

# Сучасні методи охолодження суперкомп'ютерних центрів

Головинський А.Л., Маленко А.Л.

*Інститут кібернетики ім. В.М. Глушкова НАН України, Київ, Україна*

icybcluster@gmail.com

**Анотація.** *Однією з найактуальніших задач розробки систем охолодження є підвищення їх енергоефективності. У роботі розглянуто основні сучасні підходи до побудови систем охолодження суперкомп'ютерних центрів.*

## Ключові слова

Суперкомп'ютер, кластер, датацентр, рідинне охолодження, гідротермальне охолодження.

## 1 Вступ

Система охолодження суперкомп'ютера є однією з основних його складових, оскільки є другою за енергоспоживанням після обчислювальних вузлів, а її надійність визначає надійність суперкомп'ютера в цілому.

Однак, при проектуванні нового кластера система охолодження часто випадає з основного фокусу уваги, оскільки стосується скоріше інженерів холодильного обладнання, аніж науковців, що проектують суперкомп'ютер. У даній роботі ми зробили огляд різних існуючих підходів до охолодження, як традиційних, так і інноваційних.

Однією з найактуальніших задач розробки систем охолодження є підвищення їх енергоефективності. Сама задача охолодження складається з кількох підзадач:

- відведення тепла від електронних компонент;
- охолодження теплоносія нижче температури навколишнього середовища;
- використання тепла від обладнання з користю.

## 2 Системи повітряного охолодження

Система повітряного охолодження – це найбільший споживач електроенергії, крім самого ІТ-обладнання, місця вона вимагає найбільше. Найчастіше приміщення, в якому розташовується обчислювач з повітряним охолодженням, доводиться робити у кілька разів більшим за площу самої установки тільки через те, що необхідно правильно організувати потоки повітря, розділяти холодне та гаряче повітря в суперкомп'ютерному центрі тощо. Система охолодження у цілодобовому режимі займається переміщенням величезної кількості повітря, підтримуючи його низьку температуру та вологість у межах 40-60%.

### 2.1 Класичне кондиціонування фреоновими кондиціонерами

Кондиціонер призначений для видалення теплоти, утвореної обладнанням, за межі охолоджуваного приміщення.

Теплова енергія переноситься фреоном, який циркулює у замкнутому контурі. Фреон активно випаровується у теплообміннику внутрішнього блоку, забираючи надлишкове тепло з повітря. Далі фреон перекачується компресором по трубах до радіатора зовнішнього компресорно-конденсаторного блоку, а його температура підвищується

приблизно до 50 °C за рахунок роботи стиснення компресора. Вентилятор охолоджує трубки зовнішнього радіатора, охолоджений фреон конденсується у рідку фазу.

Крім одноконтурних, системи охолодження з кондиціонерами можуть бути двоконтурними: перший контур фреоновий, він охолоджує другий контур, в якому знаходиться вода чи інша рідина, а другий контур охолоджує блок охолодження стійок з обладнанням. Така двоконтурна схема дозволяє уникнути обмеження фреонових магистралей щодо довжини та перепадів висот, але потребує додаткових насосів і в цілому знижує енергоефективність охолодження.

Охолодження кондиціонерами зазвичай є найменш енергоефективним. Електроенергія витрачається на роботу великої кількості механічних систем: компресорів, зовнішніх вентиляторів компресорно-конденсаторного блоку, вентиляторів внутрішнього блоку, насоса та випарної системи зволожувача. Незалежно від пори року фреонові кондиціонери працюють весь час в неощадливому режимі.

Зазвичай мінімальний коефіцієнт PUE (Power Usage Effectiveness), що досягається при застосуванні цієї технології, не може бути меншим за 1.5 – 2.0. Тобто для забезпечення роботи 200 кВт обчислювального устаткування до суперкомп'ютерного центру необхідно буде підвести не менше 300 – 400 кВт електроенергії.

Щоб підвищити ефективність кондиціонування, використовуються інженерні рішення, метою яких є відбір максимумно гарячого повітря та уникнення змішування гарячого та холодного повітря приміщення. На сьогодні охолоджувати суперкомп'ютерний центр можна на одному з трьох рівнів: комп'ютерної зали, ряду і стійки. Кожен з цих підходів має свої переваги і недоліки.

*Охолодження на рівні зали.* Історично першим (і все ще дуже популярним) підходом до охолодження дата-центрів є кондиціонування на рівні зали. У цьому випадку встановлюється один або кілька великих кондиціонерів, які подають охоложене повітря в приміщення зали і забирають нагріте.

Потоки охолодженого повітря у цьому випадку можуть подаватися безпосередньо до загального простору зали, розподілятися у холодні коридори або адресно до конкретних стійок за допомогою фальшпідлоги через перфоровані плитки.

Одним з недоліків охолодження на рівні зали є те, що гарячий та холодний повітряні потоки неминуче перемішуються, знижуючи загальну ефективність системи охолодження. Відзначимо, що значна частина повітря, що виходить з кондиціонерів, йде в обхід обчислювального устаткування і відразу ж повертається до охолоджуючого блоку, у результаті всією потужністю кондиціонера скористатися не вдається.

