

## РАЗДЕЛ 1

### Принципы построения, архитектура и аппаратная база суперкомпьютеров

*С.М. Абрамов<sup>1</sup>, С.А. Амелькин<sup>1</sup>, А.Ю. Романенко<sup>2</sup>,  
А.С. Симонов<sup>3</sup>, А.А. Чичковский<sup>4</sup>*

#### **ОПЫТ РЕАЛИЗАЦИИ ВЫСОКОПРОИЗВОДИТЕЛЬНЫХ ВЫЧИСЛИТЕЛЬНЫХ СИСТЕМ С ПОГРУЖНОЙ ЖИДКОСТНОЙ СИСТЕМОЙ ОХЛАЖДЕНИЯ**

<sup>1</sup> *Институт программных систем имени А.К. Айламазяна РАН,  
г. Переславль-Залесский,*

<sup>2</sup> *ФГУП «18 ЦНИИ» Минобороны России, г. Москва,*

<sup>3</sup> *ОАО «НИЦЭВТ», г. Москва,*

<sup>4</sup> *Группа компаний «Сторус», г. Москва*

Развитие вычислительных технологий требует разработки все более производительной вычислительной техники. Кластеры мощностью до 10 Tflops становятся стандартными вычислительными устройствами для многих предприятий, суперкомпьютеры вышли на производительность в десятки Pflops [1]. Высокая производительность вычислительной техники соответствует и высокому энергопотреблению. Снижение энергопотребления вычислительных устройств можно обеспечить либо за счет использования элементной базы с высокой энергетической эффективностью (переход на GPU или ПЛИС, у которых энергоэффективность может достигать величины 5,0 Gflops/Вт), либо за счет организации более эффективных систем утилизации тепла, выделяемого вычислительными устройствами [2, 3]. Вычислительная техника не производит механической работы, поэтому вся электрическая энергия, необходимая для проведения вычислений, преобразуется в тепло, которое надо отвести от микросхем и рассеять в окружающую среду. Использование воздушных схем охлаждения для высокопроизводительных систем нецелесообразно, так как на каждый киловатт энергии, использующейся для вычислительного процесса, воздушные системы охлаждения требуют до 700 Вт [4]. Индекс PUE, представляющий собой отношение общих затрат энергии к затратам энергии на вычислительный процесс, составляет для воздушных систем 1,7 и более [5]. Таким образом, сегодня общепринято использовать жидкостное охлаждение и, по сути, выбор стоит между замкнутыми и погружными системами жидкостного охлаждения.

Развитие замкнутых жидкостных систем охлаждения, в которых охлаждающая жидкость циркулирует в замкнутом контуре, получило широкое распространение. Высокопроизводительные вычислительные комплексы, такие как «СКИФ-Аврора ЮУрГУ» (ИПС имени А. К. Айламазяна РАН), все изделия российской группы компаний РСК, системы IBM Aquasar и SuperMUC, система Sunway BlueLight MPP компании INSPUR (Китай), комплектуются замкнутыми системами охлаждения, позволяющими использовать горячую воду для охлаждения вычислительных плат. Замкнутые системы охлаждения позволяют существенно (до 70%) снизить энергетические затраты, необходимые для охлаждения вычислительного комплекса, однако требуют дорогостоящих решений для организации отвода тепла: требуется разработать радиаторы с наибольшей поверхностью теплообмена [6]. В отечественных решениях и у компании INSPUR — это специально разработанные под конкретные платы металлические пластины с каналами для воды, в решениях IBM — сложные системы «капилляров» [7].

Основная проблема, с которой сталкиваются производители замкнутых систем охлаждения и ради решения которой разрабатываются технологически сложные системы отвода тепла — это обеспечение высокой надежности системы охлаждения, противодействие возможным протечкам воды в системе охлаждения, практически невозможность управления тепловыми потоками.

Технологически оправданным решением, обеспечивающим надежность жидкостных систем охлаждения, является разработка погружных (иммерсионных) систем охлаждения, в которых все вычислительные платы омываются не проводящей электрический ток жидкостью [8]. Такое очевидное решение, тем не менее, наталкивается на ряд проблем, заставивших фирму Cray в 80-х годах отказаться от развития погружных систем охлаждения, но сейчас успешно решаемых как в России, так и за ее пределами. Прежде всего, это выбор охлаждающей жидкости, которая должна быть неэлектропроводна, не агрессивна по отношению к материалам, из которых собраны вычислительные платы, обладать высокой теплоемкостью и, в то же время, низкой вязкостью и испаряемостью. Желательно при этом, чтобы в отличие от использованной в Cray-2 Fluorinert [9], эта жидкость была относительно недорогой.

