

К. т. н. Ю. Е. НИКОЛАЕНКО

Украина, г. Киев, Министерство промышленной политики
E-mail: nikol@industry.gov.ua

Дата поступления в редакцию
25.08 2005 г.

Оппонент к. т. н. А. О. КОСТИКОВ
(ИПМ им. А. И. Подгорного, г. Харьков)

АППАРАТНОЕ ПОСТРОЕНИЕ ВЫСОКОПРОИЗВОДИТЕЛЬНЫХ ВЫЧИСЛИТЕЛЬНЫХ СИСТЕМ С ПОВЫШЕННОЙ ЭФФЕКТИВНОСТЬЮ ТЕПЛООТВОДА

При построении суперкомпьютеров предлагается использование приборных шкафов с водяным охлаждением, содержащих в теплопередающем тракте коллекторы из тепловых труб.

Потребность в высокопроизводительных цифровых вычислительных системах (суперкомпьютерах) из года в год возрастает [1, 2]. Это обусловлено необходимостью накопления и обработки все большего количества информации, решения все более сложных задач моделирования различных явлений и процессов.

Современные и перспективные суперкомпьютеры реализуются на основе сотен, а некоторые и тысяч, серийно выпускаемых микропроцессоров. Так, например, японская суперЭВМ "Earth Simulator" состоит из 5120 векторных процессоров NEC SX-6, американский суперкомпьютер ASCI/Alpha Server SC 45 — из 8192 процессоров, а российская кластерная суперЭВМ МВС-1000М содержит 768 процессоров Alpha 21264 [2, 3]. Значительная мощность тепловыделения, рассеиваемая суперкомпьютерами (например, в одном кластере МВС-1000/X-32 рассеивается около 5 кВт тепла [4]), и высокие значения плотности теплового потока современных микропроцессоров (порядка 100 Вт/см²) требуют применения эффективных систем охлаждения, что необходимо учитывать при выработке подходов к аппаратному построению перспективных суперкомпьютеров.

При построении мощных ЭВМ на основе современных процессоров чаще всего используется принцип компоновки функционально законченных модулей и кластеров в базовых несущих конструкциях (БНК) второго и третьего уровня, соответственно. С уменьшением массогабаритных характеристик элементной базы и увеличением плотности компоновки увеличивается количество теплоты, рассеиваемой в единице объема БНК. Без эффективной системы отвода тепла это приводит к повышению температуры элементов и снижению надежности работы модулей и вычислительной системы в целом. В связи с этим разработка физико-технических основ аппаратного построения суперкомпьютеров с повышенной эффективностью теплоотвода является весьма актуальной проблемой.

С целью обеспечения теплового режима электронных элементов (процессоров, БИС, СБИС и др.)

в состав БНК включают специальные элементы и устройства, предназначенные для отвода теплоты. Наиболее широкое распространение в силу своей простоты получили автономные и централизованные системы воздушного охлаждения. Они представляют собой встроенные в БНК третьего и второго уровня воздуховоды, каналы и отверстия, по которым продувается охлаждающий воздух, а также конструктивные элементы, улучшающие передачу теплоты от нагретых элементов к воздуху (металлические шины, теплопроводящие подложки плат и радиаторы). Для автономного охлаждения мощных процессоров к ним присоединяют индивидуальные радиаторы с вентиляторами (кулеры).

Поскольку конечной средой, поглощающей теплоту в таких системах охлаждения, является воздух, то их эффективность крайне ограничена. Кроме того, использование серийных процессоров с массивными радиаторами со встроенными вентиляторами приводит к существенному росту массогабаритных характеристик системы и создает повышенный уровень шумов.

Наиболее перспективными системами охлаждения вычислительных систем являются жидкостные [5, с. 40, 46]. Обеспечение жидкостного охлаждения съемных функциональных модулей и приборных шкафов осуществляется встраиванием в их БНК теплообменных пластин, плит, полок, межсекционных перегородок и других конструктивных элементов, по внутренним каналам которых прокачивают охлаждающую жидкость (воду, фреон). Внутренние каналы чаще всего выполняют в виде змеевиков [6, с. 181—183; 7, с. 355—358]. Передачу теплоты от функциональных модулей к охлаждаемому жидкостью конструктивным элементам приборного шкафа осуществляют с помощью теплопроводящих элементов конструкции модулей.

Использование жидкостного охлаждения вместо воздушного позволяет приблизительно на порядок увеличить количество теплоты, рассеиваемой одним приборным шкафом.

Недостатком таких схем теплоотвода является значительное гидравлическое сопротивление жидкостного тракта, обусловленное большим количеством ответвлений, поворотов, сужений, расширений и др., что требует дополнительных затрат энергии извне на прокачку теплоносителя.