Для запобігання перемішування повітряних потоків можна за допомогою спеціальних повітроводів організувати відведення гарячого повітря від стійок не просто до гарячого коридору, а відразу до системи витяжної вентиляції будівлі. При цьому сопла витяжки повинні розташовуватися над гарячим коридором.

Іноді для більш ефективної роботи використовуються спеціальні двері, що встановлюються на задню стінку шафи. Вони ізолюють зону викиду нагрітого повітря, яке спеціальними герметичними повітроводами надходить до системи кондиціонування. Як правило, такі двері мають вбудовані вентилятори, що підсилюють потоки повітря, або навіть теплообмінники.

Ще однією проблемою, яка виникає при створенні системи охолодження суперкомп'ютера на рівні зали, є нерівномірний розподіл повітря. Передбачається, що кондиціонер повинен однаково охолоджувати як устаткування, що знаходиться біля нього, так і те, яке розміщене у найвіддаленіших ділянках приміщення. Все це вимагає ретельного опрацювання концепції охолодження і чіткого розуміння того, як буде зростати навантаження у суперкомп'ютерному центрі в залежності від його потужності.

*Охолодження на рівні рядів.* Сучасною альтернативою першому підходу виступає охолодження на рівні рядів. У даному випадку кондиціонер або охолоджувальний блок встановлюється безпосередньо у ряд стійок з устаткуванням таким чином, щоб подавати охоложене повітря до холодного коридору і забирати нагріте з гарячого. Тут не зайве зазначити, що концепція холодних і гарячих коридорів, яка стала вже загальноприйнятою, працює як при побудові систем охолодження на рівні зали, так і на рівні рядів.

Багато існуючих суперкомп'ютерів виконані у вигляді шафи висотою 42U і шириною 300–600 мм. Найбільш потужні моделі можуть відвести майже 40 кВт тепла. Перевага даного підходу, в порівнянні з архітектурою охолодження на рівні залу, полягає у тому, що шляхи циркуляції повітря коротші та більш передбачувані, що дозволяє задіяти всю номінальну охолоджуючу здатність кондиціонера, мінімізувавши втрати. До того ж, оскільки кожен блок охолоджує невеликий простір (як правило, кілька сусідніх стійок), йому не потрібні потужні вентилятори, які споживають значну кількість електроенергії. Важливою перевагою систем охолодження на рівні ряду є те, що їх можна використовувати без застосування фальшпідлоги, не знижуючи при цьому ефективності охолодження.

Варто відзначити, що принцип охолодження на рівні ряду аж ніяк не передбачає, що блоки охолодження встановлюються тільки в ряди зі стійками. Є рішення також і для установки на стелі або навіть на шафах з обладнанням.

*Охолодження на рівні стійок.* Найбільш ефективною схемою є охолодження на рівні стійок. У цьому випадку для кожної серверної шафи фактично виділяється окремий кондиціонер, а також засоби ізоляції гарячого та холодного простору, в результаті чого повітряні потоки, що циркулюють всередині серверної шафи, не потрапляють до приміщення суперкомп'ютерного центру.

Це найдорожчий підхід, але з його допомогою можна відвести до 50 кВт тепла від стійки. Подібне рішення виправдане у випадках, коли у датацентрі з певних причин утворюються локальні точки з підвищеним тепловиділенням, наприклад, шафи з великою кількістю блейд-серверів.

## 2.2 Безпосереднє охолодження зовнішнім повітрям

У пошуках енергоефективності дослідники звертаються до різних варіантів природного охолодження. Перший та найочевидніший варіант «безкоштовного» охолодження: *пряме вільне охолодження*, коли зовнішнє повітря фільтрується, зволожується та подається до машинної зали [1].

Провідні виробники серверів сприяють цій тенденції, випускаючи більш надійне та невибагливе до зовнішніх умов серверне обладнання. З цієї причини переглядаються міжнародні стандарти, що регламентують параметри мікроклімату серверних приміщень. Ці параметри регулюються стандартами ASHRAE (American Society of Heating, Refrigerating and Air Conditioning Engineers). У першій редакції цих рекомендацій, опублікованій 2004 року, встановлювалась верхня межа у 25 °C при вологості 40%, у другій (2008 року) – 27 °C при вологості 60%. У рекомендаціях 2011 року з'явилися два нових класи серверного обладнання – A3 і A4 з температурним діапазоном до 40 і 45 градусів. Хоча таке «спекотне» охолодження ще не поширене, любителі інновацій активно починають його використовувати. Це дозволяє істотно розширити географію застосування «зеленого» охолодження і задіяти інноваційні методики.

У багатьох країнах світу технологія природного охолодження є цілком застосовною: на багатьох територіях температура повітря не перевищує 27 °C та вскрай рідко температура повітря перевищує 45 °C.

