

**ПОГРУЖНЫЕ СИСТЕМЫ ОХЛАЖДЕНИЯ:
ЭФФЕКТИВНОСТЬ РАЗЛИЧНЫХ ПОДХОДОВ
К ОРГАНИЗАЦИИ ПОТОКА ОХЛАЖДАЮЩЕЙ ЖИДКОСТИ**

¹*ИПС имени А.К. Айламазяна РАН, г. Переславль-Залесский,*

²*ООО ИММЕРС, г. Москва,*

abram@botik.ru, sergey.a.amelkin@gmail.com, chaa@gmail.com

Развитие вычислительной техники в количественном выражении происходит с удивительной скоростью. В 1965 году Г. Мур сформулировал гипотезу, сейчас известную как закон Мура об удвоении скорости вычислений каждые 1,5–2 года. Несмотря на периодически высказываемые сомнения в возможностях поддержания экспоненциального развития отрасли, новые технологические решения позволяют удерживать такие высокие темпы развития уже более 50 лет. Это беспрецедентный пример развития – если бы такими темпами развивался транспорт, то за такой же срок скорость перемещения увеличилась бы от неторопливой пешей прогулки до субсветовой. И, в отличие от транспортных систем, все физические ограничения, препятствующие дальнейшему наращиванию скорости вычислений, благополучно преодолеваются.

Одно из таких ограничений связано с тепловым режимом работы вычислительных комплексов. Процессоры не производят механической работы, а, значит, вся электрическая энергия, необходимая для проведения вычислений, преобразуется в процессоре в тепловую энергию. За счет такого преобразования процессор нагревается, и, если тепло не отводить, он может выйти из строя из-за перегрева. Традиционное решение, применяемое в системах охлаждения вычислительных систем от домашнего компьютера до серверных стоек: организовать поток воздуха, который будет охлаждать процессор. Тепло в этом случае отводится за счет нагрева воздуха – в домашних компьютерах непосредственно в помещение, в мощных вычислительных комплексах через специальные теплообменники и градирни в окружающую среду. Однако увеличение вычислительной мощности вычислительных комплексов привело к ряду проблем, решение которых требует разработки сложных инженерных конструкций, введения рассчитанных на неизменность данных решений стандартов и больших капитальных и операционных затрат. Наиболее значимые проблемы в традиционных системах охлаждения:

1. Прежде всего, увеличение мощности вычислительных комплексов требует все большей энергии, чтобы отвести тепло, выделяющееся при работе вычислительных комплексов: если для утилизации 1 кВт тепла достаточно работы вентиляторов общей мощностью 100 Вт, при этом тепло рассеивается непосредственно в рабочее помещение, то для утилизации 1 МВт

тепла требуется затратить уже более 0,6 МВт энергии, и все это тепло рассеивается в окружающую среду через драйкулеры и градирни. Для учета эффективности энергопотребления введен показатель PUE (power usage effectiveness – эффективность использования мощности), равный отношению всей потребляемой вычислительным комплексом электрической мощности к той мощности, которая поступает непосредственно на вычислительные платы. Для мощных, охлаждаемых воздухом, вычислительных комплексов среднее значение PUE приближается к 2,0.

2. Пыль, находящаяся в воздухе, осаждается на радиаторах и вентиляторах. Пыль – очень хороший теплоизолятор, это значит, что пыль препятствует отводу тепла. Чем больше в вычислительном комплексе процессоров, тем сложнее следить за их загрязнением, поэтому для больших вычислительных комплексов остро стоит задача очистки воздуха от пыли. Конечно, такая очистка также требует затрат энергии.

3. Чем больше вентиляторов, тем больше шума они производят. Приемлемый уровень шума в машинном зале составляет сейчас 73 дБ: это уровень шума, при котором для общения надо кричать. Поэтому стандарты для строительства центров обработки данных предусматривают шумоизоляцию помещений, в которых установлены вычислительные машины.

Таким образом сейчас крупный вычислительный центр – это специально подготовленное помещение, в котором предусмотрены очистка, кондиционирование и циркуляция воздуха, охлаждающего процессоры плат. Строительство такого центра осуществляется по специальным нормам, а значит, оно дороже, чем просто офисный центр. Затраты на охлаждение, особенно летом, когда температура воздуха вне помещения может достигать +40 °С, очень высоки.

