

Д. ф.-м. н. Л. А. БУЛАВИН, Т. Ю. НИКОЛАЕНКО,
к. т. н. Ю. Е. НИКОЛАЕНКО

Украина, Киевский национальный университет им. Тараса Шевченко
E-mail: nikol@industry.gov.ua

Дата поступления в редакцию
24.09 2004 г.

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

ИССЛЕДОВАНИЕ ПРОВОЛОЧНОГО РАДИАТОРА С ТЕПЛОВЫМИ ТРУБАМИ ДЛЯ СРЕДСТВ ВЫЧИСЛИТЕЛЬНОЙ ТЕХНИКИ

Предлагаемая конструкция радиатора позволяет существенно увеличить площадь поверхности проволочных ребер без снижения их эффективности.

Современные и перспективные средства высокопроизводительной вычислительной техники и управления реализуются на основе сотен и даже нескольких тысяч серийно выпускаемых микропроцессоров. Так, например, японская суперЭВМ "Earth Simulator", занимавшая в 2002 г. первую строку в мировом списке Top500, состоит из 5120 векторных процессоров NEC SX-6, американский суперкомпьютер ASCI/Alpha Server SC 45, занимающий в последней редакции этого списка третье место, состоит из 8192 высокопроизводительных процессоров, а российская кластерная суперЭВМ МВС-1000М содержит 768 процессоров Alpha 21264 [1, 2]. Высокие значения мощности тепловыделений, рассеиваемой суперкомпьютерами (например, в одном кластере МВС-1000/X-32 рассеивается около 5 кВт тепла [3]), и большая плотность теплового потока современных микропроцессоров (100 Вт/см² и выше) требуют применения эффективных систем охлаждения.

Наиболее распространенными системами охлаждения для микропроцессоров вычислительных средств остаются принудительные воздушные системы охлаждения с использованием ребристых радиаторов из теплопроводного материала с закрепленными на них вентиляторами [4]. В большинстве случаев ребра радиатора выполняются в виде тонких пластин. При увеличении высоты пластин увеличивается их термическое сопротивление, что приводит к снижению эффективности охлаждения.

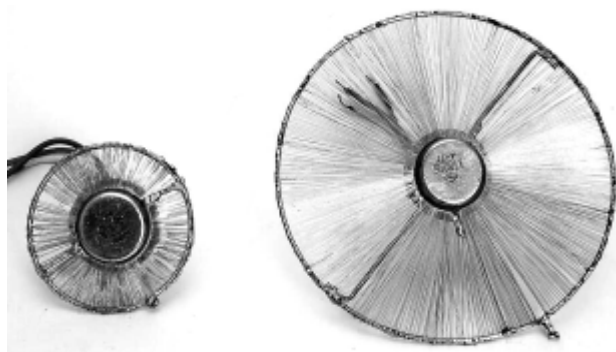


Рис. 1. Проволочный радиатор [6]

Проведенные в [5, 6] исследования показали высокую эффективность представленного на рис. 1 проволочного радиатора. Среднее значение коэффициента теплоотдачи такого радиатора с использованием медных проволочек диаметром 0,12 мм достигает 53,4 Вт/(м²·°С) при естественной конвекции и 368 Вт/(м²·°С) при обдуве воздухом со скоростью 0,29 м/с, что значительно выше, чем у пластинчатого и у проволочного с диаметром проволоки 0,5—1 мм [6]. Вместе с тем повышать значение отводимой мощности радиаторов такой конструкции можно только путем увеличения его площади (диаметра). Но это имеет смысл лишь до некоторых значений, т. к. увеличение диаметра означает удлинение теплоотводящих участков проволоки и, следовательно, рост их термического сопротивления.

Избежать этого недостатка можно путем подведения теплоты от основания радиатора к большому количеству относительно коротких участков проволоки с помощью высокоэффективных теплопередающих устройств — тепловых труб, что позволит существенно развить поверхность теплоотдачи проволочного радиатора.

В данной работе исследован макет такого радиатора [7] на основе двух тепловых труб (рис. 2).

Исследования проводились в два этапа: на первом изучались основные рабочие характеристики каждой тепловой трубы без проволочного оребрения, на втором — теплопередающие характеристики проволочного радиатора в целом.