Але є додаткові умови, які ускладнюють систему вільного охолодження. Часто необхідно встановлювати камери змішування з регулюючими заслінками, де до зовнішнього повітря підмішується частина нагрітого повітря з серверної зали в холодний час. Обов'язково ставляться датчики задимлення та запилення, які потрібні, щоб перекрити подачу зовнішнього повітря, якщо на вулиці забагато пилу чи диму (інакше відбудеться спрацьовування автоматики пожежогасіння). Виникає необхідність мати резервну систему охолодження на повну необхідну потужність. Ця система охолодження може бути вбудована в установку прямого вільного охолодження, а може бути звичайною системою охолодження, що використовує стандартні кондиціонери. Потужність такої системи охолодження повинна на всі 100% відповідати потужності машинної зали, а відмовостійкість – вимогам відмовостійкості решти інфраструктури. У результаті «безкоштовне» охолодження вимагає стандартних витрат на закупівлю, монтаж та налагодження «звичайної» системи охолодження, і додатково на установку «вільного» охолодження.

*Непряме вільне охолодження* є логічним розвитком ідеї прямого вільного охолодження. Теплообмінник-рекуператор ставиться між потоками внутрішнього та зовнішнього повітря. Варіантів теплообмінників-рекуператорів існує багато – від роторних систем до конструкцій з використанням теплових трубок, що проходять через звичайні пластинчасті теплообмінники.

Логічним розвитком систем непрямого вільного охолодження є використання адіабатичного охолодження зовнішнього повітря в теплу пору року. Вони використовуються у різних варіаціях – деь теплообмінник просто поливають водою, деь вода дрібно розпилюється у потоці повітря. Основна перевага такого охолодження в тому, що є можливість домогтися насичення повітря вологою і таким чином максимально знизити температуру зовнішнього повітря.

## 2.3 Адіабатичне охолодження

Щоб розширити діапазон застосування природного охолодження, використовуються системи на основі фізичного ефекту поглинання енергії при випаровуванні рідини.

Принцип дії адіабатичної системи охолодження полягає у розпиленні води у вигляді дрібних крапель, які вприскуються в гаряче повітря. Вода при цьому повинна бути очищена від усіляких домішок. Вода, випаровуючись у повітрі, здатна охолодити його до температури, близької до температури мокрого термометра.

Строго теоретично межа охолодження в цьому процесі помітно нижче і дорівнює температурі точки роси. Для реалізації цієї можливості досить частину вихідного повітря охолодити до температури мокрого термометра випаровуванням води, а потім з його допомогою охолодити залишок, не зволожуючи додатково. Далі холодне повітря також зволожується, набуваючи більш низької температури. Процес можна повторити ще раз з частиною повітря,

досягнувши температури, близької до точки роси. Єдина очевидна технічна складність досягнення мінімально можливої температури – збільшення у кілька разів необхідних обсягів повітря, що подається, і площі теплообмінника. На практиці можна отримати повітря з температурою нижче навколишнього середовища на 5 – 6 °С.

Подібні системи роблять або за принципом мокрих градирень, тобто використовують велику поверхню пластин, покриту тонкою плівкою води, або розпилюють воду під тиском у кілька сотень атмосфер через мікронні форсунки дуже дрібними краплями безпосередньо у повітроводи.

Далі або відбувається обмін температурою з тим повітрям, яке необхідно охолодити, або вологе повітря безпосередньо використовується для охолодження устаткування. Витрата води становить близько 2 л на 1 кВт-год тепла. Оскільки випаровується велика частина води, відповідно зростають вимоги до її хімічного складу, що вимагає використання іонообмінних фільтрів або фільтрів зворотного осмосу.

При використанні форсунок є суворі вимоги до механічних забруднень, потрібна установка мікрофільтрів після насоса високого тиску. Ці ускладнення пов'язані з тим, що, починаючи з певного розміру краплі, процес випаровування відбувається дуже швидко, і за рахунок цього значно зменшуються розміри зрошувальної камери.

Використання форсунок більшого діаметру, середнього та низького тиску простіше з точки зору експлуатації форсунок та процесу водопідготовки. Але при цьому частина води не бере участі в процесі і зливається (краплі не встигають випаруватись повністю), крім того, розмір камери зволоження стає зрівняним з іншими приміщеннями системи.

Однак, на практиці подавати занадто вологе повітря до машинної зали теж не дуже добре, а значить, зниження температури буде не таким великим. Отже, досить часто буде потрібне додаткове охолодження традиційними кондиціонерами.

Більшу частину року у системі охолодження працюють тільки вентилятори та іноді невеликий насос у системі розпилення води. А отже використання адіабатичного охолодження дозволяє досягти високої енергоефективності суперкомп'ютерного центру: коефіцієнт PUE може досягати значення 1,043 [2, 3], за рахунок того, що допоміжне обладнання навіть влітку споживає всього близько 4% електроенергії центру, а взимку – ще менше (у зимовий період PUE – близько 1,018). Ефективність компресорно-конденсаторних систем істотно нижче, для них значення PUE 1,3 – чудовий результат.

Установки вільного охолодження покладаються на традиційні системи у випадку несприятливих атмосферних умов. Установки адіабатичного охолодження все одно вимагають використання додаткових систем охолодження при високій температурі та відносній вологості навколишнього повітря, з одного боку, та витрачають велику кількість води, з іншого.

