

**РАЗДЕЛ 1****ПРИНЦИПЫ ПОСТРОЕНИЯ И АРХИТЕКТУРА  
СУПЕРКОМПЬЮТЕРОВ**

*С.М. Абрамов<sup>1</sup>, А.С. Амелькин<sup>1</sup>, А.М. Цирлин<sup>1</sup>, А.А. Чичковский<sup>2</sup>*

**СУПЕРКОМПЬЮТЕР ДОЛЖЕН КИПЕТЬ**

<sup>1</sup> *Институт программных систем им. А.К. Айламазяна РАН,  
г. Переславль-Залесский,  
abramov@botik.ru,*

<sup>2</sup> *Группа компаний «Сторус», г. Москва,  
chaa@storus.ru*

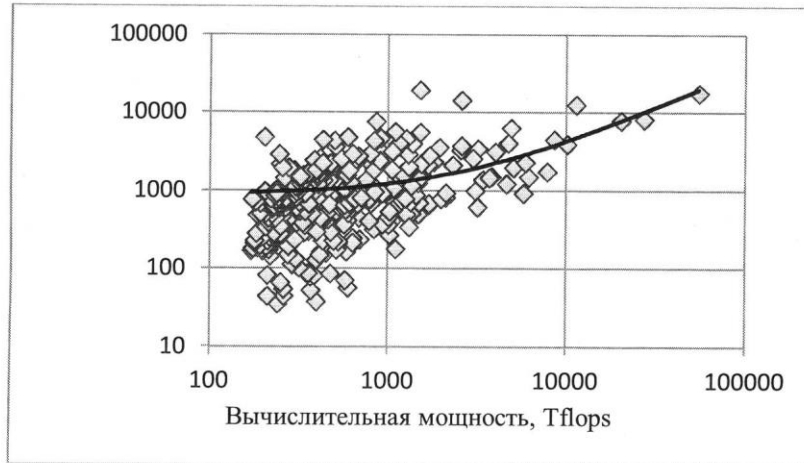
**Введение**

Сложные задачи построения полупроводниковых приборов, разработки фармацевтических препаратов, распознавания речи и образов, а также многие другие требуют все более мощных вычислительных комплексов [1]. Такие вычислительные устройства получили название суперкомпьютеров [2]. Развитие высокопроизводительной вычислительной техники идет по пути создания мощных компактных процессоров, развития высокоскоростных методов передачи данных, внедрения других технологических решений, повышающих вычислительную мощность. Это интенсивный путь развития, но есть и экстенсивный, когда увеличение вычислительной мощности происходит за счет увеличения числа процессоров в системе. И, если поиск новых технологий позволяет увеличивать мощность без существенного роста потребляемой системой энергии, то экстенсивный путь предполагает пропорциональное увеличение затрат энергии при увеличении количества процессоров. Анализ пятисот самых высокопроизводительных суперкомпьютеров мира [3] показывает, что между вычислительной мощностью и потребляемой электрической мощностью высокопроизводительных вычислительных комплексов наблюдается слабая корреляционная зависимость (коэффициент корреляции  $r = 0,59$  – см. рисунок).

**Показатели энергоэффективности вычислительных систем**

Поскольку любая вычислительная машина не производит механической работы, вся потребляемая энергия расходуется на нагрев электронных компонентов, прежде всего, процессоров. При этом диапазон критических температур (граница, за которой процессор не будет рабо-

тать стабильно) для разных процессоров составляет от 60 до 100 °С. Поэтому важно поддерживать температуру процессоров, охлаждая их, а отобранную тепловую мощность рассеивать в окружающую среду.



***Зависимость потребляемой электрической мощности от вычислительной мощности для пятисот самых высокопроизводительных суперкомпьютеров мира***

Поэтому наряду с поиском более эффективных, с точки зрения тепловыделения, электронных компонентов, важно решить проблему эффективного охлаждения вычислительных комплексов. Что означает «эффективное охлаждение»? Для ответа на этот вопрос надо перечислить теплотехнические и конструктивные требования, которые предъявляются к вычислительным системам:

- 1) мощность, потребляемая системой охлаждения, должна быть минимальной, а температура окружающего воздуха, при которой обеспечивается поддержание температуры процессоров на уровне ниже критической и рассеивание заданной мощности в окружающую среду, должна быть максимальной;
- 2) вычислительная система должна быть компактной, а это означает отбор в единице объема как можно большей мощности, выделяемой процессорами суперкомпьютера;
- 3) поле температур в системе должно быть равномерным, несмотря на то, что охлаждаемые устройства выделяют теплоту совершенно не одинаково, могут быть расположены вдоль потока хладагента, интенсивность тепловыделения может изменяться во времени;

- 4) хладагент возвращается в систему охлаждения, отдав теплоту окружающему воздуху. Эта система не должна потреблять много энергии на создание потоков.