На мировом рынке наиболее известны три производителя погружных систем охлаждения высокопроизводительной вычислительной техники: IBM, использующая жидкости производства фирмы 3M, производящей Fluorinert; Green Revolution и Hardcore Computers, использующие жидкости собственной разработки на основе минеральных масел.

В России разрабатываются, производятся, успешно проходят долгосрочные испытания и поставляются системы погружного охлаждения

семейства Immers, совместной разработки группы компаний «Сторус» и Института программных систем имени А. К. Айламазяна РАН [10]. Системы погружного охлаждения Immers используют диэлектрическую охлаждающую жидкость, разработанную группой компаний «Сторус», которая в полной мере обеспечивает работоспособность, эффективность и надежность систем охлаждения высокопроизводительной вычислительной техники [11]. Проведенные в НИЦ суперЭВМ и нейрокомпьютеров исследования показали, что электронные компоненты и платы, погруженные в данную охлаждающую жидкость, не изменяют свои параметры, что дает возможность использовать стандартные вычислительные платы в погружных системах, а также разрабатывать новые вычислительные устройства без дополнительных расчетов, учитывающих влияние погружения плат в жидкую среду.

Однако при разработке погружных систем жидкостного охлаждения возникают и другие задачи, требующие решения. Это задачи формирования потоков охлаждающей жидкости, обеспечивающие максимальную эффективность процесса охлаждения; выбор наиболее эффективного способа рассеяния тепла в окружающую среду; разработка систем управления процессом охлаждения, минимизирующих дополнительные затраты энергии; поиск оптимальных параметров радиаторов, передающих тепло от электронных компонентов к охлаждающей жидкости.

Следует отметить, что показатели энергоэффективности существенно зависят от принятых (или наблюдаемых во время проведения экспериментов) параметров: температуры и влажности воздуха, куда рассеивается тепло, выделяемое вычислительным комплексом. Так, для центральной России абсолютный максимум температуры составляет  $+40^{\circ}\text{C}$  при среднегодовой температуре  $+5^{\circ}\text{C}$ . Поэтому, как и для замкнутых систем охлаждения, в течение длительного времени возможно использование режима free cooling, что существенно снижает PUE системы (до 1,04). Таким образом, погружные системы жидкостного охлаждения выходят на уровень энергоэффективности 2,5 – 3,0 Gflops/Wt. Важно, что решение задач организации погружного охлаждения позволило обеспечить не только уменьшение дополнительных затрат энергии на охлаждение, но и увеличение плотности вычислений до 100 – 150 Tflops/м<sup>3</sup> по сравнению с замкнутыми системами жидкостного охлаждения, которые достигли уровня 50 – 60 Tflops/м<sup>3</sup> [12].

В настоящее время разработаны и используются вычислительные комплексы, оборудованные погружной системой жидкостного охлаждения Immers. Опыт использования этих вычислительных комплексов подтвердил высокие эксплуатационные свойства погружной системы охлаждения. Параметры реализованных систем Immers представлены в таблице.

*Параметры систем охлаждения Immers для некоторых установок*

Реализация	Производительность, Tflops	Мощность, кВт	Вычислительные компоненты	Тип коммуникации
НИЦ СЭ и НК	—	1,3	4 платы по 8 ПЛИС Virtex-7	Ethernet
НИЦЭВТ	19,2	5,7	8 лезвий по 4 GPU, 2 CPU материнская плата Ангара	InfiniBand
18 ЦНИИ	41,6	9,6	8 лезвий по 4 GPU nVidia, 2 CPU Intel	InfiniBand
СКИРУС	6,0	1,2	6 лезвий по 4 CPU Intel	Ethernet

Как показывают долгосрочные испытания системы охлаждения, проводимые в НИЦ суперЭВМ и нейрокомпьютеров, возможно улучшение показателей энергоэффективности охлаждения за счет оптимизации потоков жидкости в системе и геометрии радиаторов. Это позволит использовать системы охлаждения в условиях, когда накладываются жесткие условия на предельные температуры электронных компонентов (до 60 оС, когда использование горячей воды может оказаться нецелесообразным) или в условиях жаркого климата.