Целью настоящего исследования является поиск новых подходов к аппаратному построению супер-

компьютеров, позволяющих использовать энергию отводимых от функциональных модулей тепловых потерь для интенсификации процессов теплопередачи в системе, и разработка на этой основе перспективных БНК с повышенной эффективностью теплоотвода.

В работе [8] впервые было предложено использовать в теплопередающем тракте приборного шкафа с жидкостным охлаждением эффект тепловых труб. Для этого в отдельных конструктивных элементах БНК были выполнены закрытые вакуумированные полости, стенки которых покрыты слоем капиллярной структуры, пропитанной жидким теплоносителем. Это позволило реализовать в таких конструктивных элементах высокоэффективный замкнутый испарительно-конденсационный цикл передачи теплоты от нагреваемых участков конструктивного элемента к наиболее холодным. Выравнивание температуры пара по полости конструктивного элемента обеспечивает равномерность температуры по всей его поверхности, а процессы испарения и конденсации теплоносителя в зонах подвода и отвода теплоты характеризуются высокими значениями коэффициентов теплоотдачи. Поддержание испарительно-конденсационного цикла передачи теплоты осуществляется за счет внутренней энергии системы в виде части утилизируемых тепловых потерь функциональных блоков. Высокая эффективная теплопроводность таких конструктивных эле-

ментов БНК позволяет существенно снизить суммарный перепад температуры по их длине по сравнению с металлическими теплопередающими элементами. За счет этого снижается общий перепад температуры между тепловыделяющим элементом и охлаждающей жидкостью.

Для реализации предложенного подхода в металлических полках шкафа были выполнены параллельные цилиндрические каналы, герметично закрытые с обоих концов стаканами, выходящими в вертикальные полости боковых стенок шкафа. Поверхности каждого канала и закрывающих его стаканов изнутри покрыты общим слоем капиллярной структуры, пропитанной жидким теплоносителем (дистиллированной водой, аммиаком, спиртом и др.). Капиллярная структура может быть выполнена в виде спеченных металлических порошков или волокон, в виде канавок или нескольких слоев металлической сетки. Перед заполнением теплоносителем полости каналов вакуумируются.

Другим вариантом выполнения предложенной схемы является встраивание в полки шкафа прямых цилиндрических тепловых труб (ТТ) с обеспечением надежного теплового контакта (рис. 1, а).

Тепловыделяющие функциональные модули устанавливаются в секции шкафа между полками и соединяют теплоотдающие периферийные участки модуля тепловым разъемом с поверхностью одной или двух полок. Отводимое тепло передается к теплорассеи-