Здесь не перечислены требования, касающиеся безопасности, бесшумности системы, ее стоимости, гигиенические требования и пр., так как далее будут рассмотрены только теплофизические свойства систем охлаждения.

Каждое из требований определяет критерии энергоэффективности, поэтому для описания системы охлаждения мы получаем несколько не сводящихся друг к другу критериев качества. Требование минимальной мощности системы охлаждения формализуется тремя критериями: *PUE* (power usage effectiveness) [4], представляющим собой отношение общей мощности, которую потребляет вычислительная система, к мощности, потребляемой оборудованием, которое непосредственно задействовано в вычислительном процессе; энергоэффективность *E*, определяемая как отношение потребляемой мощности к скорости вычислительного процесса и измеряемая в кВт/Гflops; минимальная разность температур  $\Delta T$  в °C между процессорами и окружающей средой. Компактность конструкции вычислительной системы может быть описана мощностью  $p_0$ , которую система охлаждения может отвести от 1 м<sup>3</sup> пространства, заполненного вычислительными устройствами. Равномерность поля температур описывается дисперсией *D* температур процессоров при полной загрузке вычислительной системы. Снижение энергии на организацию потоков связано с мощностью системы охлаждения. При этом надо учитывать, что система охлаждения может быть одноступенчатой (электроника → воздух), двухступенчатой (электроника → вода → воздух) или трехступенчатой (электроника → специальный хладагент → вода → воздух). Количество ступеней определяется требованиями к надежности вычислительного комплекса. При расчете многоступенчатой системы охлаждения общий перепад температур нужно оптимально распределить между ступенями.

Повышение эффективности системы охлаждения можно обеспечить за счет выбора хладагента и за счет организации системы охлаждения.

#### **Теплофизические свойства хладагентов**

Приведем теплофизические свойства хладагентов, во многом определяющие выбор системы.

Объемная теплоемкость воздуха равна 1,3 кДж/м<sup>3</sup>К; для неэлектропроводной (диэлектрической) жидкости, используемой в погружных системах охлаждения, она приблизительно в 1100 раз, а для воды в 3230 раз больше. Объемная теплоемкость определяет затраты энергии на перекачку потока хладагента, так как для того чтобы снять одну и ту же мощ-

ность, объем прокачиваемого воздуха должен быть в 1100 или 3230 раз больше, чем диэлектрической жидкости или воды соответственно.

Коэффициент теплоотдачи от металла к воздуху в  $\text{Вт}/\text{м}^2\text{К}$  зависит от скорости движения воздуха  $V$ . И, если эта скорость измеряется в м/с, он равен  $5,6 + 4V$  [5]. Тот же коэффициент от металла к жидкости равен  $350 + 2100\sqrt{V}$ . При близком к реальности значению скорости  $V=0,1$  м/с, коэффициент теплоотдачи при переходе от воздуха к жидкости возрастает в 110 раз. Если же жидкость еще и кипит при температуре контакта с охлаждаемым устройством, то коэффициент теплоотдачи равен приблизительно 4000, т.е. в 660 раз больше, чем для контакта с воздухом.

В реальных системах в зависимости от принятой конструкции термическое сопротивление между охлаждаемым устройством (процессором, например) и хладагентом определяется не только коэффициентом теплоотдачи, но и термическим сопротивлением термоинтерфейса, соединяющего процессор и радиатор, и теплопроводностью радиатора.

Перечисленные сведения, взятые из справочника Х. Кухлинга, носят приближенный характер, никак не учитываются свойства жидкости, ее вязкость, характер течения, шероховатость поверхности и др. Однако они дают представление о порядке величин и позволяют сравнить возможности систем охлаждения.

