УДК 69.621.58

І.І. Пуховий, Ю.Є. Ніколаєнко, А.М. Постоленко

ВИКОРИСТАННЯ ХОЛОДУ ІЗ СНІГУ, ЛЬОДУ ТА ГРУНТУ ДЛЯ ОХОЛОДЖЕННЯ НЕВЕЛИКИХ ДАТА-ЦЕНТРІВ В УМОВАХ УКРАЇНИ

In this paper, we consider using renewable sources of cold (snow, ice and ground) for cooling server premises. We determine the required volumes of snow and ice for an average capacity of 10kW during 7 months in southern regions of Ukraine and 4 months in the northern regions of Ukraine. The volume of snow and ice accumulators intended for 7 months of operation taking into account accumulation efficiency coefficient is about 2000 and 1000 tones. The ice and snow accumulators require the area from 50 to 300 square meters. Due to electricity saving and selling CO_2 emission quotes, snow accumulators can pay off within 10 years and ice accumulators can pay off when the ice is produced from water at the consumption place only at the water price less than 1 UAH (0,125 USD) per m^3, which can be obtained through using surface waters and relatively pure cooled sewage water. When the heat of phase transition is used for air heating for ventilation or heat pumps, the ice accumulation system pays off even when the running water is used. The installation of horizontal ground heat exchangers made of polymer pipes with a diameter of 120 to 140 mm for cooling of atmospheric air swill pay off approximately within 3 years.

Вступ

Сучасне суспільство дуже відчутно залежне від інтернету й інших інформаційних технологій, які неможливі без комплексів серверів, кількість яких у великих IT-компаніях досягає сотень тисяч. Наприклад, в Microsoft Chicago Data center (Нортлейк, Іллінойс) встановлено 112 контейнерів із 224 тис. серверів [1]. Дата-центри (ДЦ) споживають до 2 % виробленої у світі електроенергії, на що витрачається близько 25 млрд дол США [2]. Все частіше використовуються природні джерела енергії для охолодження ДЦ (морська вода, відпрацьовані й очищені каналізаційні води [3, 4] тощо). Намітилася тенденція підтримання більш високої температури в приміщеннях за рахунок теплоізольованих каналів холодного і теплого повітря (до 35 °С замість традиційних 20–22 °С [1]). Це дає можливість ширше користуватися джерелами природного холоду.

У великих ДЦ потрібно мати значні резерви холодних джерел і носіїв холоду, як цитовані вище води, а в малих і середніх, що можуть межувати з офісними приміщеннями, можна використати джерела холоду, що знаходяться поряд: атмосферне прохолодне повітря, сніг або лід, які можуть бути заготовлені взимку, та ґрунт на глибині 1–2 м або більше.

Атмосферне повітря за даними [5] в Україні можна використовувати до восьми місяців на рік. Нормами для ДЦ передбачається його вологість у межах 45–55 %.

Сніг є відновлюваним джерелом холоду і разом з льодом може використовуватись для акумулювання холоду взимку з використанням влітку. Перевагою снігу над льодом є те, що відсутні затрати на воду, виготовлення чи добування на водоймах, і мінімальні затрати на транспортування до місця акумулювання.

Сніг має меншу об'ємну акумулювальну здатність, ніж лід, через меншу густину. Свіжий сніг має густину близько 50–100 кг/м^3. На полях і в степах під дією вітру він ущільнюється. При багатоденній заметілі сніг може ущільнитись до 400 кг/м^3. При таненні він поступово досягає густини від 250 до 600 кг/м^3. Акумулювання снігу доцільне, коли густина сягає 400–600 кг/м^3 [6]. Збільшення його густини досягається трамбуванням, що краще робити у відлигу. Цю роботу виконують бульдозери.

Найвідомішим сучасним прикладом масового використання снігу влітку є місто Бібай, що знаходиться на острові Хоккайдо в Японії. Там взимку випадає 6–8 м снігу. Міська влада збудувала біля житлових будинків теплоізольовані ангари, куди взимку бульдозерами заштовхують сніг, холод з якого подається влітку для охолодження повітря замість традиційних кондиціонерів. В місті також є сім підприємств, які використовують влітку холод зі снігу: охолодження повітрям і водою, що циркулює через ангари і об'єкти охолодження [6].