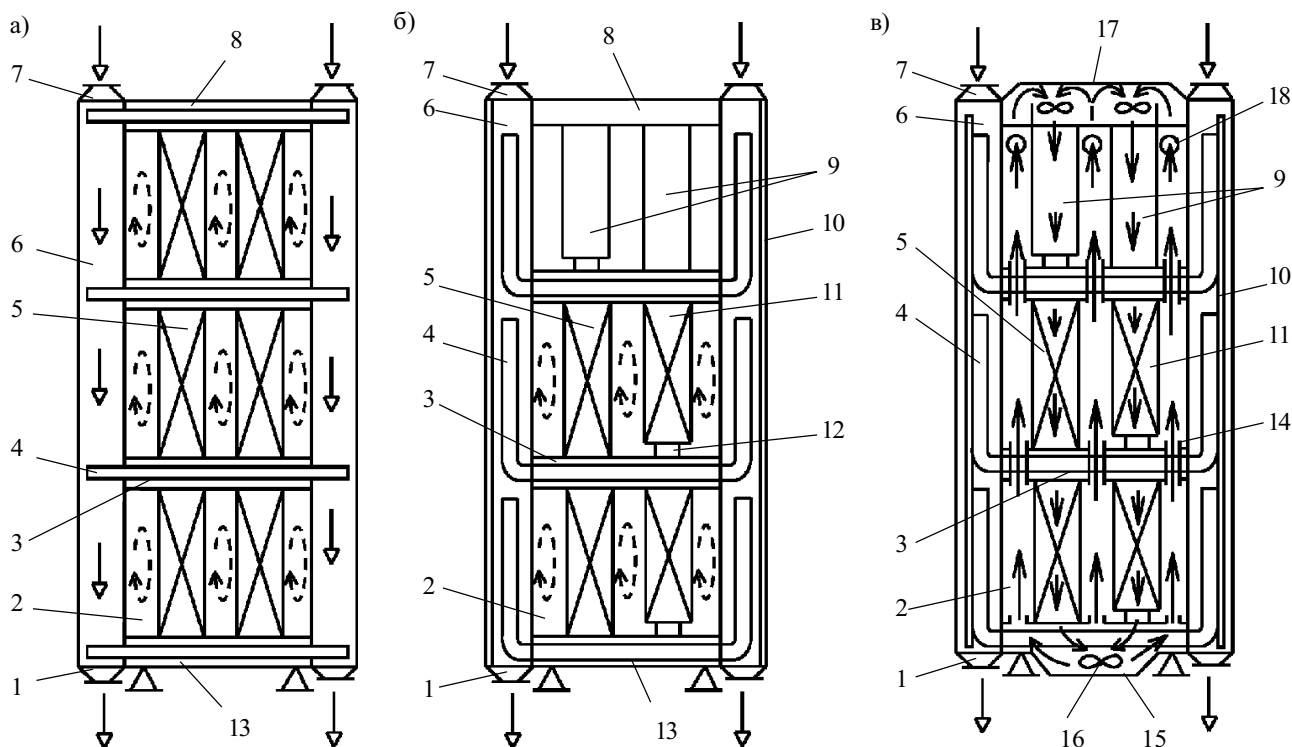


Рис. 1. Схемы БНК третьего уровня на основе прямых ТТ (а), U-образных ТТ (б) и U-образных ТТ с дополнительной продувкой секций шкафа воздухом (в):

1 — выходной фланец жидкостного канала; 2 — секция шкафа; 3 — межсекционная перегородка (полка); 4 — тепловая труба; 5 — тепловыделяющий модуль с двусторонним отводом теплоты; 6 — канал в боковой стенке шкафа для охлаждающей жидкости; 7 — входной фланец жидкостного канала; 8 — верхнее основание; 9 — нетепловыделяющие модули; 10 — паровая камера; 11 — тепловыделяющий модуль с односторонним отводом теплоты; 12 — устройство прижима; 13 — нижнее основание; 14 — вентиляционные отверстия в межсекционной перегородке (полке); 15 — нижний короб; 16 — вентилятор; 17 — верхний короб; 18 — отверстие в задней стенке верхней секции

↺, ↻, → — воздух (естественная и принудительная конвекция, соответственно); —▷ — жидкость

вающим наружным поверхностям стаканов, расположенным в вертикальных полостях боковых стенок приборного шкафа. По полостям стенок прокачивается охлаждающая жидкость (вода), которая и поглощает переданную ей теплоту.

Поскольку эти полости не сообщаются с горизонтальными каналами полок, уменьшается общая длина охлаждающих каналов и исключаются их повороты, входные и выходные участки, сужения и расширения. Расчеты показывают, что гидравлическое сопротивление восьмисекционного приборного шкафа с предложенной схемой теплоотвода при расходе охлаждающей жидкости 0,24 кг/с и шахматном расположении стаканов в полостях боковых стенок составляет 20 Па. В то же время у известного приборного шкафа с воздушно-жидкостным охлаждением с прокачкой охлаждающей жидкости по зигзагообразным каналам полок при одинаковых прочих условиях оно равно $1,5 \cdot 10^5$ Па, а у приборного шкафа с прокачкой жидкости по параллельным каналам полок — 1000 Па.

Максимальная эффективность теплоотвода схемы с прямыми тепловыми трубами ограничена размерами теплоотдающей поверхности стаканов, что связано с типовыми размерами боковых стенок и полок шкафа. Кроме того, охлаждающая жидкость в полостях боковых стенок шкафа подогревается по мере прохождения от одной полки к другой. Это может привести к неравномерному нагреву элементов однотипных функциональных модулей, расположенных в приборном шкафу в разных секциях.

На рис. 1, б приведена схема усовершенствованной БНК с тепловыми трубами U-образной формы и вертикальными паровыми камерами в полостях боковых стенок [9]. Это позволило развить теплоотдающую поверхность тепловых труб и выровнять температуру охлаждающей жидкости по высоте жидкостного канала.

При аппаратном построении некоторых типов суперкомпьютеров целесообразным может оказаться использование схемы БНК, предусматривающей дополнительную продувку секций шкафа с модулями потоком охлаждающего воздуха (рис. 1, в). Такая



Рис. 2. Внешний вид ТТ

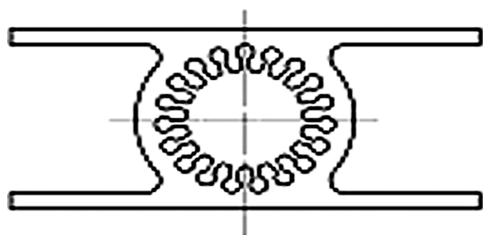


Рис. 3. Сечение ТТ

схема может найти применение в суперкомпьютерах, функциональные модули которых наряду с мощными элементами содержат значительное количество относительно маломощных элементов, чувствительных к перегреву (например конденсаторов).