Ще один важливий момент – частина системи знаходиться у потоці зовнішнього повітря. Це означає, що повинен стояти фільтр, який буде досить швидко забруднюватися. Як правило, ефективність усіх установок вільного охолодження сильно залежить від потоку зовнішнього повітря. При досягненні критичного рівня забрудненості фільтрів їх ефективність різко знижується. Чистота фільтрів повинна постійно відслідковуватися, а запас фільтрів для заміни завжди має бути у комплекті. У деяких установках для підтримки чистоти теплообмінників використовується вода, але в цьому випадку різко зростає витрата води та виникають труднощі із зимовою експлуатацією.

Все це створює додаткові складнощі, і в результаті плата за електроенергію дійсно істотно знижується, але можуть знадобитися додаткові капітальні вкладення, з'являється істотна витрата води, а витрати на обслуговування часто виявляються вищими, ніж у випадку традиційних систем. Треба враховувати й необхідність спеціальної антибактеріальної обробки води та всієї установки, щоб уникнути ризику розвитку бактеріальних культур на деталях системи охолодження.

Яскравий приклад використання енергоощадливих технологій охолодження – центри обробки даних Facebook [4]. Перший власний датацентр Facebook побудувала в американському містечку Прайввілль у 2010 році. Через рік був побудований другий, дублюючий датацентр у Форест-Сіті, штат Північна Кароліна. Коефіцієнти PUE цих майданчиків складають: 1,07 – для центру в Прайввіллі і 1,09 – для центру в Форест-Сіті. Цього вдалося досягти тільки завдяки зниженню втрат при передачі та перетворенні електроенергії, а також більш високим робочим температурам повітря всередині центру (допускається 35 °С в стійках в холодному коридорі).

У датацентрах встановлена й традиційна система охолодження, але використовується вона тільки в аварійних випадках. Основна ж система кондиціонування повітря – безпосереднє вільне охолодження з декількома камерами підготовки повітря, через які проходить зовнішнє повітря.

Спочатку повітря ззовні забирається повітрязабірниками на другому ярусі і надходить у камеру підготовки, де фільтрується і змішується з гарячим повітрям. Далі повітря проходить через холодильні панелі. Вони являють собою камеру зволоження з великою кількістю труб, які розбризкують дистильовану воду форсунками під високим тиском, завдяки чому підвищується вологість і знижується температура повітря, що продувається. Щоб дрібнодисперсна волога не могла проводити електрику, використовують дистильовану воду. Далі на шляху пові-

тря стоять мембранні фільтри, що відокремлюють великі частки вологи. Потім повітря потужними вентиляторами направляється до машинної зали. Відпрацьована вода збирається в спеціальному резервуарі та очищається.

У 2011 році цей датацентр зіткнувся з проблемою в роботі системи управління, через що температура повітря, яке використовується для охолодження серверів, досягла більше 26 °С, а вологість – понад 95%. У результаті накопичився конденсат і утворилась дощова хмара, яка заповнила собою весь простір з обчислювальним обладнанням.

Заради економії електрики Facebook використовував зовнішнє повітря для охолодження свого датацентру замість традиційної системи. Але після того, як система управління вийшла з ладу, почалася рециркуляція підігрітого повітря з низьким рівнем вологи через систему охолодження на базі водяного випарника. Це призвело до того, що повітря сильно зволожилось і утворилась хмара. Деякі сервери повністю вийшли з ладу. Фахівці Facebook ретельно ізолювали контакти у місцях підключення серверів до джерел живлення, захистивши їх від вологи.

В Україні адіабатичні системи охолодження поки не дуже популярні, але фахівці вважають, що в найближчі роки проектувальники датацентрів будуть виявляти до них більший інтерес. Одним з перспективних рішень є перехід на вільне охолодження у поєднанні з адіабатичним чи створення гібридних систем. Одним із прикладів таких систем є гібридна система охолодження суперкомп'ютерного центру СКІТ Інституту кібернетики імені В.М. Глушкова НАН України [5], в якій тепле повітря від вільного охолодження використовується для підігріву зимового саду та холу інституту. Система повітряного охолодження суперкомп'ютерного центру, у якій тепле повітря використовуються для додаткового опалення великої конференц-зали, створена в Інституті теоретичної фізики ім. М.М. Боголюбова НАН України.

### 3 Системи рідинного охолодження

Технології рідинного охолодження кластерних систем стають все більш популярними [6, 7] у зв'язку зі зростанням питомого теплового навантаження в машинних залах, появою потужних серверів та прагненням заощадити на експлуатаційних витратах. При цьому під рідинним охолодженням найчастіше розуміють різні технології: в одних випадках мова йде про занурювальне охолодження, в інших – про подачу теплоносія безпосередньо до обчислювальних мікросхем у закритих контурах.

Спочатку під рідинним (або водяним) охолодженням розуміли використання системи охолодження на основі чіллерів, у якій в якості теплоносія виступала вода або глікольові розчини. При цьому вода подавалася у кондиціонери, де служила для охолодження повітря в приміщенні. У свою чергу, повітря охолоджувало серверне обладнання.