Лід має густину близько 900 кг/м^3, яка дещо змінюється залежно від способу його отримання. Заготівля льоду на водоймах вимагає значних затрат праці, витрати енергії та коштів на навантаження, розвантаження і транспортування шматків льоду. Тому зараз прогресивнішими є методи заготівлі льоду в бурульках біля споживачів холоду з диспергацією води [8, 9], пошаровим заморожуванням [6] та при заморожуванні водяних кра-

пель у повітрі під час їх падіння. Останній метод можливий лише за температур атмосфери нижче –25 °С і для України непридатний. Заморожування в бурульках є найінтенсивнішою технологією в умовах незначних морозів.

Лід інтенсивно використовувався до середини XX ст., а в XIX ст. був великим бізнесом у США з чималим експортом льоду навіть на інші континенти. Відомо, що з Аляски росіянами також постачався лід з водойм для потреб Сан-Франциско.

Лід, як і сніг, зберігають у так званих бунтах об'ємом до 10 тис. м^3 при застосуванні теплоізоляції (тирса) товщиною до 0,5 м. На випадок теплої зими в Україні в XX ст. мали перехідні запаси – лід зберігався до другого літа. Лінія заготівлі природного льоду доходить до Одеси і степового Криму.

Може бути доцільною і рентабельною система охолодження серверних приміщень за допомогою акумульованого взимку снігу та льоду при наявності біля таких споруд майданчиків для їх складування.

Холод ґрунту є хорошим джерелом для кондиціювання і охолодження повітря при влаштуванні переважно горизонтальних каналів на глибині 1–2 м.

Дослідження, проведені у Франції, виявили, що в ґрунті влітку повітря може охолоджуватись на 10–12 °С, а взимку нагріватися на 4–6 °С. Максимальна температура ґрунту спостерігається в липні. При 30 °С в липні температура ґрунту на глибині 1 м – близько 20–21 °С, на 2 м – 17–18 °С, 3 м – 14–15 °С. Приблизно 1 жовтня в м. Базель (Швейцарія) температури на згаданих глибинах однакові і дорівнюють ≈ 15 °С, а в Києві та Рівному (за вимірюваннями авторів) – ≈ 13 °С, тому від вказаних температур в умовах півночі України слід відняти приблизно два градуси. Взимку температура ґрунту на глибині нижче одного метра опускається в Україні до 0–7 °С, а нижче 10 м стабільна і становить 9–10 °С. Усередині червня 2007 р. температура ґрунту біля Києва становила на глибині 1 м близько 15 °С (на основі вимірювань авторів).

До речі, при будівництві приміщення Національного банку України на поч. XX ст. було передбачено кондиціювання повітря за допомогою холоду з льодового акумулятора.

Постановка задачі

Мета роботи – визначити об'єм і площу акумуляторів снігу та льоду для невеликих ДЦ, проаналізувати роботу з ґрунтовими охолоджувачами повітря і визначити укрупнені економічні й екологічні показники використання згаданих вище природних джерел холоду. Як базовий розрахунок було прийнято середнє холодильне навантаження 10 кВт (максимально влітку 15–20 кВт) і максимальний термін використання холоду для ДЦ в Україні: сім місяців (південь) і чотири місяці (північ).

Використання снігу і льоду

З рівняння теплового балансу, яке включає в себе теплоту фазового переходу снігу в воду – 334 кДж на кг, було знайдено потребу в снігу (за масою), яка дорівнювала близько 100 кг за годину в середньому за сім місяців, що становить для півдня України близько 500 т снігу (при його густині 500 кг/м^3 і ККД акумулювання близько 0,5 для такого акумулятора [6], слід заготовляти $V = 2000$ м^3 снігу). Акумулятор займе площу близько 250 м^2 при висоті сім–вісім метрів. Для північних районів України, де атмосферне повітря може бути використане вісім місяців за рік, необхідний об'єм акумулятора на чотири місяці літа можна зменшити майже вдвічі при якісній теплоізоляції бунта і менших втратах холоду влітку ($V = 1000$ м^3 снігу).