### Сравнение систем охлаждения

**1. Воздушные одноступенчатые системы,** несмотря на температурный перепад между воздухом и нагревателем в  $30^\circ\text{C}$  и больше, из-за малой теплоемкости воздуха требуют прокачивания значительных объемов, не гарантируют от локальных перегревов в силу неоднородности температурного поля хладагента. Как следствие они энергозатратны. Плотность расположения электронных устройств низкая, так как мал коэффициент теплоотдачи. Для машин большой мощности от воздушных систем охлаждения отказались.

**2. Жидкостные двухступенчатые системы.** В этих системах на первой ступени используется вода, на второй она охлаждается воздухом. Вода не должна контактировать с электроникой, поэтому ее пропускают внутри радиаторов по специальным герметичным каналам. Радиаторами могут служить массивные алюминиевые (латунные) пластины, к которым специальным теплопроводным клеем прикреплены охлаждаемые устройства. Охлаждающая вода протекает внутри пластин охлаждения по сложной системе каналов, обусловленной заданным распределением температур [6].

Практика выявила недостатки системы:

- дороговизна;
- малая надежность в связи с трудностью обеспечения с одной стороны герметичности подсоединения каналов охлаждения

к внешним трубопроводам, а с другой – возможности отключения платы от трубопровода для ее удаления из вычислительной системы, что может понадобиться, например, при замене платы;

- существенное термическое сопротивление за счет теплопередачи от охлаждаемого устройства к плате и неполное использование его поверхности;
- сильное увеличение веса системы из-за существенного веса массивных металлических охлаждающих пластин.

Отметим, что вода, используемая для охлаждения, должна быть тщательно очищена, так что никакие ее утечки недопустимы. Следовательно, на второй ступени охлаждения воды воздухом необходимо использовать энергоемкие устройства радиаторного типа.

**3. Трехступенчатые системы с погружением** охлаждаемых устройств в диэлектрическую жидкость (погружные). Такие системы выпускает в России компания ИММЕРС. Охлаждаемые устройства в суперкомпьютерах этой фирмы погружают в специальную диэлектрическую жидкость, которая не разъедает пластик и металл. При этом платы остаются стандартными, такими же, как в системах с воздушным охлаждением. Коэффициент теплоотдачи от охлаждаемых устройств (поверхности блоков памяти, радиаторов процессоров и блоков питания и др.) возрастает примерно в 100 раз, что позволяет повысить плотность их расположения. Насос для перекачивания диэлектрической жидкости тратит в сотни раз меньшую мощность, чем вентиляторы систем воздушного охлаждения.

На второй ступени можно либо охлаждать хладагент воздухом в системах радиаторного типа с присущими им значительными затратами мощности, либо охлаждать его водой, а воду, которая не требует высокой очистки, охлаждать на третьей ступени воздухом в градирне. Часть воды (примерно 0,5 %) при этом теряется, но затраты энергии в 5–6 раз меньше, чем при использовании радиаторов.

Погружные системы представляют собой существенный шаг вперед по сравнению с воздушными и водяными, но требуют тщательной проработки гидродинамики жидкости в ваннах с охлаждаемыми устройствами. Течение жидкости должно быть организовано так, чтобы не было каналов для ее прохождения без контакта с охлаждаемыми устройствами. Кроме того, поле скоростей жидкости при таком контакте должно быть максимально равномерным. Иначе неизбежны застойные зоны и местный перегрев.

Непростым вопросом является и конструкция радиаторов для таких систем: использование в системе погружного охлаждения стандартных радиаторов, разработанных для воздушного охлаждения, подобно

использованию геометрии корпуса и планера скоростного истребителя в качестве обводов подводной лодки.

Таким образом, несмотря на прорыв в эффективности процесса охлаждения, погружные системы пока еще не смогли достичь предельных значений показателей эффективности. Прежде всего это касается термостатирования вычислительной системы по всему занимаемому объему: распределение температур процессоров зависит от их расположения в системе.

