

## Исследования и разработка методов обеспечения допустимых тепловых режимов для суперкомпьютерных конфигураций терафлпсного диапазона

В.В. Мазюк<sup>1</sup>, Н.Н. Парамонов<sup>2</sup>, А.Г. Рымарчук<sup>2</sup>, О.П. Чиж<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Государственное научное учреждение «Институт порошковой металлургии» НАН Беларуси, <sup>2</sup>Объединенный институт проблем информатики НАН Беларуси, Минск

Приводятся результаты исследований перспективных методов (в том числе решения с внутренней капиллярно-пористой структурой и на пульсирующих контурных термосифонах) отвода тепла от нагреваемых элементов оборудования суперкомпьютерных конфигураций.

Введение. Исследования проводились на основании практического опыта, полученного авторами в процессе создания белорусских моделей суперкомпьютеров Ряды 4 семейства «СКИФ» (кластеры «СКИФ ОИПИ», «СКИФ-GPU», «СКИФ-ГРИД» и «ПСК-СКИФ»), а также с учетом разработки предварительных требований к параметрам перспективных белорусских отраслевых кластеров для решения геолого-геофизических задач, создание которых планируется в рамках программы СГ «СКИФ-НЕДРА». В соответствии с этой программой в РБ планируется создание двух опытных образцов суперкомпьютеров серии «СКИФ-ГЕО»: опытный образец для решения ресурсоемких геолого-геофизических задач в центрах обработки данных - кластер «СКИФ-ГЕО-ЦОД РБ» и опытный образец для структурных подразделений (офисов) геолого-геофизической отрасли - кластер «СКИФ-ГЕО-Офис РБ». Максимальная производительность перспективных белорусских отраслевых кластеров планируется не более 100 Тфлпс [1].

Состояние проблемы. Эффективность охлаждения тепловыделяющих компонентов в серверах (вычислительных узлах) является одним из факторов стабильной работы суперкомпьютерной конфигурации в целом. В настоящее время максимальная мощность тепловыделения CPU составляет 95-130 Вт, а у отдельных процессоров может составить 160 Вт и выше. Поэтому актуальным является поиск более мощных и эффективных систем охлаждения.

Метод жидкостного охлаждения, позволяющий существенно повысить теплообмен, применяется, в основном, при охлаждении мощных тепловыделяющих элементов свыше 200-300 Вт. При этом жидкостное охлаждение усложняет конструкции за счет вспомогательных устройств (насос, емкость для жидкости, теплообменник и другие). Перспективным направлением в области высокопроизводительных вычислений для оборудования с высокой плотностью размещения (30кВт на стойку и выше) является использование систем охлаждения, базирующихся на погружении в диэлектрическую жидкость базовых компонентов кластера – серверов. При этом обеспечивается практически бесшумная работа, так как в серверах отсутствуют вентиляторы. Диэлектрические жидкостные хладагенты обладают существенно более высокой (в 1000 раз) теплоаккумулирующей способностью, чем воздух такого же объема. Данная технология позволяет обеспечить высокую экономию электроэнергии, затрачиваемой на охлаждение (до 90-95%). В ИПС РАН изготовлен экспериментальный образец кластера с подобным принципом охлаждения. Специалисты ИПС РАН нашли способ внедрения технологии охлаждения с погруженными в диэлектрическую жидкость компонентами в суперкомпьютерную индустрию [1].