При новому будівництві доцільним буде спорудити теплоізольований і заглиблений до половини в землю ангар окремо від будівлі чи вбудований в неї, а поряд з наявними будівлями варто виділити 150–300 м^2 залежно від клімату для створення снігового бунта з теплоізоляцією (наприклад, із тирси).

Усі розраховані цифри, що відносяться до снігу, мають бути зменшені вдвічі для льоду, враховуючи його більшу густину. В результаті отримаємо, що для 10 кВт середнього холодильного навантаження (15–17 кВт максимально влітку, що є у ДЦ інтернет-провайдера "Цифра" у Києві) максимальний об'єм акумулятора льоду буде для семи місяців не більший 1000 м^3, що при висоті сім–вісім метрів вимагає площі ділянки менше 150 м^2, а на чотири місяці в північних районах – $V = 500$ м^3 з відповідним зменшенням ділянки до площі, меншої 100 м^2. Комбінація холоду ґрунту та льоду або снігу може ще вдвічі зменшити запаси льоду з площею під акумулятором 50–80 м^2.

Ділянка чи споруда снігового або льодового акумулятора з вересня до Нового року може ви-

користовуватись для інших цілей (наприклад, для зберігання овочів). Зазначимо, що після розтавання льоду чи снігу у вересні ґрунт під акумулятором буде мати температуру до 5 °С, яка є сприятливою для зберігання овочів.

Використання холоду ґрунту та його комбінація з акумульованим льодом (снігом)

Найбільша потреба в холоді виникає у липні та серпні, коли температура ґрунту приблизно лише на 10 °С нижча температури повітря. В такій ситуації, можливо, буде потрібно додатково використовувати інше джерело холоду – лід, заготовлений взимку. Крім приморських міст, найбільш спекотними в Україні є Луганськ, Дніпропетровськ, Запоріжжя, Ужгород, Джанкой, Кіровоград, Херсон, Сімферополь, Полтава, де середня температура липня становить 21–24 °С. Бували випадки, коли температура повітря вдень перевищувала 40 °С в Луганську, Ужгороді, Донецьку, Запоріжжі, Кіровограді, Євпаторії, Сімферополі, Феодосії, Миколаєві, і досягала 39 °С в Бердянську, Ялті, Чернігові, Херсоні.

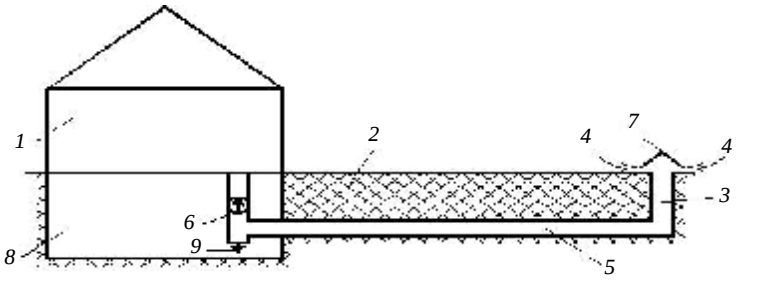

Рис. 1. Система кондиціювання повітря з використанням холоду ґрунту: *1* – будинок; *2* – ґрунт; *3* – вхідний канал; *4* – повітря з довкілля; *5* – ґрунтовий горизонтальний теплообмінник; *6* – вентилятор; *7* – дашок проти дощу і листя; *8* – підвальне приміщення; *9* – спускна лінія конденсату з повітря

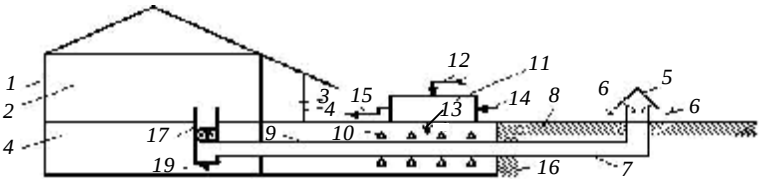

Рис. 2. Система кондиціювання повітря з використанням ґрунтового холоду й акумульованого взимку льоду: *1* – будинок; *2* – житлова зона; *3* – буферна зона; *4* – підвальне приміщення; *5* – дашок проти дощу і листя; *6* – атмосферне повітря; *7* – ґрунтовий теплообмінник; *8* – ґрунт; *9* – теплообмінник льодяного акумулятора; *10* – лід; *11* – кристалізатор, виробник льоду; *12* – вода (взимку); *13* – лід (взимку); *14* – холодне повітря (взимку); *15* – підігріте повітря; *16* – льодосховище; *17* – канал подачі холодного повітря; *18* – вентилятор; *19* – конденсат з повітря