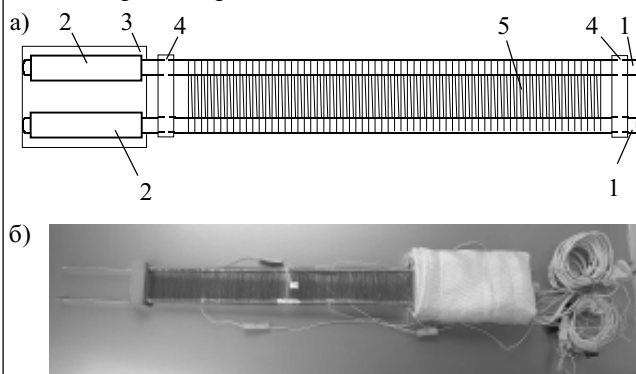


Рис. 2. Макет проволочного радиатора с тепловыми трубами:

а — устройство макета; б — внешний вид
1 — тепловые трубы; 2 — имитаторы тепловыделяющих элементов (нагреватели); 3 — основание для установки тепловыделяющих элементов; 4 — планки; 5 — медная проволока

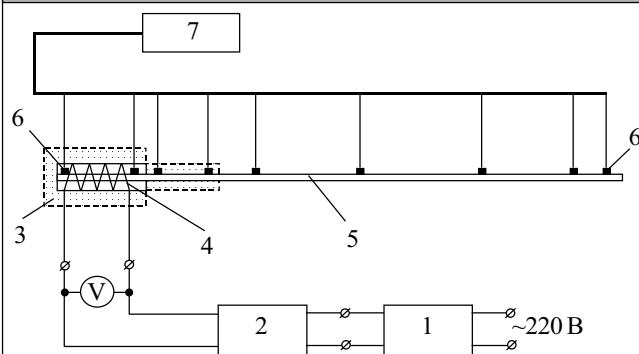


Рис. 3. Схема экспериментальной установки: 1 — лабораторный трансформатор типа РНО-250-2А (220 В, 9 А); 2 — блок выпрямителя; 3 — теплоизоляция; 4 — нагреватель; 5 — тепловая труба; 6 — термопары; 7 — цифровой прибор для измерения температуры типа ЦР 7701-02

Схема экспериментальной установки приведена на рис. 3.

Рабочий участок установки представляет собой основание с жестко укрепленным металлическим штативом с горизонтальной планкой, к которой с помощью двух нитей поочередно подвешивались исследуемые объекты — тепловые трубы на первом этапе и проволочный радиатор на их основе — на втором. Изменением длины нитей устанавливалось положение объекта (горизонтальное либо под заданным углом).

Тепловые трубы для макета были изготовлены в лаборатории тепловых труб НТУУ «КПИ». Длина каждой тепловой трубы составляла 500 мм, внешний диаметр — 6 мм. Капиллярная структура спечена из отрезков медной проволоки длиной 3 мм, диаметром 50 мкм. Толщина слоя капиллярной структуры — 0,45 мм, пористость — 87%, теплоноситель — дистиллированная вода в объеме 3 см³.

Каждая тепловая труба на расстоянии 8 мм от конца была оснащена имитатором тепловыделяющего элемента — электрическим нагревателем длиной 67 мм с электрическим сопротивлением 82 Ом. Зона транспортирования имела длину 75 мм, зона конденсации — 350 мм. Поскольку нагреватели и транспортная зона каждой тепловой трубы были покрыты слоем теплоизоляции из стеклоткани и асбеста, можно считать, что все тепло, выделяемое нагревателем, рассеивается зоной конденсации.

Проволочный радиатор представлял собой каркас из двух тепловых труб, зафиксированных на расстоянии 38 мм друг от друга. На участок каркаса длиной 350 мм было намотано 1530 витков медной проволоки диаметром 0,12 мм. С целью обеспечения надежного теплового контакта каждый виток проволоки вокруг двух тепловых труб чередовался с дополнительным витком вокруг каждой тепловой трубы. Площадь эффективной теплорассеивающей поверхности составляла 836 см².

Обдув радиатора обеспечивался следующим образом. Был изготовлен короб (44×7,5×33 см) с прямоугольным отверстием в верхней грани (36×5,5 см), который устанавливали непосредственно под зоной отвода тепла. Нагнетание воздуха в короб осуществлялось через боковое отверстие с помощью бытового пылесоса (скорость воздуха на выходе составляла 1,1 м/с).

Измерение температурного поля тепловой трубы (ТТ) осуществлялось с помощью 9 хромель-алюмелевых термопар и цифрового прибора для измерения температуры ЦР 7701-02. По две термопары было установлено в зоне нагрева и зоне транспортирования, 5 термопар — в зоне конденсации.

Измерения проводились в диапазоне мощности нагревателя 2,46...24,6 Вт и углах наклона ТТ к горизонту от +90° до -45° (знак «+» означает, что зона конденсации находится выше зоны испарения). При горизонтальном положении тепловых труб и проволочного радиатора на их основе распределения температуры получены в условиях естественной и принудительной конвекции.