Для решения этих проблем разрабатываются энергосберегающие процессоры, которые позволяют на каждый ватт потребляемой электрической мощности проводить все больше операций в секунду. Если еще 5 лет назад этот показатель эффективности составлял 0,2–1,0 Тфлопс/кВт, то сейчас этот показатель уже превышает 5,0 Тфлопс/кВт и уже известны разработки процессоров эффективностью свыше 10,0 Тфлопс/кВт.

Но перечисленные проблемы, хоть и связаны с качеством процессоров, не могут быть решены улучшением процессоров. Даже переход на иные принципы работы вычислителей не решит проблемы утилизации тепла. Ведь количество процессоров и вычислительная мощность компьютеров в соответствии с законом Мура непрерывно экспоненциально растут, а значит, проблема утилизации тепла не только остается, но и становится все более острой. Проблема – в организации охлаждения процессоров. Охлаждение воздухом настолько неэффективно, что приводит к неоправданным затратам.

За последние 20 лет было найдено много путей интенсификации процесса охлаждения. Многие из этих решений связаны с использованием жидкости для охлаждения. Как правило, жидкостное охлаждение локализовано: охлаждается только процессор, выделяющий около 95 % всего тепла. Остальные компоненты плат по-прежнему охлаждаются воздухом. Такой гибридный подход связан с тем, что самым лучшим хладагентом является вода, но нельзя допустить контакт воды с платами из-за ее электропроводности. Поэтому основной проблемой гибридных систем охлаждения является – не допустить контакта хладагента (воды) с электрическими проводниками. Чаще всего эта проблема решается за счет установки металлической пластины с каналами для воды. Металлическая пластина, как радиаторы в воздушных системах охлаждения, обеспечивает перенос тепла от процессоров к воде.

Вода в гибридные системы охлаждения может подаваться теплой – до 40 °С – что позволяет улучшить энергоэффективность вычислительного комплекса до 1,3 PUE, а в некоторых случаях даже до 1,15 PUE. Этот способ существенно лучше, чем воздушное охлаждение, но требует значительных затрат на изготовление надежных охлаждающих конструкций, исключающих протечки воды. От вентиляторов, а значит, и от подготовки воздуха, шума, такие системы избавиться не могут. Поэтому гибридные охлаждающие системы – это только частичное решение проблем, связанных с охлаждением вычислительного комплекса.

Радикальным решением является погружение вычислительных плат в жидкость, то есть изменение среды, в которой функционирует вычислительный комплекс, с воздушной на жидкую. Это позволяет за счет резкого увеличения коэффициента теплопередачи увеличить интенсивность отбора тепла от процессоров. Важно, чтобы эта жидкая среда была диэлектриком и не вступала в химические реакции с материалами вычислительных плат. Системы погружного охлаждения сейчас являются наиболее эффективными (в России такие системы производит компания «ИММЕРС»). Процесс охлаждения вычислительного комплекса, оборудованного погружной системой охлаждения, требует только 4–5 % от отводимого от процессоров тепла, и даже в самый жаркий день охлаждение может быть организовано без использования холодильных машин, что невозможно при охлаждении воздухом.

Освобождение мощностей электропитания оказывается возможным потому, что погружная система охлаждения вычислительных комплексов является очень эффективной. Действительно, жидкость, нагревающаяся на 1 °С, отбирает в 4000 раз больше тепла, чем такое же по объему количество воздуха, нагревающегося на 1 °С. Это означает не только, что интенсивность потока хладагента может быть уменьшена, но и то, что можно использовать теплую жидкость, в процессе охлаждения нагревающуюся лишь

на 5–10 °С в зависимости от мощности охлаждаемых вычислительных устройств. А чем меньше скорость протекания хладагента, чем меньше разность температур, тем меньше энергии потребляет система охлаждения и вычислительный комплекс в целом. Проведенные исследования показали, что внедрение погружных технологий охлаждения вычислительных устройств позволит при существующих энергозатратах увеличить вычислительную мощность на 30–50 %.

Более того, именно погружные системы охлаждения позволяют не только существенно снизить энергозатраты на охлаждение, но и решают все остальные проблемы развития вычислительной техники: погружная система может быть выполнена в герметичном корпусе, герметичное исполнение не подвержено загрязнению пылью, при использовании погружной системы охлаждения вычислительные комплексы можно будет устанавливать в любом неподготовленном помещении и даже под навесом вне помещения; погружные системы не производят шума: вблизи вычислительного комплекса не надо будет кричать, достаточно тихо говорить – шум составляет только 40 дБ от работы насоса.

