкости через шипы высотой l квадратного поперечного сечения со стороны b , можно рассчитать по формуле [12, с. 52]

$$Q_{ш} = (\bar{t}_{ст} - \bar{t}_{ж}) \lambda b \sqrt{\frac{4\alpha}{\lambda b}} \operatorname{th} \left(l \sqrt{\frac{4\alpha}{\lambda b}} \right).$$

То же самое для ребер площадью F_p , толщиной b и высотой l определится как [12, с. 53]

$$Q_p = \alpha (\bar{t}_{ст} - \bar{t}_{ж}) F_p \frac{\operatorname{th} \left(\frac{l}{b} \sqrt{2 \frac{\alpha b}{\lambda}} \right)}{\frac{l}{b} \sqrt{2 \frac{\alpha b}{\lambda}}}.$$

Общий тепловой поток Q включает в себя также поток через межреберное пространство, который можно рассчитать, решая сопряженную задачу с учетом теплообмена на ребрах или шипах. Поскольку коэффициенты теплоотдачи на разных участках поверхности (шипы, ребра, межреберное пространство) имеют разные значения, то в нашем случае при известной величине Q можно путем последовательных приближений, задавая значения коэффициентов теплоотдачи, найти $\bar{t}_{ст}$ и затем рассчитать средний коэффициент теплоотдачи.

Расчеты показали, что наибольшая интенсивность теплообмена наблюдается у поверхности с шипами (рис. 5). У поверхности с продольными каналами коэффициенты теплоотдачи примерно в два раза ниже. Это можно объяснить тем, что в теплообменнике с шипами жидкость подвергается большей турбулизации, нежели при течении ее в продольных каналах.

На рис. 6, а показано изменение скорости потока (W) по всей длине теплообменника — от входного патрубка до выходного (рис. 6, б). Внутри теплообменников с гладкой поверхностью и с шипами скорость потока меняется по одному и тому же закону.

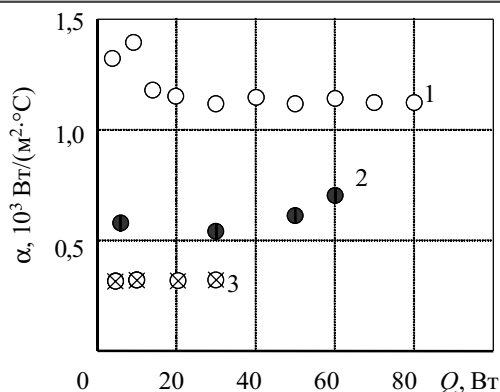


Рис. 5. Зависимость α от Q внутри теплообменников различных конструкций ($G = 55$ мл/с): 1 — с шипами; 2 — с продольными каналами; 3 — гладкая поверхность

Однако в теплообменнике с шипами скорость в центральной его части (т. е. там, где необходима наибольшая интенсивность теплосъема) значительно выше, чем у гладкого, т. к. из-за шипов сужается поперечное сечение. У теплообменника с каналами наблюдается другая картина изменения скорости, т. к. каналы выполнены расширяющимися от входа к выходу. Средняя скорость потока здесь несколько выше, чем в двух других конструкциях. Однако, как было показано ранее, более эффективной является все же поверхность с шипами. Видимо, в процессе отвода тепла более весомым фактором является не скорость, а турбулизация потока, которая значительно интенсифицирует процесс теплообмена.

Проанализируем, как влияет на теплообмен материал, из которого изготовлен теплообменник.

Тепловой поток от процессора передается через стенку первичного теплообменника к движущейся жидкости. Термическое сопротивление стенки рассчитывается по формуле

$$R_{ct} = \delta / (\lambda F),$$

где F — площадь теплоотвода.

При одинаковых геометрических размерах значение R_{ct} медного теплообменника примерно в два раза ниже, чем теплообменника из сплава Д16Т.