Зазначимо, що Луганськ, Донецьк, Запоріжжя, Дніпропетровськ і Харків також є рекордсменами і по найбільших морозах (розрахункові температури на опалення в Луганську –25 °С, а в інших –22–23 °С). Тут тривалість морозних днів перевищує 110 діб на рік. Таким чином, в першу чергу в цих областях та на півночі і заході України є ефективною заготівля льоду.

На рис. 1 наведено схему використання тільки ґрунтового холоду для охолодження повітря в будівлях, а на рис. 2 – систему типу "ґрунт–лід".

При використанні холоду ґрунту влітку найдешевше закладати горизонтальні теплообмінники на глибину 1–2 м (залежно від регіону). На півдні України потрібно розташовувати повітряні канали нижче 1,5 м. Такий канал *5* (див. рис. 1) охолоджує повітря *4*, яке забирається з атмосфери, на 5–10 °С.

При комбінованому використанні холоду ґрунту і льоду (див. рис. 2) повітря подається для додаткового охолодження після ґрунтового теплообмінника (ҐТ) *7* в акумулятор льоду *16*. Регулювання температури здійснюється збільшенням або зменшенням поверхні теплообміну між льодом (водою, що утворюється при плавленні) та повітрям. Частина каналів *9*, відповідно, відкривається або закривається. Потреба в додатковому охолодженні льодом може виникнути в найбільш спекотні дні липня і серпня, особливо в серпні. Охолоджене льодом повітря подається вентилятором *18* в приміщення *2*. Холодне повітря подається в кристалізатор *11*, звідки направляється, підігрівшись до температур –3–5 °С, для вентиляції або роботи теплового насоса в морозні дні.

При охолодженні повітря в травні, червні, липні та серпні використовується холод ґрунту. Із зарубіжних досліджень випливає, що ҐТ здатний повністю замінити електричний кондиціонер в широтах від 47 до 60° (коефіцієнт заміщення традиційної енергії нетрадиційною дорівнює одиниці [10]). Можна поєднати ҐТ для охолодження повітря і електричний кондиціонер, включивши їх послідовно.

Економічні аспекти

Згідно з дослідженнями з [10] для 1 кВт холодильного навантаження потрібно близько 30 м труби діаметром 120–140 мм при періодичній роботі системи ґрунтового охолодження (напри-

клад, лише в спекотний день) і до 40–50 м такої ж труби при безперервній роботі системи (різниця через збільшення активного радіуса ґрунту, з якого забирається холод при постійній роботі). Таким чином, для 10 кВт холодильного навантаження потрібно 300–500 м полімерних труб.

Витрати на будівництво ҐТ складаються з витрат на труби діаметром від 100 до 140 мм і на їх укладання у викопані траншеї. Вартість одного метра труби дорівнює від 5 до 7 дол США за метр. Для 40 м труби витрата коштів на труби становитиме до 300 дол США на 1 кВт холоду.

Траншея такої довжини глибиною до двох метрів може бути викопана за чотири години. За витрати палива 5 л на годину канавокопач затратить коштів на пальне близько 25 дол США. Стільки ж коштів піде на засипку траншеї. На укладання труби потрібна робота двох робітників протягом чотирьох годин, що коштуватиме приблизно 40–50 дол США, а вартість вентилятора – 10 дол США на кВт холоду. При заробітній платі й амортизації використаного канавокопача (близько 100 дол США) 1 кВт холоду з ҐТ вимагає 550–650 дол США капіталовкладень, що приблизно в три рази більше вартості побутового кондиціонера з холодильною потужністю 1 кВт. Зазначимо, що строк служби і надійність ҐТ значно вищі, ніж кондиціонера.