Для экспериментальной оценки максимального количества отводимой теплоты разработаны макеты восьмисекционного приборного шкафа, каждая теплоотводящая полка которого состоит из семи тепловых труб U-образной формы. Были использованы тепловые трубы, изготовленные в лаборатории тепловых труб НТУУ «КПИ» (рис. 2, 3). Корпус тепловой трубы выполнен из алюминиевого профиля АС-КРА 7,5-Р2, ТУ 550.1-02070921.007-03. Капиллярная структура выполнена в виде 19 аксиальных канавок диаметром 1,1 мм, сообщающихся с общим паровым пространством ТТ. Внешний диаметр ТТ — 14 мм, размеры полок на испарительном участке — 30×420 мм, на конденсационном — 30×160 мм.

Были исследованы рабочие характеристики тепловых труб, заправленных аммиаком и ацетоном. Максимальный перепад температуры по длине ТТ с ацетоном составил 13°C при максимальной передаваемой мощности 300 Вт, для ТТ с аммиаком — 4,5°C при передаваемой мощности 500 Вт. Зона конденсации ТТ охлаждалась водой с температурой 18°C.

Исследования показали, что наиболее эффективным теплоносителем является аммиак, обеспечивающий теплоотвод 3500 Вт от одной полки шкафа, состоящей из семи ТТ, а от шкафа из восьми секций (семь теплоотводящих полок) — 24500 Вт.

Анализ существующих конструктивных схем БНК второго уровня и разработка новых перспективных схем на основе эффекта тепловых труб подробно изложены в [10]. На рис. 4 приведены рекомендованные для использования в перспективных вычислительных системах схемы БНК второго уровня. Наиболее предпочтительной с точки зрения эффективности теплоотвода и обеспечения эксплуатационной надежности является схема с использованием секционной коллекторной тепловой трубы (рис. 4, б). Отличие этой схемы от схемы с коллекторным термосифоном (рис. 4, а) состоит в том, что собирающий коллектор тепловой трубы разделен герметичными перегородками на отдельные секции по количеству испарительных каналов. Это дает возможность использовать, как и в предыдущей схеме, развитую поверхность зоны конденсации и теплового разъема и одновременно исключить неравномерное перераспределение теплоносителя между отдельными испарительными каналами.

Полученные в результате экспериментального исследования [10] зависимости перепада температуры по секции коллекторной тепловой трубы и максимальной температуры стенки испарительного канала от подводимого теплового потока показывают, что допустимая мощность электронных элементов, устанавливаемых в модуле с одной секцией, при температуре стенки испарительного канала 57°C составляет 102 Вт, с двумя секциями, соответственно, 204 Вт и с тремя секциями — 306 Вт. Эти показатели вполне соответству-

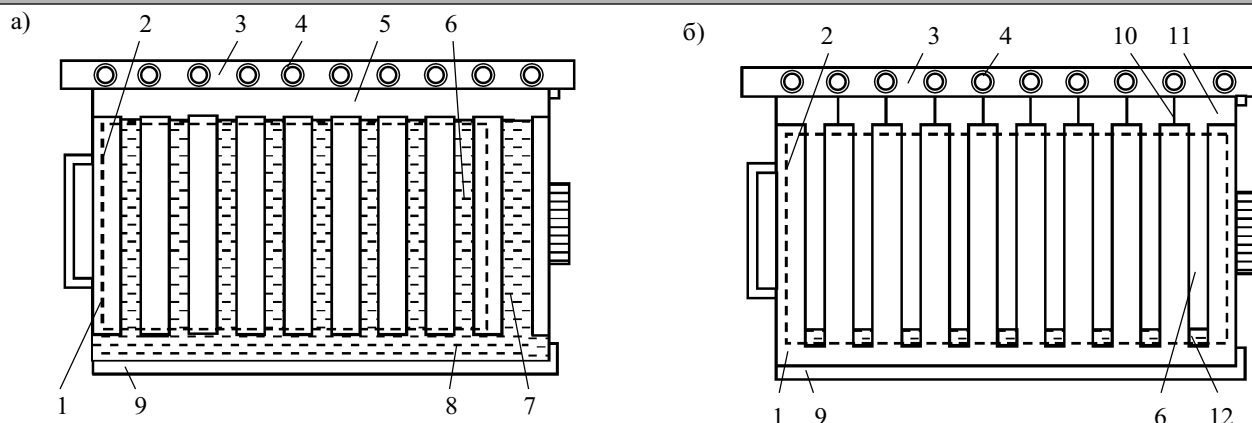


Рис. 4. Схемы БНК второго уровня с отводом теплоты к полке шкафа с помощью коллекторного термосифона (а) и секционной коллекторной тепловой трубы (б):