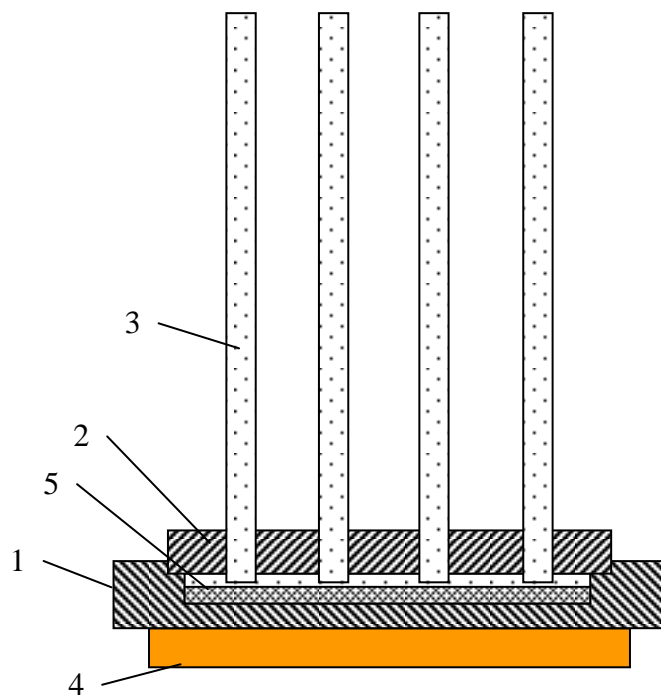
В системах охлаждения современной электронной аппаратуры продолжают использоваться тепловые трубы (ТТ), позволяющие эффективно отводить тепло за счет использования скрытой теплоты испарения жидкого теплоносителя. Перенос тепла в замкнутом цикле испарение-конденсация происходит в герметичном объеме. Главное достоинство ТТ, способствующее их применению, – беспрецедентно высокая эффективная теплопроводность, в десятки раз превосходящая теплопроводность меди или алюминия. Наиболее подходящим для

суперкомпьютерного диапазона температур теплоносителем ТТ является вода, соответственно, химически совместимый материал корпуса ТТ – медь. Для обеспечения эффективной теплопередачи посредством ТТ обычно требуется создание перепада температуры между концами ТТ 5-10 С. Тогда ТТ сможет обеспечить охлаждение процессора, разогретого до 75 0С, при температуре окружающего воздуха 50-55 0С. ТТ использованы в кластере «ПСК-СКИФ» [2].

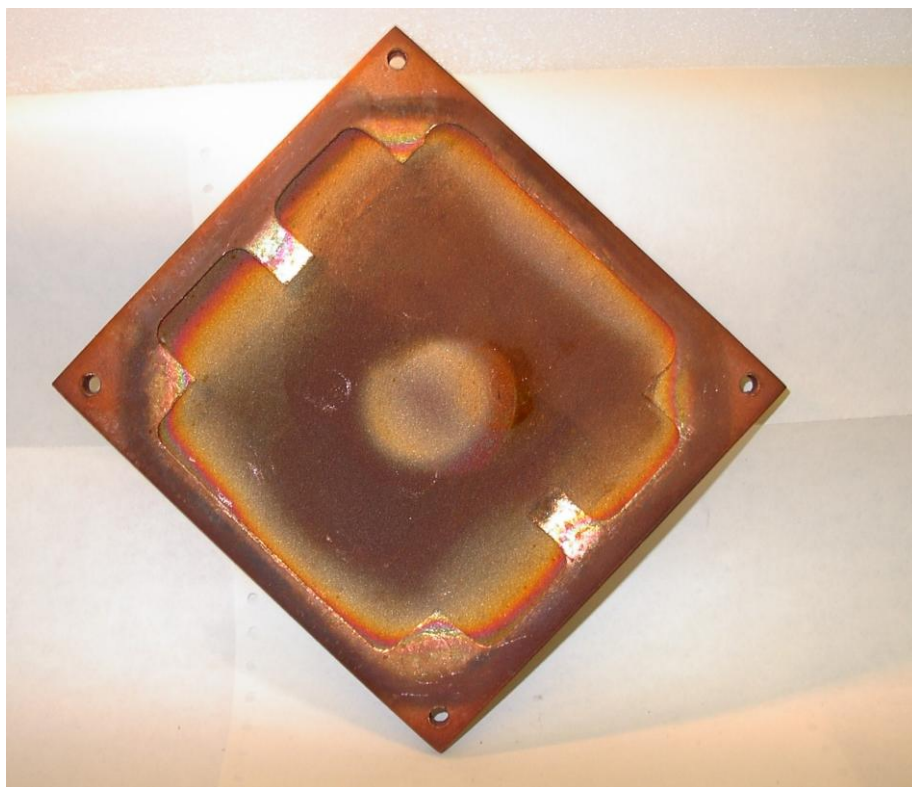
Анализ перспективных направлений исследований по увеличению эффективности отвода тепла. Несмотря на очевидные достоинства теплоотвода на основе тепловых труб, их эффективность зависит от конструктивных особенностей конкретной разработки. Конструкция теплоотвода отличается количеством тепловых труб, расположением их в пространстве, способами размещения в теплоприемнике. С точки зрения технологичности и пригодности для крупносерийного производства, повышения степени унификации, надежности, удобства контроля предпочтительным является модульный принцип конструкции, когда теплоотвод включает несколько автономных тепловых труб. Однако такие конструкции не всегда позволяют отводить возрастающие тепловые потоки электронных компонентов. Это обусловлено высоким тепловым сопротивлением цельнометаллических теплоприемников. Поэтому конструкторско-технологические решения для организации отвода тепла на основе испарительно-конденсационного процесса продолжают развиваться. Кроме того, выполняются разработки капиллярно-пористых порошковых материалов с повышенной испарительной способностью для использования в качестве капиллярных структур для тепловых труб, пластин, испарительных камер.