Вентилятор на 1 кВт холодильної потужності має бути не більше 50 Вт, тому, враховуючи реальний холодильний коефіцієнт 3, така система охолодження споживає в шість разів менше електричної потужності на 1 кВт холоду порівняно з кондиціонером (50 Вт замість 330 Вт) – за місяць буде спожито не більше 35 кВт·год на суму приблизно 4 дол США при ціні електроенергії для підприємств одна гривня (0,08 дол США) за 1 кВт·год замість 240 кВт·год у кондиціонера (30 дол США). Економія коштів на електроенергію в місяць становитиме як мінімум 30 – 4 = = 26 дол США і строк окупності ґрунтового охолоджувача буде 650/26, тобто близько трьох років.

Стосовно акумулювання снігу в літературі також відсутні економічні показники. Витрати складатимуться з роботи бульдозера, який переміщує і трамбує сніг, та облаштування теплоізоляції чи будівництва теплоізольованого ангара. Розрахунки проводимо для максимальної заготівлі снігу чи льоду масою 1000 т. При отриманні холоду зі снігового бунта максимум сім місяців, або 5040 годин, знайдемо середню витрату снігу на 1 кВт потужності використаного холоду із врахуванням витрат на зберігання снігу (1 000 000 кг/5040 год = 198 кг). У пік споживання на 1 кВт потужності буде витрачено до 250 кг снігу за годину. При цьому не буде викинуто 20 т CO_2, а при продажу квот по 10 дол США за тону отримаємо ще 200 дол США на акумулятор в 1000 т або на 1 кВт 20 дол США.

Вважаємо, що робота автомобілів для перевезення снігу і бульдозера дуже потрібна для обов'язкового очищення доріг, тому згадані затрати можна не враховувати і тоді економія буде 156 + 20 = 176 дол США. При врахуванні затрат на роботу автомобілів і бульдозера економічного ефекту не буде.

Вартість теплоізоляції – тирси (насипна густина близько 340 кг/м^3), складатиметься лише з вартості її транспортування – в Києві часто тирсу віддають безплатно. Поверхня бунта на 1000 т снігу приблизно 600 м^2 і при товщині шару тирси 0,5 м потрібно 300 м^3 тирси. При її перевезенні по 5 т на відстань 20 км (10 туди і 10 назад – 0,5 год проїзду туди й назад) потрібно затратити 20 год роботи вантажного автомобіля. Зарплата шофера із врахуванням годин простою при завантаженні-розвантаженні 30 год × 5 = 150 дол США, паливо при витраті 20 кг за годину – 20 кг × 20 год × × 1,5 дол США = 600 дол США. Всього затрат 150 + 600 = 750 дол США. Вартість влаштування системи передачі холоду з акумулятора в ДЦ візьмемо 200 дол США. Тирса може використовуватись довго, тому строк окупності акумулятора з теплоізоляцією становитиме, із врахуванням затрат на укладку тирси (950/96), приблизно 10 років. Капітальні витрати (на перевезення теплоізоляції) на 1 кВт дорівнюватимуть 950/10 = 95 дол США, що менше від вартості кондиціонера з холодильною потужністю 1 кВт.

При влаштуванні споруди для зберігання снігу з сучасною теплоізоляцією отримаємо лише екологічний ефект через значну вартість споруди. Але при співпраці з міською владою, для якої вивезення снігу на далекі відстані є дорогою і важливою проблемою, такий варіант використання снігу може бути реалізований (як у [7] в м. Бібай).

При економічних розрахунках не враховувалась вартість оренди земельної ділянки, яка залежить від місця розташування. Якщо власник земельної ділянки є одночасно власником будівлі з ДЦ, то її вартість можна не враховувати, особливо на міських околицях.

В [11] зроблено оцінку собівартості виробництва природного льоду і порівняння за цим показником із штучним, отриманим у холодильних машинах. Природний лід дешевший у 18–

51 раз від штучного, а використання 1000 т льоду (і снігу) зменшує викиди вуглекислого газу на 20 т. Показано, що енергетичні витрати на виробництво льоду з диспергованої води окупиться повністю при продажу квот на викиди CO_2 за Кіотським протоколом. Капіталовкладення в теплоізоляцію на 25–40 % будуть меншими, ніж для снігу, і не буде затрат на роботу бульдозера. Витрата на воду залежить від наявності дешевшої води – з водойм або скидних очищених вод. При вартості води з водогону для населення в 2013 р. в Києві приблизно 4 грн/м^3 (0,5 дол США) акумулятор на 1000 т льоду матиме водяну вартість 500 дол США. Економія від невикористання електроенергії та продажу квот на вуглекислий газ така сама, як при використанні снігу – 176 дол США. При використанні чистої водопровідної води акумулятор не окупиться економією електроенергії. Окупність буде при вартості тони води менше за одну гривню (0,125 дол США) або за використання льоду з поверхневих водойм.