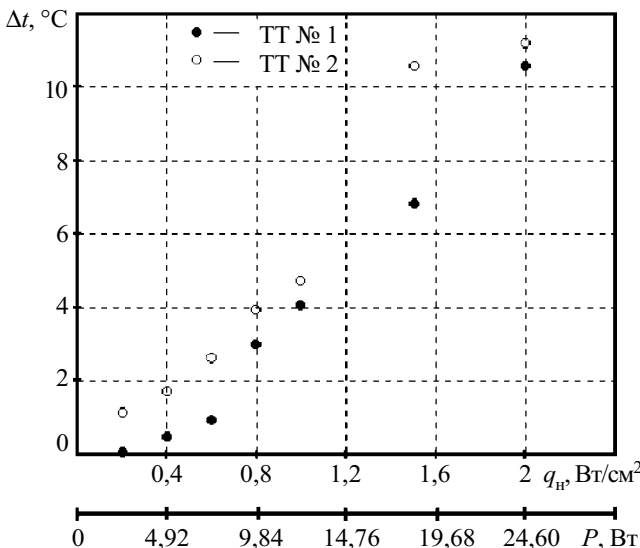


Рис. 4. Зависимость перепада температуры Δt по длине ТТ в горизонтальном положении при естественной конвекции от плотности теплового потока q_n (мощности нагревателя P)

На первом этапе определялся перепад температуры (Δt) по длине каждой тепловой трубы при различных значениях плотности теплового потока в зоне нагрева q_n (рис. 4). Полученные результаты показали, что Δt возрастает почти линейно с возрастанием мощности нагревателя P и достигает максимума в 11,2°С при $P=24,6$ Вт.

Чтобы оценить преимущества использования тепловых труб в качестве теплопровода, согласно закону Фурье были рассчитаны значения Δt для медного стержня и медной трубки (диаметром 6 мм и длиной 15 см, равной длине теплоизолированного участка тепловой трубы). Было показано, что перепад температуры по длине стержня и трубки в 58 и в 203 раза выше, чем для ТТ.

Исследования температурного поля каждой тепловой трубы в горизонтальном положении показали высокую степень его равномерности при мощности нагревателя до 12,3 Вт. При более высоких мощностях теплопровода наблюдалось резкое изменение температуры в конце зоны конденсации тепловых труб, что наиболее характерно проявилось при максимальном значении $P=24,6$ Вт (рис. 5). Как показал анализ возможных причин, этот участок был заблокирован избытком жидкого теплоносителя, обусловленного перезаправкой.

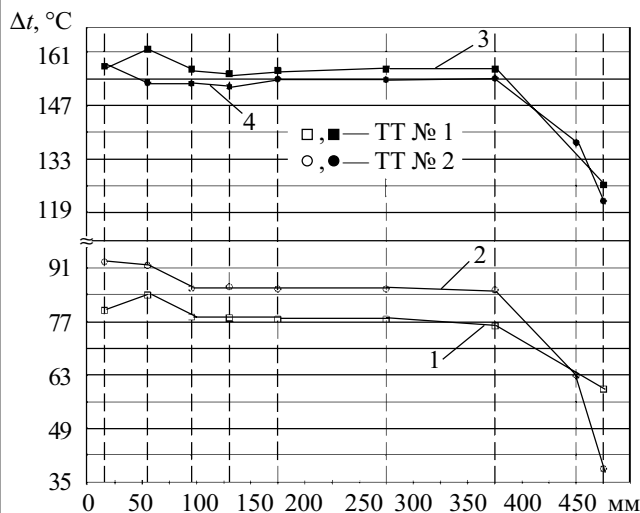


Рис. 5. Распределение температуры поверхности тепловых труб по длине в горизонтальном положении при $P = 24,6$ Вт: 1, 2 — принудительная конвекция; 3, 4 — естественная конвекция

На рис. 5 показано распределение температуры по длине ТТ в условиях естественной и принудительной конвекции при $P = 24,6$ Вт. Из рисунка видно, что применение принудительной конвекции воздуха со скоростью 1,1 м/с позволило снизить температурное поле ТТ почти в два раза.

Проведенные исследования подтвердили работоспособность тепловых труб при отрицательном влиянии сил гравитации, т. е. при таких положениях, когда зона нагрева находится выше зоны конденсации (рис. 6).

На втором этапе исследований для измерения температурного поля проволочного радиатора на его макете было закреплено 10 термопар: по две термопары в зоне нагрева и в зоне конденсации (на расстоянии 9 см от начала и конца проволочного оребрения) каждой тепловой трубы и по одной термопаре на проволоке в середине оребрения и напротив нее на одной из тепловых труб (№1).