Рассеиватель тепла коллекторного типа с капиллярно-пористой структурой. Требуемая эффективность охлаждения тепловыделяющих компонентов может быть обеспечена посредством испарительного рассеивателя тепла, предназначенного для рассеяния высоких тепловых потоков современной электроники и использующего в конструкции испаритель коллекторного типа. Пример такой конструкции приведен на рисунке 1. В данном случае испаритель включает плоское основание 1 с внутренней полостью, герметично закрытой крышкой 2. Внутренняя полость через отверстия в крышке соединяется с внутренним пространством комплекта конденсационных труб 3. Охлаждаемый тепловыделяющий прибор 4 крепится к плоской наружной поверхности основания. На внутренней поверхности основания имеется капиллярная структура 5 в виде тонкого слоя порошкового капиллярно-пористого материала. Ввиду небольшого расстояния транспорта жидкого теплоносителя толщина капиллярной структуры также может быть минимизирована и составлять несколько десятых миллиметра. Тем самым обеспечивается повышенная испарительная способность капиллярной структуры – минимальный поперечный перепад температуры при заданном тепловом потоке.

На рисунке 2 приведенная фотография испарителя, изготовленного по разработанной технологической инструкции. Капиллярная структура формовалась методом седиментационного осаждения порошка ПМС-Н и спекалась при температуре 1020 оС в атмосфере аргона. Толщина основания 2 мм, толщина капиллярной структуры - 0,3 мм.



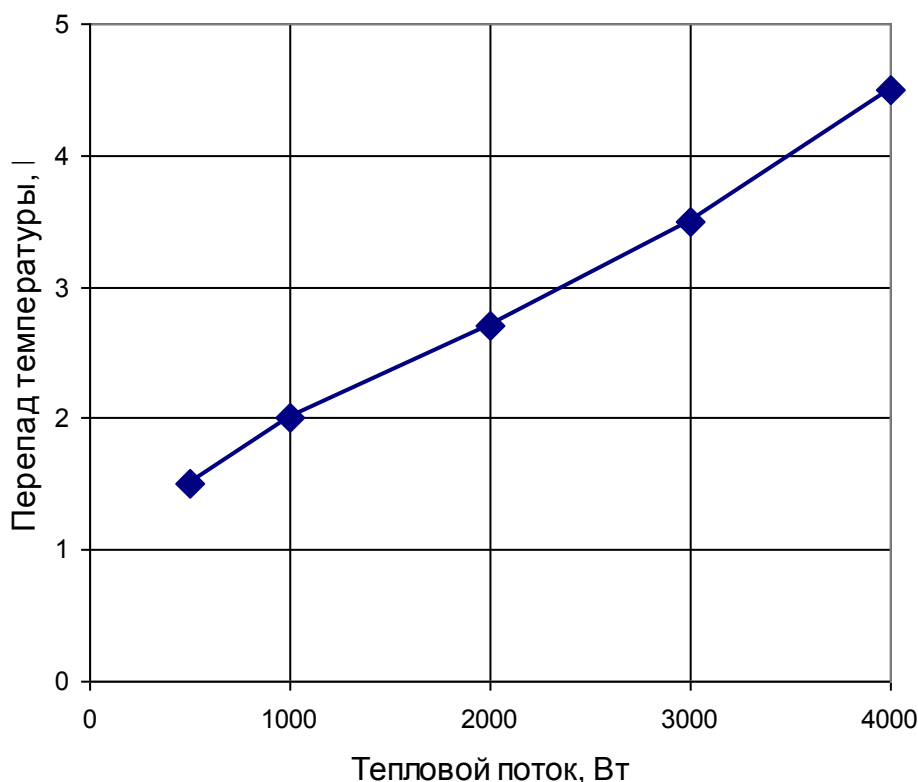
**Рис. 1.** Пример конструкции рассеивателя тепла