Використовуючи теплоту фазового переходу води в лід для підігрівання вентиляційного повітря чи повітря (див. рис. 2) перед тепловим насосом [10, 12], виробництво льоду є доцільним економічно також і при використанні водопровідної води.

Висновки

З технічної точки зору, використання холоду з ґрунту, снігу і льоду є можливим до холодильної потужності ДЦ близько 100 кВт.

Використання холоду ґрунту окупиться економією електроенергії і продажем квот на викиди CO_2 протягом приблизно трьох років.

Акумулювання снігу може окупитися за 10 років при умові безплатної його доставки до місця акумулювання з міських доріг та при використанні безплатної тирси для теплоізоляції.

Окупність льодового акумулятора при виготовленні льоду на місці споживання визначається вартістю води й умовами використання теплоти фазового переходу води в лід для підігрівання повітря на різні потреби.

Використання льоду і снігу потребує наявності ділянки для акумулятора від 50 до 300 м^2 залежно від комбінування з іншими джерелами природного холоду і кліматичних умов.

У подальшому варто провести економічні розрахунки із врахуванням плати за оренду ділянки під акумулятором залежно від місця розташування, комбінованого використання холоду ґрунту та снігу чи льоду із врахуванням прибутків від підігрівання повітря теплотою кристалізації води.

1. *Rich Miller*. We Continue Our Review of the World's 10 Largest Data–Centers [Online]. Available: www.datacenterknowledge.com/special-report-the-worlds-largest-data-centers/
2. *Дата* Центр – двигатель энергоэффективности в мире. А в России? [Электронный ресурс]. – Режим доступа: www. habrahabr.ru/company/mediagrus/blog/156047/
3. *Один* из Дата Центров охлаждается оборотной водой [Электронный ресурс]. – Режим доступа: www. habrahabr.ru/post/140255/
4. *Балкаров М.А.* Охлаждение серверных и ЦОД. – К.: ИД "Аванпост-Прим", 2011. – 208 с.
5. *Коваленко К.* Холодный расчет, или как сэкономить на охлаждении ЦОД [Электронный ресурс]. – Режим доступа: www. sib.com.ua>arhiv_2010/2010_6/koval_6_ 2010.htm
6. *Различные* области применения холода / Под ред. А.В. Быкова. – М.: Агропромиздат. – 1985. – 272 с.
7. *Changer* un probleme hivernal en une solution estivale [Online]. Available: http: //web-japan.org /nipponia/ nipponia28/en/– 15.03.2004.
8. *Пуховий І.І., Постоленко А.М.* Диспергація потоку води при малих її витратах та формування бурульок на насадках з дроту // Вісн. Вінницького політехн. ін-ту. – 2012. – № 4. – С. 31–35.
9. *Пуховий І.І.* Експериментальне дослідження диспергації та охолодження малих витрат води при утворенні бурульок і нагріванні повітря теплотою кристалізації // Віднов. енергет. – 2012. – № 2. – С. 23–27.
10. *Пуховий І.І.* Тепло- і холодопостачання будівель з використанням енергії сонця і довкілля: Автореф. докт. дис. – Одеса, 2009. – 40 с.
11. *Пуховой И.И., Ляхович Л.Н.* Энергетические и экологические показатели производства льда в Украине // Пром. теплотехн. – 2004. – 26, № 5. – С. 67–71.
12. *Пуховий І.І., Безродний М.К., Мхітарян Н.М. та ін.* Економія природного газу при заміні котлів тепловими насосами та використання теплоти кристалізації води, як альтернативи теплоті ґрунту // Віднов. енергет. – 2006. – № 1. – С. 15–19.

Рекомендована Радою
теплоенергетичного факультету
НТУУ "КПІ"

Надійшла до редакції
3 грудня 2012 року