Однак з розвитком технологій та зростанням потужності серверів рідина почала використовуватись безпосередньо для відведення тепла від електронних компонент.

У рідинних системах охолодження задачу відведення теплоти від електроніки виконує не повітря, а рідина. Це дає безліч переваг. Оскільки об'ємна теплоємність води більш ніж у 3200 разів вища за теплоємність повітря, для видалення тепла необхідно перекачувати в 3200 разів менший обсяг рідини. З'являється можливість повністю позбутися складних та дорогих кондиціонерів, при цьому щільність компоновки серверного обладнання підвищується, розміри інших підсистем значно зменшуються, оскільки немає необхідності прокачувати всередині величезні об'єми повітря. Сучасні системи рідинного охолодження створюють дуже комфортні умови для роботи напівпровідників.

Рідинні системи охолодження можна розділити на закриті, де немає прямого контакту між рідиною та електронними компонентами на платах, та відкриті (занурювальні), в яких рідина безпосередньо омиває електронні компоненти.

Істотною перевагою всіх рідинних схем охолодження є краща теплоємність рідин у порівнянні з повітрям (від 1500 до 4000 разів) та більший коефіцієнт тепловіддачі (до 100 разів). Для охолодження одного сучасного процесора необхідно 1 м<sup>3</sup> повітря або 250 мл води за хвилину. На перекачування 250 мл води витрачається набагато менше електроенергії, ніж на перекачування 1 м<sup>3</sup> повітря.

Використання системи безпосереднього рідинного охолодження дозволяє знизити значення PUE до рекордного в індустрії значення 1.06, до того ж для застосування системи немає необхідності модернізувати існуючі приміщення.

### 3.1 Рідинне охолодження закритого типу

У системах закритого типу всі тепловиділяючі елементи плати накриваються однією або декількома плоскими пластинами з каналом для прокачування рідини. Канали пластин об'єднуються колекторами в єдиний контур, з'єднаний із загальним радіатором (чіллером) або іншим теплообмінником, зазвичай розташованим за межами корпусу та/або стійки, або навіть машинної зали. За допомогою насоса через пластини прокачується теплоносіє, який відводить тепло від елементів обчислювача та розсіює його через теплообмінник. У такій системі потрібно забезпечити доступ теплоносія до кожного з тепловиділяючих елементів обчислювача, що означає досить складну трубопровідну систему, велику кількість з'єднань.

З іншого боку, потрібно забезпечити можливість обслуговування плат без серйозного демонтажу системи охолодження. Це означає, що з'єднання повинні бути герметичними, але розмикатися легко та без зусиль. Для цього, як правило, застосовуються спеціальні рідинні роз'єми, що витримують тисячі неперервних роз'єднань без формування крапель.

У системах рідинного охолодження закритого типу можна в якості холодоносія використовувати звичайну воду або розчини гліколів. Проте витік теплоносія може призвести до великих проблем – як мінімум потрібна буде зупинка всього комплексу для перевірки системи електроживлення та її просушування.

Додаткова проблема систем рідинного охолодження закритого типу – проблема «точки роси». Повітря суперкомп'ютерної зали входить у контакт з пластинами охолодження. Якщо якісь ділянки цих пластин занадто холодні, а повітря у залі більш тепле та не дуже сухе, то на пластинах може сконденсуватися волога. Проблема вирішується двома заходами:

- контролем та підтриманням параметрів температури та вологості повітря у кластерній залі;
- переходом до охолодження гарячою водою.

Охолодженням гарячою водою називається різновид системи водяного охолодження закритого типу, коли в сервери подається вода кімнатної чи трохи вищої за кімнатну температури [8]. А на виході з серверів іде вода досить високої температури, придатна для опалення, підігріву водопровідної води тощо. Для охолодження таких систем не потрібні кондиціонери, а досить чілерів з природним охолодженням. Можливість охолодження «теплою водою» істотно підвищує PUE. Це найбільша з переваг систем з водяним охолодженням.

### 3.2 Чіллери із застосуванням вільного охолодження

Система рідинного охолодження зазвичай об'єднує у собі теплообмінник із застосуванням технології вільного охолодження та насосну станцію для перекачування холодоносія у системі зняття тепла з кластерного обладнання. Система дозволяє не використовувати фреоновий контур чіллера у холодну пору року і працювати у режимі вільного охолодження.

У теплу пору року система працює за принципом фреонового кондиціонера, але до процесу перенесення тепла додається ще одне середовище – рідина, через що загальна ефективність системи знижується до 1,7 у порівнянні з кондиціонером. Проте середньорічна енергоефективність утримується на цілком прийнятних показниках, залежних, однак, від кліматичної зони.

### 3.3 Занурювальне охолодження

У 1985 році компанія Cray випустила суперкомп'ютер Cray-2, який виглядав як великий резервуар, заповнений теплоносієм із зануреними у нього материнськими платами та блоками живлення. Відтоді занурювальні системи охолодження використовуються у спеціалізованих рішеннях, а з недавнього часу і для охолодження суперкомп'ютерних центрів. Сучасним прикладом занурювальної системи є японський суперкомп'ютер Tsubame-KFC [9].