**Рис. 2.** Фотография испарителя

Изготовленный испаритель подвергался испытаниям на испарительную способность. Испаритель располагался горизонтально капиллярной структурой вверх. Для подвода тепла

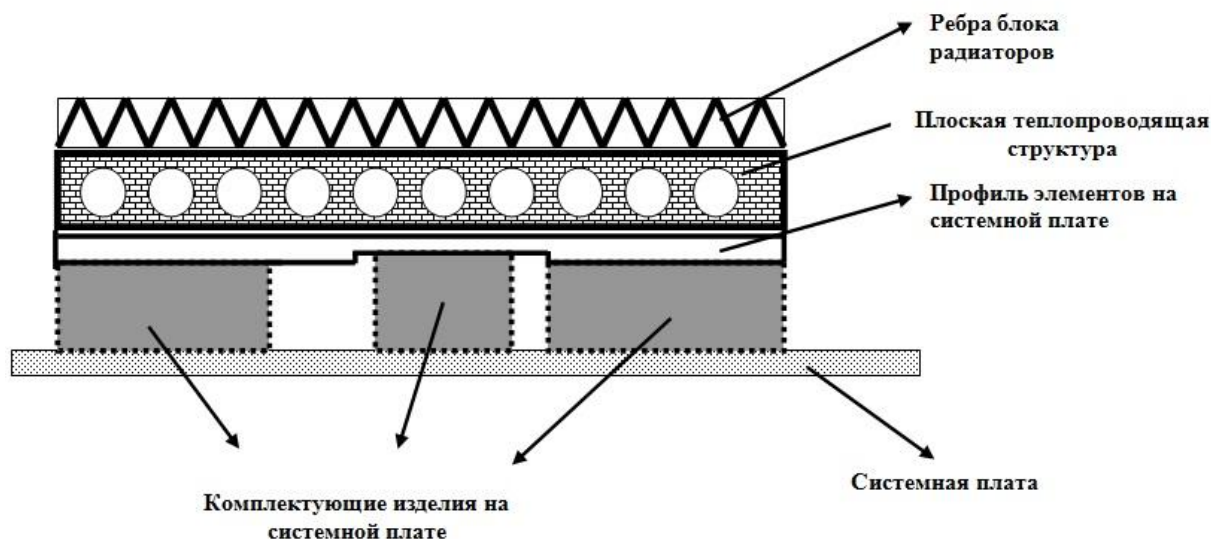
был изготовлен омический нагреватель из асбоцементной плиты с размерами, соответствующими размерам испарителя. Нихромовая проволока диаметром 0,4 мм проходила через канавки, выполненные в асбоцементной плите и закрытые высушенной электроизоляционной массой из смеси оксида алюминия и жидкого стекла. При подводе тепла к испарителю в его закрытом корпусе протекал замкнутый испарительно-конденсационный процесс. Отвод тепла, выделяющегося при конденсации пара, осуществлялся посредством принудительной воздушной конвекции через оребрение, присоединенное к конденсационным трубам. Хромель-алюмелевыми термопарами измеряли температуру нагреваемой наружной поверхности испарителя и температуру пара внутри испарителя. Результаты испытаний в виде зависимости перепада температуры «основание испарителя – пар» от подводимого теплового потока приведены на рисунке 3. Как видно, экспериментальный образец испарителя коллекторного типа обладает весьма высокой испарительной способностью, обеспечивая термическое сопротивление «основание + капиллярная структура» на уровне 0,001 К/Вт.



**Рис. 3.** Зависимость перепада температуры «основание испарителя – пар» от подводимого теплового потока

Плоские теплопроводящие капиллярно-пористые структуры - перспективное направление по увеличению эффективности отвода тепла. Такие теплопроводящие структуры в виде пластин могут иметь размер печатной платы или группы электрорадиоэлементов, от которых требуется отвести тепло. Для упрощения конструкции и обеспечения надежного плотного контакта с поверхностью электрорадиоэлементов между плоской капиллярно-пористой структурой и электрорадиоэлементами устанавливается алюминиевая пластина, которая профилирована под высоту компонентов (рисунок 4). Плоские теплопроводящие максиструктуры имеют такой же принцип работы, как и цилиндрические ТТ. Такие структуры представляют собой тонкую герметичную конструкцию на базе медных пластин с пористым материалом, заполненным жидким теплоносителем (например, водой), и микроканалами для переноса пара, расположенными в двух ортогональных направлениях. Микропористый материал насыщен теплоносителем в жидкой фазе, а в микроканалах теплоноситель находится в паровой фазе. В процессе функционирования электрорадиоэлементы выделяют тепло, которое передается на плоскую теплопроводящую конструкцию через алюминиевую пластину.