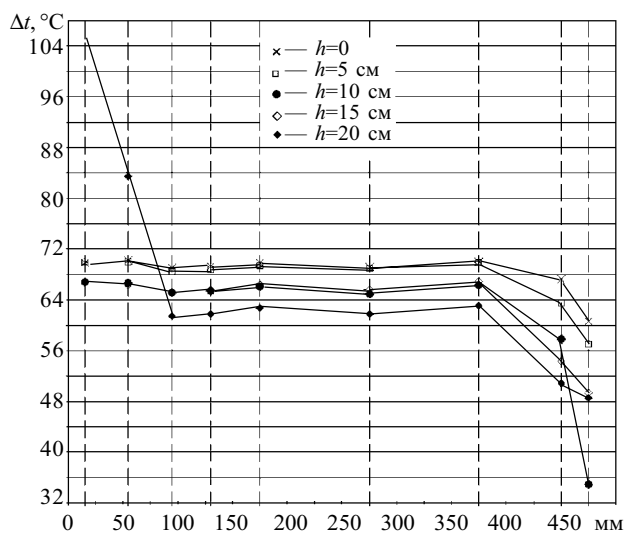


Рис. 6. Распределение температуры поверхности ТТ № 2 по длине при различных значениях высоты h превышения зоны нагрева над зоной конденсации при $P = 7,4$ Вт

Средние значения температуры в зонах нагрева (t_n) и конденсации (t_k) и перепада температуры по длине радиатора ($\Delta t_{рад}$) при различных значениях подводимой мощности

$P_{рад}$, Вт	4,9	9,9	14,8	19,7	24,5	36,9	49,2	49,2*
t_n , °C	35,3	44,2	51,5	60,2	67,7	85,5	106,5	61,1
t_k , °C	34,2	42,4	48,5	55,6	62,0	77,1	95,6	53,7
$\Delta t_{рад}$, °C	1,1	1,8	3,0	4,6	5,7	8,4	10,9	7,4

* — Принудительная конвекция

Температурное поле радиатора измерялось при подведении одинаковой электрической мощности P одновременно на оба нагревателя (при этом поверхностью радиатора рассеивается суммарная мощность двух нагревателей $P_{рад} = 2P$) при его горизонтальном положении в условиях естественной и принудительной конвекции воздуха [см. таблицу].

Исследования показали, что при мощности каждого нагревателя $P = 24,6$ Вт среднее значение температуры в зоне нагрева тепловых труб без проволочного оребрения составило $159,5^\circ\text{C}$ для ТТ № 1, $155,5^\circ\text{C}$ для ТТ № 2 и $106,5^\circ\text{C}$ для радиатора. То есть использование проволочного радиатора вместо тепловых труб позволило на треть снизить среднее значение температуры зоны нагрева при подводимой мощности 49,2 Вт.

Выводы

Таким образом, одним из путей повышения эффективности отвода тепла от элементов и устройств средств вычислительной техники и управления может быть использование предлагаемых проволочных радиаторов, площадь теплорассеивающей поверхности которых можно наращивать увеличивая длину тепловых труб и общую длину проволоки.

Дальнейшие исследования проволочных радиаторов на основе тепловых труб следует проводить в направлении разработки конкретных конструктивных решений охлаждения, выбора наиболее рационального шага навивки проволоки на тепловые трубы и выбора диаметра проволоки исходя из критерия повышения коэффициента теплоотдачи.

ИСПОЛЬЗОВАННЫЕ ИСТОЧНИКИ

1. Аладышев О. С., Дикарев Н. И., Овсянников А. П. и др. СуперЭВМ: области применения и требования к производительности // Изв. вузов. Электроника. — 2004. — № 1. — С. 13—17.
2. Опубликована 23-я редакция TOP 500. Китай врывается в суперкомпьютерную элиту // Электроника: НТБ. — 2004. — № 4. — С. 49.
3. Левин В. К. Создание и применение суперкомпьютеров в России (современность и ближайшая перспектива) // Радиоэлектроника и управление. — 2003. — № 7—9. — С. 61—62.
4. Макаров С. Процессорные кулеры: летнее изобилие // Компьютерное обозрение. — 25 июля 2001. — № 29. — С. 17—22.
5. Бочкарев Э. Г., Андреев В. М., Тузовский К. А. и др. Эффект гигантской теплоотдачи телами субмиллиметровых размеров // Доклады Академии наук. — 1999. — Т. 366, № 2. — С. 178—180.
6. Хольвинская Л. М., Николаенко Т. Ю., Николаенко Ю. Е. Исследование эффективности проволочного радиатора новой конструкции // Технология и конструирование в электронной аппаратуре. — 2003. — № 5. — С. 28—32.
7. Пат. 65287А Украины. Дротяний радіатор // Т. Ю. Николаенко, Ю. С. Николаенко, Л. М. Хольвинська. — 2004. — Бюл. № 3.