Разработка и выпуск опытных образцов вычислительных комплексов в ОАО «НИЦЭВТ» показала возможность создания высокопроизводительных вычислительных комплексов без использования зарубежных технологий и комплектующих: реализован вычислительный комплекс на материнских платах «Ангара». В отличие от замкнутых систем жидкостного охлаждения, здесь не требуются ни разработка специальных металлических пластин под конкретную реализацию вычислительной платы, ни использование унифицированных плат в вычислительном комплексе.

Вычислительный комплекс с системой охлаждения Immers, разработанной для ФГУП «18 ЦНИИ» МО РФ, характеризуется наибольшей на сегодня вычислительной плотностью: 160 Tflops/м<sup>3</sup>. Это подтверждает возможность создания компактных энергоэффективных высокопроизводительных вычислительных комплексов.

Опыт реализации вычислительных комплексов с погружными системами жидкостного охлаждения подтверждает развитие в России передовых компьютерных технологий и создание индустрии высокопроиз-

ВОДИТЕЛЬНЫХ ВЫЧИСЛИТЕЛЬНЫХ КОМПЛЕКСОВ, ОСНОВАННЫХ НА ПОГРУЖЕНИИ ИХ В ОХЛАЖДАЮЩУЮ ЖИДКОСТЬ.

1. Суперкомпьютеры. Top 50. Текущий рейтинг. 20-ая редакция от 01.04.2014. <http://top50.supercomputers.ru/?page=rating>
2. R.Sawyer Calculating Total Power Requirements for Data Centers. White Paper #3. APC, 2004. [http://www.gocsc.com/uploads/white\\_papers/1c360f8416e4436c86b8c0874e65be5e.pdf](http://www.gocsc.com/uploads/white_papers/1c360f8416e4436c86b8c0874e65be5e.pdf)
3. P.Rad, M.Thoene, T.Webb. Best Practices for Increasing Data Center Energy Efficiency. Dell power solutions, February 2008. <http://www.dell.com/downloads/global/power/ps1q08-20080185-Rad.pdf>
4. Power Consumption and Cooling in the Data Center: A Survey. Research sponsored by AMD. Ziff Davis Media Custom Publishing. [http://enterprise.amd.com/downloads/Ziff\\_Power\\_and\\_Cooling\\_IT\\_.pdf](http://enterprise.amd.com/downloads/Ziff_Power_and_Cooling_IT_.pdf) Accessed 10/07/07.
5. C.Bash, C.Patel. Sustainable information technology ecosystem. Presented at iMAPS Advanced Technology Workshop on Thermal Management. Sept. 24-27, 2007. <http://www.imaps.org/thermal/>
6. Дружинин Е. Энергоэффективное охлаждение суперкомпьютеров. Суперкомпьютеры. Top 50. [http://www.supercomputers.ru/index.php?option=com\\_k2&view=item&id=400&Itemid=86](http://www.supercomputers.ru/index.php?option=com_k2&view=item&id=400&Itemid=86)
7. 3M, SGI and Intel Showcase Advanced Cooling Technology for the “Data Center of the Future”. [http://solutions.3m.com/wps/portal/3M/en\\_US/NA-DataCenters/DataCenters/AboutUs/3MIInnovation/](http://solutions.3m.com/wps/portal/3M/en_US/NA-DataCenters/DataCenters/AboutUs/3MIInnovation/)
8. Абрамов С.М., Амелькин С.А., Чичковский А.А. Энергоэффективные суперкомпьютеры Проблемы и решения // Первый Национальный Суперкомпьютерный Форум (НСКФ-2012) Переславль-Залесский, 29–30 ноября 2012 г.
9. The Cray-2 Series of Computer Systems. Cray Research Inc., 1988. [http://www.cray.com/downloads/Cray2/Cray2\\_Brochure001.pdf](http://www.cray.com/downloads/Cray2/Cray2_Brochure001.pdf)
10. Абрамов С.М., Амелькин С.А., Чичковский А.А. Непосредственное жидкостное охлаждение серверов — на примере системы СТОРУС «Иммерс». // Вторая Всероссийская научно-техническая конференция «Суперкомпьютерные технологии» СКТ-2012. 24 –29 сентября 2012, Дивноморское.
11. Абрамов С.М., Амелькин С.А., Чичковский А.А. Опыт построения энергоэффективных компьютеров // Международная суперкомпьютерная конференция «Научный сервис в сети Интернет: все грани параллелизма», октябрь 2013, Абрау-Дюрсо.
12. The Green500 List - November 2013. <http://www.green500.org/lists/green201311&green500from=1&green500to=100>