**4. Трехступенчатые системы с изменением фазового состояния хладагента** (кипящий суперкомпьютер). Изменение фазового состояния хладагента (кипение в охлаждающей ванне, конденсация в системе отдачи теплоты в окружающую среду) решает многие проблемы охлаждения электронных устройств:

- в кипящей жидкости поле температур равномерно, и при постоянном давлении эта температура определяется только свойствами жидкости, что обеспечивает практически нулевую дисперсию температур процессоров при их одинаковой нагрузке;
- жидкость автоматически поступает в ту точку системы, где выделяется максимальный поток теплоты и откуда уносятся пузырьки пара;
- коэффициент теплоотдачи возрастает в 4 – 5 раз;
- отдача теплоты от насыщенного пара на второй ступени охлаждения происходит с максимально возможной интенсивностью, поэтому конденсатор может быть очень компактным;
- используемая на второй ступени в конденсаторе вода не требует очистки и может охлаждаться воздухом в градирне.

Система с кипящим суперкомпьютером реализована на вычислительной машине TSUBAME-KFC [7], разработанной в Токийском институте технологии и занявшей в 2014 г. первое место в рейтинге Green500. Конденсатор в ней представляет собой трубчатую решетку, внутри которой течет охлаждающая вода, а вся решетка помещена в паровое пространство охлаждающей ванны.

Основная трудность в создании кипящего суперкомпьютера состоит в выборе подходящей диэлектрической жидкости с температурой кипения порядка 50–55 °С и рациональной конструкции конденсатора.

**5. Комбинированные системы охлаждения.** Перечисленные принципы охлаждения электронных устройств могут быть использованы комплексно. При этом охлаждаемые устройства, характеризующиеся высокой плотностью теплового потока, могут быть погружены в емкости с кипящим хладагентом, а сами эти емкости, прежде всего их паровая часть, интенсивно охлаждаются водой. При этом высокий коэффи-

циент теплоотдачи может позволить обойтись без металлических радиаторов. Емкость с кипящей и конденсирующейся жидкостью образует «кипящий радиатор», который в отличие от обычных радиаторов не требует закрепления на нем охлаждаемого устройства и не создает дополнительного теплового сопротивления.

Первый в России вычислительный кластер, система охлаждения которого основана на фазовом переходе, разработан в Институте программных систем имени А.К. Айламазяна РАН. Проведены испытания работоспособности «кипящей» системы охлаждения, в ходе которых показана возможность термостатирования процессоров кластера в условиях их переменной загрузки. Это обеспечивается за счет постоянной температуры охлаждающей жидкости. Режим работы системы поддерживается на уровне пузырькового кипения, что соответствует максимальному коэффициенту теплопередачи и позволяет снять все радиаторы с вычислительных плат, а значит, значительно увеличить плотность компоновки вычислительных кластеров. Отсутствие шума, характерное для всех погружных систем охлаждения, термостатирование процессоров, высокая плотность компоновки и предельно высокая энергоэффективность ( $PUE < 1,01$ ) – вот ключевые характеристики погружных систем охлаждения с фазовым переходом.

1. Сверхсложные вычислительные задачи, решаемые на суперкомпьютерах. Лаборатория параллельных информационных технологий Научно-исследовательского вычислительного центра Московского государственного университета имени М.В. Ломоносова. <http://parallel.ru/research/challenges.html>.
2. *Hoffman A. R.*; et al. (1990). Supercomputers: directions in technology and applications. National Academies. – P. 35 – 47.
3. Top500 Lists November 2014. <http://www.top500.org/lists/2014/11/>.
4. Коварный PUE. Хабрахабр. <http://habrahabr.ru/company/ua-hosting/blog/244603/>.
5. *Кухлинг Х.* Справочник по физике. – М.: Физматлит, 1975.
6. *Абрамов С.М., Заднепровский В.Ф., Шмелев А.Б., Московский А.А.* Супер-ЭВМ ряда 4 семейства СКИФ: штурм вершины суперкомпьютерных технологий // Тр. Междунар. науч. конф. «Параллельные вычислительные технологии (ПаВТ'2009)». – Нижний Новгород: Изд-во Нижегородского государственного университета имени Н.И. Лобачевского, 2009. – С. 5 – 16.
7. Heterogeneous Systems Dominate the Green500. HPC, November 20, 2013. <http://www.hpcwire.com/off-the-wire/two-brains-better-one-heterogeneous-systems-dominate-green500/>.