Развитие погружных систем охлаждения позволит устанавливать высокопроизводительные вычислительные комплексы на заводах, на транспорте, использовать вычислительные мощности непосредственно там, где они нужны, вне зависимости от условий и климата. Это позволит значительно расширить область применения вычислительных комплексов.

Эффективность погружного охлаждения настолько велика, что позволяет увеличить плотность компоновки вычислительных устройств без снижения качества охлаждения. Плотность компоновки связана как с уменьшением расстояния между платами, так и с сокращением пространства на установку инженерного обеспечения вычислительных комплексов – в погружных системах не нужны ни межрядные кондиционеры, ни горячие и холодные коридоры, ни громоздкие гидравлические системы. Отсутствие дополнительных шкафов (межрядных кондиционеров и пр.) и площадей (горячие коридоры и пр.) для обеспечения работы системы охлаждения позволит уменьшить площадь, занимаемую вычислительным комплексом. Эта площадь, с учетом освободившейся мощности электропитания, может быть занята за счет расширения вычислительного комплекса. Устанавливая погружную систему охлаждения, можно увеличить вычислительный центр в 1,3–1,8 раза (в зависимости от существующей в настоящее время системы охлаждения) даже при существующей плотности установки вычислительных плат.

Разработка погружных систем охлаждения основана на известных принципах эффективного охлаждения: именно так организовано охлаждение на электростанциях, в металлургии. Принцип охлаждения с использованием жидкого теплоносителя применяется для охлаждения двигателей: эпоха воз-

душного охлаждения автомобильных двигателей давно закончилась, прежде всего – из-за возросшей мощности двигателей. Так же, при возрастании вычислительной мощности компьютеров, возможности воздушного или гибридного охлаждения становятся все более и более ограниченными. Им на смену приходят современные схемы погружного охлаждения: более эффективные, более надежные. Сочетание положительных сторон погружного охлаждения вычислительной техники позволит наилучшим образом организовать работу современных вычислительных комплексов.

1. *Абрамов, С.М.* О возможности сборки суперкомпьютеров из герметизированных вычислительных блоков [Электронный ресурс] / Абрамов С.М., Амелькин А.С., Цирлин А.М., Чичковский А.А. // НСКФ, Переславль-Залесский, 2016.
2. *Амелькин, С.А.* Вычислительные кластеры ИММЕРС – инновации и практика использования [Электронный ресурс] / Амелькин С.А., Чичковский А.А., Абрамов С.М., Клюев Л.В. // НСКФ, Переславль-Залесский, 2015.
3. *Абрамов, С.М.* О проблеме № 1 на пути к Exascale [Электронный ресурс] / Абрамов С.М., Амелькин С.А., Клюев Л.В., Чичковский А.А. // Международная научная конференция «Параллельные вычислительные технологии 2015», Екатеринбург, 2015.
4. *Абрамов, С.М.* Опыт реализации высокопроизводительных вычислительных систем с погружной жидкостной системой охлаждения [Электронный ресурс] / Абрамов С.М., Амелькин С.А., Романенко А.Ю., Симонов А.С., Чичковский А.А. // 3-я Всероссийская научно-техническая конференция «Суперкомпьютерные технологии» (СКТ-2014), Дивноморское, 2014.

*Д.В. Андрияшин, Д.В. Биконов, В.С. Горбунов,
А.И. Тупицын, А.А. Цыганов*

АВТОМАТИЗАЦИЯ РАЗРАБОТКИ АРХИТЕКТУРЫ ВЫСОКОПРОИЗВОДИТЕЛЬНЫХ ВЫЧИСЛИТЕЛЬНЫХ СИСТЕМ*

*ФГУП «НИИ “Квант”», г. Москва,
atupitsin@rdi-kvant.ru*

Введение

Проектирование и создание высокопроизводительных вычислительных систем (суперкомпьютеров) является технически сложным уникальным процессом. Особенно это утверждение относится к суперкомпьютерам, которые достигают рекордных показателей производительности (далее ВВС). Такие системы являются уникальными, в большинстве случаев создаются в единственном экземпляре. Устоявшиеся технологии, харак-

* Работа выполнена в лаборатории, финансируемой Фондом перспективных исследований РФ.