Такая конструкция обеспечивает эффективный отвод тепла от всех электрорадиоэлементов радиоэлектронной аппаратуры с выравниванием температуры по всей поверхности модуля. Поверх плоской теплопроводящей структуры устанавливается такого же размера блок радиаторов.



**Рис. 4.** Система охлаждения с теплопроводящей капиллярно-пористой структурой

В институте порошковой металлургии НАН Беларуси для проведения совместного с ОИПИ НАН Беларуси эксперимента были изготовлены две теплопроводящие капиллярно-пористые структуры разной конструкции. Круглая пластина (объем 25,43 см<sup>3</sup>) с несколькими радиальными каналами для переноса пара, проведенными от центра к краю, и прямоугольная пластина с капиллярно-пористой структурой и с ортогонально расположенными каналами для переноса пара по всей площади (объем – 25 см<sup>3</sup>). В эксперименте использовалась также медная плоская цельная пластина (объем – 18,45 см<sup>3</sup>). Пластины нагревались тепловым потоком мощностью 10 Вт и 20 Вт. Измерялась температура окружающей среды, с помощью термопар определялась установившаяся температура поверхности каждой из пластин в нескольких точках при конвективном воздушном теплообмене, вычислялась средняя температура поверхности пластины. Результаты измерений приведены в таблице 1.

Прямоугольная пластина пористой структуры нагревалась до меньшей температуры - соответственно 51,6 0С и 88,75 0С, перепад устоявшейся температуры с температурой окружающей среды у неё также был меньше. Это показывает, что ортогональные каналы переноса пара способствуют равномерному распределению тепла по поверхности пластины и обеспечивают более эффективный теплообмен.

**Таблица 1.** Измерение состояния термопар

Медная пластина (цельная). P=10 Вт, токp ср = 16,250С

Номер термопары	17	18	19	20	21	22	23	24
Температура, 0С	69	66	69	63	71	69	63	67

Медная пластина (цельная). P=20 Вт, токp ср = 16,250С

Номер термопары	17	18	19	20	21	22	23	24
Температура, 0С	99	100	105	104	101	84	91	98

Круг. P=10 Вт, токp ср = 16,250С

Номер термопары	17	18	19	20	21	22	23	24
Температура, 0С	67	67	69	74	71	67	57	64

Круг. P=20 Вт, токp ср = 16,250С

Номер термопары	17	18	19	20	21	22	23	24
Температура, 0С	99	99	106	101	104	79	91	96

Прямоугольная пластина (капиллярно-пористая). P=10 Вт, токp ср = 16,250С

Номер термопары	17	18	19	20	21	22	23	24
Температура, 0С	53	48	54	51	52	52	52	51

Прямоугольная пластина (капиллярно-пористая). P=20 Вт, токp ср = 16,250С

Номер термопары	17	18	19	20	21	22	23	24
Температура, 0С	91	83	93	84	93	89	87	90

Системы теплоотвода на пульсирующих контурных термосифонах. Несмотря на эффективную теплопередачу, классическая тепловая труба имеет ограничения теплопередающей способности, обусловленные предельно допустимой мощностью теплового потока в испарительной части тепловой трубки. Перспективным направлением являются системы отвода тепла на основе двухфазных теплопередающих устройств- пульсирующих контурных термосифонов (ПКТ), которые способны снимать с поверхности тепловой поток большей плотности, чем ТТ. ПКТ состоит из О-образного паропровода и конденсаторной полости (рисунок 5).

Медное плоское основание, контактирующее с источником тепла, распределяет тепловой поток по поверхности испарителя. Оба конца паропровода соединены с конденсатором. В качестве испарителя используется нижняя часть О-образного паропровода.

ПКТ заправляется рабочей жидкостью так, чтобы при неработающем термосифоне уровень был выше входных отверстий паропровода. В положении, когда конденсаторная полость находится выше испарителя, внутренний объем паропровода, в том числе и испарительная часть, всегда будут заполнены рабочей жидкостью перед началом теплопередачи.