1 — печатная плата; 2 — границы области установки БИС и микропроцессоров; 3 — полка шкафа со встроенными тепловыми трубами; 4 — тепловая труба; 5 — собирающий коллектор; 6 — испарительный канал; 7 — возвратный канал; 8 — раздающий коллектор; 9 — опорное основание с механизмом прижима; 10 — герметичная перегородка; 11 — конденсационная зона секции коллекторной тепловой трубы; 12 — избыток теплоносителя

ют уровню тепловыделений функциональных модулей современных суперкомпьютеров.

Вместе с тем тенденции развития вычислительной техники свидетельствуют о безусловном увеличении мощности тепловыделений уже в ближайшем будущем. Учитывая это, на сегодняшний день уже разрабатаны и изготавливаются макеты предложенных БНК для экспериментального исследования термического сопротивления отдельных участков теплопередающего тракта — от места установки элементов до охлаждающей жидкости. Это позволит выявить наиболее проблемные участки и наметить пути снижения их термического сопротивления. (Можно предположить, что одним из таких участков будет тепловой разъем между функциональным модулем и полкой шкафа. Эта задача требует своего решения в последующих разработках, т. к. конструкция теплового разъема должна одновременно обеспечивать простое и быстрое извлечение модуля и как можно более низкое термическое сопротивление.)

Таким образом, полученные предварительные результаты экспериментального исследования U-образных и секционных коллекторных тепловых труб, являющихся основой БНК, свидетельствуют о высокой эффективности и практической применимости предлагаемых технических решений.

В дальнейшем необходимо более подробно исследовать макеты БНК третьего и второго уровней с целью оценки возможностей и технических характе-

ристик предложенных БНК. Это позволит выбрать пути дальнейшего повышения эффективности охлаждения БНК для перспективных вычислительных систем.

ИСПОЛЬЗОВАННЫЕ ИСТОЧНИКИ

1. Коваль В. Н., Савьяк В. В., Сергиенко И. В. Тенденции развития современных высокопроизводительных систем // Управляющие системы и машины. — 2004. — № 6. — С. 31—43.
2. Аладышев О. С., Дикарев Н. И., Овсянников А. П. и др. СуперЭВМ: области применения и требования к производительности // Известия вузов. Электроника. — 2004. — № 1. — С. 13—17.
3. Опубликовано 23-я редакция TOP 500. Китай врывается в суперкомпьютерную элиту // Электроника: Наука. Технология. Бизнес. — 2004. — № 4. — С. 49.
4. Левин В. К. Создание и применение суперкомпьютеров в России (современность и ближайшая перспектива) // Радиоэлектроника и управление. — 2003. — № 7—9. — С. 61—62.
5. Резников Г. В. Расчет и конструирование систем охлаждения ЭВМ. — М.: Радио и связь, 1988.
6. Савельев А. Я., Овчинников В. А. Конструирование ЭВМ и систем. — М.: Высш. школа, 1989.
7. Ненашев А. П. Конструирование радиоэлектронных средств. — М.: Высш. школа, 1990.
8. А. с. 1050144 СССР. Шкаф для охлаждения радиоэлектронной аппаратуры / В. С. Лазебный, Ю. Е. Николаенко, М. Г. Семена, А. П. Яковенко. — 1983. — Бюл. № 39.
9. Деклар. пат. 58839 А Украины. Шафа для радіоелектронної апаратури / Ю. Є. Ніколаєнко. — 2003. — Бюл. № 8.
10. Николаенко Ю. Е. Схемные решения организации теплоотвода от функциональных модулей ЭВМ с помощью двухфазных теплопередающих элементов и устройств // Управляющие системы и машины. — 2005. — № 2. — С. 29—37.

НОВЫЕ КНИГИ

Федоров В., Сергеев Н., Кондрашин А. Контроль и испытания в проектировании и производстве радиоэлектронных средств. — М.: Техносфера, 2005.

Руководство по методикам и технологиям проведения испытаний РЭС на климатические, механические, радиационные и специальные воздействия. Подробно изложены статистические методы контроля качества и физико-технические основы испытательных методик. Для широкого круга студентов и преподавателей технических университетов, инженеров-разработчиков и практиков, работников центров испытаний и сертификации.