У порівнянні з рідинним охолодженням закритого типу, конструкція систем відкритого типу радикально спрощується. По суті, у межах однієї ємності – можна для простоти використовувати звичний термін "шасі" – ми маємо справу з єдиним об'ємом рідини, в яку занурені всі плати. Конструкція максимально проста та герметична. Тут немає складної системи колекторів, немає рідинних роз'ємів. При зміні геометрії використовуваних плат не треба займатися розробкою та виготовленням нових охолоджуючих пластин.

Оскільки у межах шасі немає колекторів, то немає проблеми розрахунку діаметрів потоків або управління потоками рідини у цих колекторах. Повністю зникає проблема «точки роси». Не треба думати про температуру, вологість та забрудненість навколишнього повітря. У тому числі це важливо для обчислювальних комплексів

середньої продуктивності, за рахунок герметизації можна забезпечити їх використання в найнесприятливіших умовах: виробництвах з агресивними середовищами, істотною забрудненістю або запиленістю повітря, низьким тиском повітря.

Отже, у порівнянні з системами охолодження закритого типу, спрощення конструкції має спричинити підвищення надійності системи та зменшення її ціни.

Розвиток занурювальних систем охолодження, на жаль, був обмежений високою вартістю теплоносія, до якого висуваються жорсткі вимоги з теплопровідності та діелектричних властивостей. На відміну від закритих та гібридних схем охолодження, тут неможливо використовувати воду або розчини гліколів.

Традиційно в якості другої проблеми систем рідинного охолодження закритого типу називають велику вагу. Дійсно, велика ємність, заповнена рідиною, повинна мати значну вагу. Однак при розгляді системи охолодження закритого типу, наприклад, з принципом «одна охолоджуюча пластина на одну плату», ми побачимо шасі з щільно упакованими модулями. Практично весь простір, не зайнятий платами та мікросхемами, буде заповнений металевими охолоджуючими пластинами. А метал, як відомо, важче рідини такого ж об'єму. Тому проблема оптимізації ваги систем з рідинним охолодженням закритого типу – це питання якісної інженерної проробки рішення.

Таким чином, системи охолодження занурювального типу видаються вельми перспективною галуззю розробки. Протягом більше 20 років провідні виробники обчислювальної техніки – IBM, HP, Google, Intel тощо – проводять роботи зі створення занурювальних систем охолодження.

Основним компонентом системи занурювального рідинного охолодження є холодоагент, що представляє собою діелектричну (непровідну) суміш. Як правило, це біле мінеральне масло, його теплоакumuлююча здатність набагато вища, ніж у повітря того ж об'єму. У стійці розміщується заповнена цим холодоагентом ванна, куди сервери встановлюються вертикально. Холодоагент циркулює по системі та розсіює тепло, що виділяється.

При цьому до холодоагента висуваються специфічні вимоги: низька в'язкість, висока теплоємність, екологічність та нетоксичність. У цьому випадку використання занурювального рідинного охолодження дає ряд переваг: економію електроенергії, підвищення продуктивності, а іноді і зниження капітальних витрат.

Однією з причин, завдяки якій занурювальне охолодження обходиться дешевше повітряного, є нижча різниця температур між холодоагентом та серверами. Так, ефективне охолодження обладнання виявляється можливим, навіть якщо холодоагент нагрівається до 50 °С, у той час як робоча температура систем повітряного охолодження становить близько 24 °С. З досвіду експлуатації холодильної техніки відомо, що підтримка температури холодоагенту на рівні 50 °С вимагає значно менших витрат енергії, ніж охолодження повітря до 24 °С (для цього воду в контурі доводиться охолоджувати до 7 – 10 °С).

Додаткова економія досягається за рахунок видалення серверних вентиляторів, оскільки при зануренні обладнання в рідину необхідність у них відпадає. Це дозволяє економити, залежно від виду сервера, ще 10–25% енергії.

Фактично система охолодження виявляється настільки ефективною, що дозволяє відводити тепло від серверів загальною потужністю до 100 кВт при їх розміщенні в єдиній стійці стандартною висотою 48 U.

Оскільки система дозволяє розсіювати більший обсяг тепла, ніж при використанні повітряного охолодження, обчислювальне устаткування може розміщуватися щільніше. Як наслідок, технологія занурювального охолодження найбільш ефективна та корисна у високонавантажених стійках з блейд-серверами.

Серед інших переваг занурювального рідинного охолодження слід зазначити наступні:

- Відсутній ризик поломки вентиляторів.
- Постійна циркуляція холодоагенту сприяє рівномірному розподілу температури по стійці та перешкоджає виникненню гарячих зон.
- Прискорене відновлення роботи серверів після аварійних ситуацій. На відміну від охолоджуваних повітрям серверів, які після відключення живлення повітряних кондиціонерів перегріваються протягом декількох хвилин, система занурювального рідинного охолодження може виконувати свої функції від 1 до 4 годин без електрики. Це пояснюється високою теплоємністю холодоагенту і, відповідно, збільшеним запасом холоду в наповненій холодоагентом ванні.
- Зниження внутрішніх вібрацій. Відсутність вентиляторів значно знижує рівень вібрації всередині обладнання.
- Чистота. Холодоагент допомагає тримати сервери в чистоті завдяки постійному струму рідини через стійку та насосний модуль.