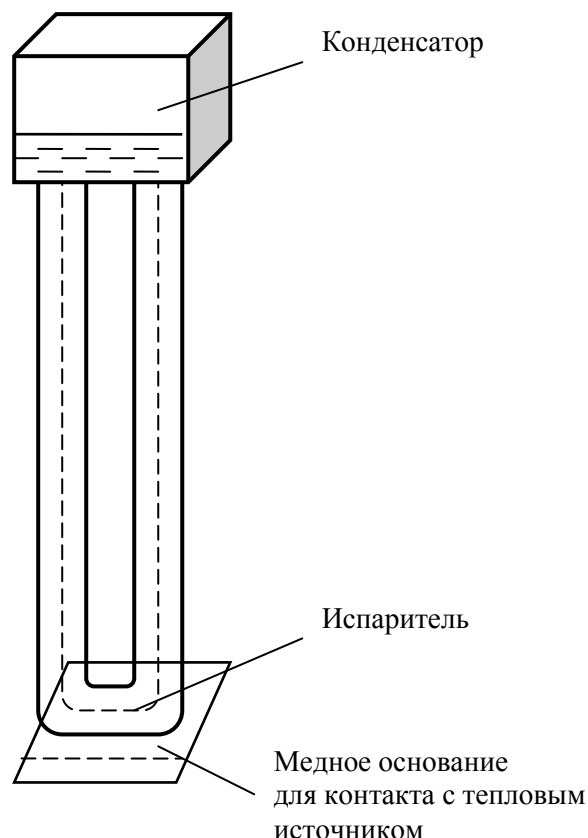
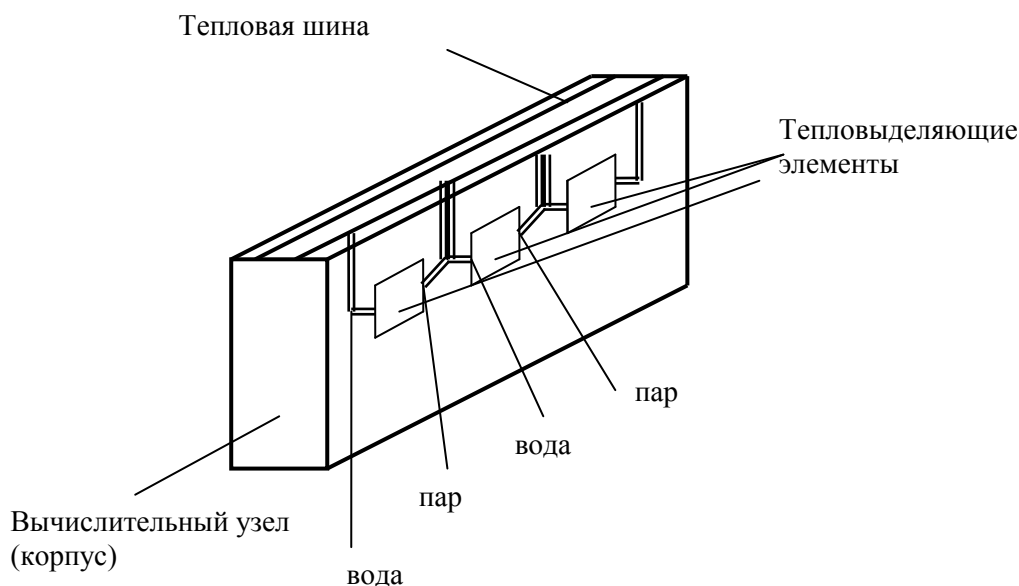


Рис. 5. Пульсирующий контурный термосифон

В Институте тепло- и массообмена имени Л.В. Лыкова НАН Беларуси для проведения исследований был разработан образец ПКТ. Эксперименты показали эффективность системы охлаждения центрального процессора с использованием двухфазного теплопередающего устройства типа ПКТ. При охлаждении центрального процессора, мощность которого составляет около 50 Вт, были получены следующие результаты. Температурный режим при охлаждении стандартным кулером, был следующим: температура поверхности центрального процессора – 55,15 0С, температура внутри системного блока – 39,74 0С. При использовании системы охлаждения на ПКТ температура поверхности центрального процессора составляла 53,62 0С, температура внутри системного блока – 33,43 0С. Таким образом, было зафиксировано понижение температуры внутри системного блока на 6,31 0С, а температуры поверхности CPU – на 1,53 0С. Данные по исследованию ПКТ в широком диапазоне конструктивных и тепловых параметров приведены в работе [3].