С другой стороны, термическое сопротивление между стенкой и потоком жидкости

$$R_{\alpha} = 1 / (\alpha F).$$

Для рассмотренных конструкций теплообменников получено: для поверхности с шипами $R_{\alpha} = 0,64^{\circ}\text{C}/\text{Вт}$; с каналами — $R_{\alpha} = 1,28^{\circ}\text{C}/\text{Вт}$; с гладкой поверхностью — $R_{\alpha} = 2,56^{\circ}\text{C}/\text{Вт}$; для медной поверхности $R_{ct} = 0,004^{\circ}\text{C}/\text{Вт}$; для сплава Д16Т — $R_{ct} = 0,009^{\circ}\text{C}/\text{Вт}$. Очевидно, что вклад R_{ct} в общее термическое сопротивление очень мал, а следовательно, и несущественно влияние материала стенки на теплопередающие ха-

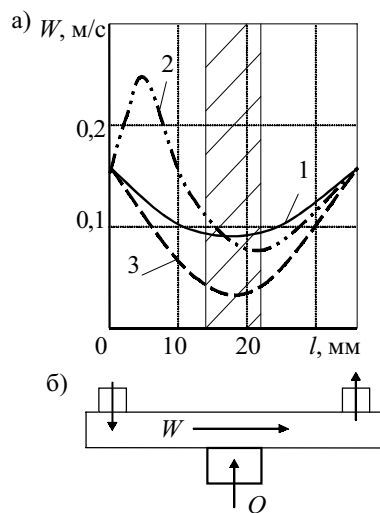


Рис. 6. Изменение скорости движения воды (а) внутри теплообменников (б) различных конструкций ($G = 20$ мл/с): 1 — с шипами; 2 — с продольными каналами; 3 — гладкая поверхность

рактеристики. Этот вывод подтвердился и в экспериментах: теплопередающие характеристики теплообменников одинаковой конструкции из сплава Д16Т и меди практически не отличались друг от друга.

Таким образом, проведенное исследование показало, что системы водяного охлаждения способны отводить значительные тепловые нагрузки и обеспечивать необходимый температурный режим работы мощного процессора. Одним из эффективных конструктивных решений первичного теплообменника является внутреннее оребрение в виде шипов. Дальнейшие работы по оптимизации ребристой поверхности позволят значительно снизить температурный режим процессора при увеличении выделяемой мощности.

Исследованная система водяного охлаждения успешно прошла апробирование на реальных персональных компьютерах с процессорами мощностью до 60 Вт.

ИСПОЛЬЗОВАННЫЕ ИСТОЧНИКИ

1. Федасюк Д. В. Методи та засоби теплового проектування мікроелектронних пристроїв.— Львів: Вид-во ДУ “Львівська політехніка”, 1999.
2. www.3dnews.ru/cooling/zalman-6500B-CU/
3. Асмаков С. Системы охлаждения: переходим к водным процедурам // Компьютер пресс.— 2002.— № 1.— С. 123—125.
4. www.thermaltake.com/products/AquariusII/aquariusII.htm
5. www.ixbt.com/cpu/3rsystem-poseidon-nov2k2.shtml
6. www.ixbt.com/cpu/infinipro-aquacool.shtml
7. www.3dnews.ru/reviews/mainsystem/watercool/
8. www6.tomshardware.com/cpu/02q1/020102/watercooling-05.html
9. Пат. 59101 А України. Охолоджувач процесорів електронних пристроїв / Тютюнник Д. М., Пархоменко Г. О.— 2003.— Бюл. № 8.
10. www.amd.com/us-en/assets/content_type/white_papers_and_tech_docs/24310.pdf
11. [ftp://download.intel.com/design/Pentium4/datashts/29864310.pdf](http://download.intel.com/design/Pentium4/datashts/29864310.pdf)
12. Исаченко В. П., Осипова В. А., Сукомел А. С. Теплопередача.— М.: Энергия, 1975.