Однак у занурювального охолодження є і недоліки, перш за все, це необхідність застосовувати спеціальні стійки та модифікувати серверне обладнання. Новий тип стійок має більшу масу, а тому вимоги до несучої здатності перекриттів зростають.

### 3.4 Геотермальне охолодження

Проектні організації шукають рішення, які дозволять повністю відмовитися від холодильних машин та перейти на альтернативні методи охолодження. В Європі вже кілька років функціонують датацентри, які цілий рік використовують стандартне кліматичне обладнання, але без холодильних машин. Мова йде про два центри обробки даних у Німеччині, що застосовують систему геотермального охолодження.

Геотермальне охолодження базується на факті, що, якщо температура у верхніх шарах ґрунту змінюється в залежності від сезону, то нижче межі промерзання температурні коливання значно зменшуються. Так, на глибинах 10–15 м і нижче температура ґрунту протягом усього року тримається близько 8 °С.

Перший центр знаходиться в Мюнхені, він належить страховій компанії WWK [10] і розташований в офісній будівлі. При будівництві фундаменту будівлі була виявлена підземна річка, яка протікає на невеликій глибині. І тоді народилася ідея скористатися підземними водами для холодопостачання майбутнього серверного приміщення. Причому сама вода з ріки не забирається. По-перше, отримання дозволів у служб екологічної безпеки мало певні складнощі, а по-друге, це вимагало б додаткових витрат на фільтрацію й очищення води. З цих причин була обрана замкнена система охолодження з горизонтальними земляними колекторами.

Під час заливки фундаменту були закладені колектори з поліетиленових трубопроводів довжиною 100 м кожний. Довжина трубопроводів визначалася, виходячи з оптимального гідравлічного тиску.

В результаті загальна схема системи холодопостачання виглядає наступним чином: Ґрунтові води – Теплообмінник – Серверна. Сумарна довжина всіх колекторів досягає кількох кілометрів. Для забезпечення високої надійності системи кожен трубопровід забезпечений відсічними вентилями, які блокують несправний контур. Трубопроводи зовнішнього контуру заповнені теплоносієм – розчином пропіленгліколю (температура замерзання –10 °С), який завдяки охолодженню ґрунтовими водами протягом усього року має температуру близько 10 °С. Насос змушує теплоносій циркулювати по замкнутому контуру. Рідина надходить у проміжний пластинчастий теплообмінник гліколь-вода, в якому і відбувається відвід тепла від серверного обладнання. У вторинному контурі циркулює вода з температурою 14 – 16 °С. Приміщення центру розташовані на цокольному та на третьому поверхах будівлі. Обладнання встановлене в серверні шафи з водяним охолодженням із закритою архітектурою охолодження. Тепловиділення однієї стійки становить 8–16 кВт, сумарна холодопродуктивність системи – 400 кВт, при цьому є резерв потужності як мінімум 100 кВт. Така система охолодження незалежно від пори року забезпечує значення показника PUE на рівні 1,09. Це не дивно, оскільки фактично єдиними споживачами електроенергії системи холодопостачання є два циркуляційних насоси.

Схожа схема геотермального охолодження, але дещо в іншому виконанні реалізована у центрі обробки даних компанії Toshiba, розташованому неподалік від Мюнхена. Однак тут датацентр створювався в існуючій будівлі, і влаштувати горизонтальні колектори було нерентабельно. Тому було прийнято рішення використовувати вертикальні земляні теплові контури, що складаються із заповнених пропіленгліколем поліетиленових труб. Для їх установки пробурили чотири свердловини на глибину 100 м. У кожен свердловину опустили паралельно чотири труби, що утворюють подвійні U-подібні контури. Розчин пропіленгліколя надходить по двох трубах від розподільника вниз і повертається по двох інших трубах назад вгору до колектора. Усі проміжки між трубами і ґрунтом заповнені матеріалом з хорошою теплопровідністю – бетоном. Потужність системи – 80 кВт, в якості внутрішніх блоків системи кондиціонування застосовані міжрядні кондиціонери та ізольований холодний коридор.

Особливість цієї схеми в тому, що система охолодження поєднана з системою опалення будівлі, тепло в яку надходить через тепловий насос продуктивністю 100 кВт (споживана потужність – 25 кВт). У теплий період року тепловий насос не працює, відведення тепла із центру здійснюється тільки за рахунок геотермального охолодження. У холодну пору, коли будівлю необхідно опалювати, в роботу включається тепловий насос, і для опалення використовується тепло, що відводиться від серверного обладнання. Взимку гідротермальний контур підключається тільки тоді, коли при малому завантаженні серверне обладнання виділяє тепла значно менше розрахункового і робота теплового насосу стає нерентабельною.