ПКТ отличаются простотой конструкции и возможностью легко изменять геометрию паропроводов, потому что используемые для паропроводов медные трубы не имеют капиллярно-пористой структуры. Они могут эффективно применяться для отвода тепла от теплонагруженных элементов на материнских платах, которые устанавливаются в системных блоках вертикально. На рисунке 6 показан вариант конструкции системного блока вычислительного узла (ВУ). В этом случае паропроводы ПКТ, осуществляющие отвод тепла от элементов платы, также располагаются в вертикальной плоскости, причем источник тепла располагается ниже конденсатора, что позволяет обеспечить с максимальной эффективностью отвод тепла в конденсатор. Конденсатор устанавливается на внешней металлической поверхности конструкции верхней части корпуса системного блока вычислительного узла. В верхней части системного блока вдоль его корпуса может разместиться несколько медных (алюминиевых) конденсаторов от разных теплонагруженных элементов одной платы. Эти конденсаторы образуют тепловую шину. Системные блоки ВУ располагаются в шасси

размещения вычислительных узлов. В верхней части шасси устанавливается металлическая панель, в которую подводится охлаждающая жидкость и которая обеспечивает охлаждение тепловых шин каждого из узлов шасси. Эта панель должна плотно соприкасаться с тепловыми шинами ВУ для их охлаждения.



**Рис. 6.** Конструкция системного блока ВУ с использованием ПКТ

По сравнению с известными системами прямого жидкостного охлаждения, предлагаемые системы охлаждения проще. В предлагаемой системе отсутствует прямой контакт охлаждающей жидкости с охлаждаемой поверхностью теплонагруженных элементов, что позволяет уменьшить возможность утечки теплоносителя. Не исключается подача воздуха на переднюю часть стойки с вычислительными узлами для отвода тепла от элементов материнской платы, не охваченных отводом тепла с помощью ПКТ. Такие комплексные комбинированные системы охлаждения могут использоваться в стандартных 19-дюймовых стойках высотой 42-44U и отводить тепло от стойки мощностью 20-30 кВт. Данное конструкторско-технологическое решение не требует выключения системы жидкостного охлаждения стойки, шасси при извлечении ВУ.

**Выводы.** В целом, по результатам проведенных исследований можно отметить, что двухфазные теплопередающие устройства являются эффективным техническим решением для отвода тепла от процессоров и других нагреваемых элементов современных серверных платформ. Они продолжают развиваться и находят широкое применение в системах охлаждения электронного оборудования. При увеличении тепловыделения процессоров можно использовать пульсирующие контурные термосифоны. Комплексное комбинированное решение построения системы охлаждения на основе ПКТ и металлических панелей жидкостного охлаждения, располагающихся между шасси с вычислительными узлами, является перспективным направлением развития систем охлаждения для суперкомпьютерных конфигураций терафлопсного диапазона.

Эффективные системы теплоотвода повысят надёжность аппаратуры и увеличат срок её службы.



## Литература

1. Отраслевые суперкомпьютеры семейства «СКИФ» в Республике Беларусь: состояние и перспективы развития / С.М. Абрамов, В.В. Анищенко, Н.Н. Парамонов, О.П. Чиж// Новороссийск: Труды Всероссийской суперкомпьютерной конференции Научный сервис в сети Интернет: все грани параллелизма. – 23-28 сентября 2013г. – М.: Изд-во МГУ, 2013.– С. 258-263.
2. Малогабаритные кластеры с системой охлаждения на тепловых трубках / Евдокимчиков А.Н., Жаворонков Д.Б., Парамонов Н.Н., Рымарчук А.Г // Труды Международной суперкомпьютерной конференции «Научный сервис в сети Интернет: экзафлопсное будущее», г. Новороссийск, 19-24 сентября 2011 г. – М.: Изд-во МГУ, 2011. - С. 121-125/.
3. Олехнович В.А., Конев С.В. Теплопередающие устройства для охлаждения микроэлектроники // Тезисы доклада и сообщ.: VI Минский международный форум по тепло- и массообмену Мн., ИТМО НАН Беларуси, 2008 г. т. 2, стр. 7.