На ефективність даної схеми сильно впливають теплофізичні властивості ґрунту – його об'ємна теплоємність і теплопровідність, які, в свою чергу, залежать від складу і стану ґрунту. Теплопровідність ґрунту тим більше, чим вище вміст у ньому води, чим більша частка мінеральних компонентів і чим менша поруватість. Щоб скористатися описаним рішенням, перед проведенням бурових робіт необхідно отримати дані геологічної розвідки обраного місця. З карти розрізу стане зрозуміло, на яку глибину потрібно бурити свердловини і які термічні властивості має ґрунт.

### 3.5 Використання тепла від чіллерів

Щоб використовувати тепло, що відводиться від серверного обладнання, для роботи теплового насосу, зовсім не обов'язково бурити свердловини або прокладати земляні колектори. Так само як немає необхідності відмовлятися від вільного охолодження, якщо основним джерелом холоду слугують чіллери.

Зрозуміло, що під час роботи компресорів чіллера отримати нагріту воду досить просто. Але компресори працюють тільки у теплий період року. При температурі зовнішнього повітря нижче 5 °С компресори зупиняються, і холодильні машини переходять в режим вільного охолодження. Тепло від серверного обладнання передається теплоносію і далі фактично викидається на вулицю. Безпосередньо використовувати це тепло не вдасться, оскільки температура рідини становить лише 15 – 18 °С. Але ця вода цілком придатна для роботи теплового насоса. Із системи охолодження тепла вода надходить в тепловий насос, де охолоджується і подається назад у систему охолодження суперкомп'ютера. При цьому в іншому контурі теплового насосу відбувається нагрів води до 50 °С, далі вода може нагріватися в накопичувальному або проточному бойлері до 90 °С. Додатковим джерелом тепла можуть стати електроенергія, газ, рідке або тверде паливо, а також система центрального тепlopостачання. Втім, воду з температурою 50 °С можна безпосередньо використовувати для опалення технологічних приміщень, а також для нагріву повітря в системах вентиляції і повітряного опалення. Застосування теплового насоса дозволить заощадити до 70% енергії, необхідної для опалення будівлі.

Описана схема використання теплового насоса не вимагає проведення земляних робіт, облаштування вертикальних або горизонтальних земляних колекторів. Головна умова – тепловиділення суперкомп'ютера має перевищувати кількість тепла, необхідну для опалення будівлі.

У будь-якому випадку можливість та рентабельність застосування теплових насосів для опалення будинку визначається на етапі проектування. Даний спосіб рекуперації тепла вельми ефективний і не вимагає великих капітальних витрат.

## 4 Висновки

Ми провели аналіз основних підходів до охолодження суперкомп'ютерних центрів. Кожен з них має явні та неявні переваги й недоліки, і у кожному випадку архітектуру системи охолодження обирає конструктор комплексу.

Для кластерів невеликого розміру популярними залишаються кондиціонерні системи завдяки своїй універсальності, невибагливості та доступності спеціалістів з обслуговування.

Системи з рідинними контурами дозволяють будувати набагато більш гнучкі та різноманітні конфігурації, але час експлуатації гліколей складає близько 5 років, після чого треба повністю замінити рідину-теплоносію та проводити чистку системи, цей термін експлуатації для України занадто малий.

Але ж суперкомп'ютери – це насамперед інноваційні технології, тож є майданчиками сміливих експериментів у пошуках нових рішень. Ми описали деякі з них, такі як природне охолодження, адіабатичні та гідротермальні системи. З упевненістю можна сказати, що проблема охолодження ще далека від остаточного вирішення і найближчим часом з'являться нові енергоефективні системи.

## Література

- [1] Е. Дружинин. Энергоэффективное охлаждение суперкомпьютеров. <http://supercomputers.ru>
- [2] <http://www.dell.com/learn/us/en/uscorp1/corp-comm/ebay>
- [3] <http://www.datacenterdynamics.com/focus/archive/2012/04/ebay>
- [4] <http://www.opencompute.org/about/energy-efficiency/>
- [5] Энергоеффективный суперкомп'ютер СКІТ-4.//А.Л. Головинський, А.Л. Маленко, І.В. Сергієнко, В.Г. Тульчинський. Вісник НАН України, 2013, 50 – 59 с.
- [6] Е. Дружинин. Энергоэффективное охлаждение суперкомпьютеров. Краткий обзор технологий охлаждения ЦОД. "Суперкомпьютеры" N 3 (11), 30 с.
- [7] С.М.Абрамов, С.А.Амелькин, А.А.Чичковский. Различные подходы к жидкостному охлаждению. "Суперкомпьютеры" N3, 34 с.
- [8] Горячая вода – для охлаждения суперкомпьютеров. <http://www.pcweek.ru/>
- [9] Tsubame-KFC: суперкомпьютер с погружной системой охлаждения из Японии. <http://habrahabr.ru/company/kingservers/blog/204718/>
- [10] В.Н. Гаврилов. Природа для ЦОДа. Нетрадиционные системы охлаждения. <http://www.iksmedia.ru/>