

УДК 69. 621.58

І. І. Пуховий, д-р техн. наук, проф.;

М. О. Кривошеєв

АКУМУЛЯТОРИ ХОЛОДУ З ВИКОРИСТАННЯМ ФАЗОВОГО ПЕРЕХОДУ

Проведено огляд існуючих технологій з акумуляції холоду с фазовим перетворенням «вода—лід». Запропоновано схему з акумулятором холоду контактного типу: «вода—лід—повітря». Для будівель «пасивного» типу показано можливість використання сезонних акумуляторів холоду та описано практичних досвід створення об'єктів с сезонним акумулюванням тепла/холоду для невеликих будівель, без підсиленої теплоізоляції. Розглянуто особливості використання добових акумуляторів холоду на прикладі офісної будівлі.

Вступ

Кондиціонування повітря з його охолодженням є необхідною умовою збереження нормальної продуктивності праці людей в жаркі дні літа, які особливо спостерігалися в останні роки в Україні.

Системи кондиціонування та холодопостачання громадських будівель є одними з найенергоємніших інженерних систем. Під час експлуатації вони споживають до 50 % електроенергії та складають 20...30 % від загальної електричної потужності, на яку отримуються технічні умови для приєднання до міських електромереж. Крім того, повна встановлена потужність холодильних машин (ХМ) використовується короткий час — 5 %...10 % від всього часу, що працює холодильна установка, що збільшує інвестиційні затрати.

Зменшити встановлену потужність ХМ можна за допомогою використання акумуляторів холоду. Використання акумуляторів холоду особливо актуальне в умовах обмежених можливостей систем електропостачання.

Метою дослідження є зменшення встановленої потужності обладнання установок кондиціонування повітря та витрат на їх функціонування за рахунок розробки енергоефективних систем з сезонними та добовими акумуляторами холоду з фазовим переходом.

Аналіз існуючих систем добового акумулювання холоду

Відомі такі системи добової акумуляції холоду з використанням теплоти фазового переходу: системи з бінарним холодоносієм «айс-сларрі»; на поверхні випарника (лід на пластинах); накопичення льоду на змійовику; з використанням капсул-заповнювачів.

В [1] подано порівняння вищезазначених систем за такими критеріями (табл.):

— під час виробництва льоду: коефіцієнт перетворення холодильної машини ХМ EER, температура зарядки, умови транспортування, простір і вартість системи;

— під час зберігання льоду: максимальна густина потоку холоду в кВт·г/м³, характеристики ємність-сховища льоду, експлуатаційні характеристики.

— в процесі роботи системи: температура розрядки акумулятора, адаптивність до зміни навантаження, транспортування льоду до споживача.

Як правило, такі системи використовують для добової акумуляції холоду нічну зарядку і денну розрядку та потребують холодильної машини у своєму складі.

Структурна схема систем з добовим акумулятором холоду наведена на рис. 1

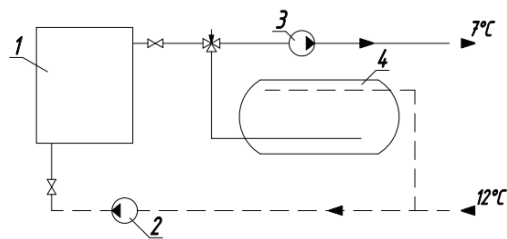
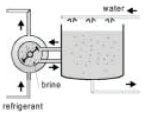
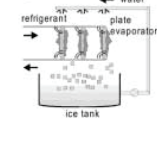
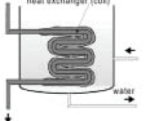
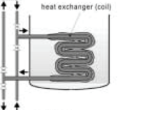
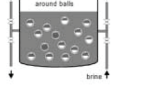


Рис. 1. Система з добовим акумулюванням холоду: 1 — пароконденсаторна (ХМ); 2 — циркуляційний насос (ХМ); 3 — циркуляційний насос системи холодопостачання; 4 — акумулятор холоду з фазовим переходом

Порівняння основних систем акумуляторів холоду з фазовим переходом

Тип системи		Система з бінарним холодоносієм «айс-сларрі» 	Лід на пластинах 	Лід на змійовику (зовнішнє стаювання) 	Лід на змійовику (внутрішнє стаювання) 	Капсули-заповнювачі 
Виробництво льоду	EER	2,4	2,7 ... 3,7 [2]	2,5 ... 4,1 [2]	2,9 ... 4,1 [2]	2,9 ... 4,1 [2]
	Температура зарядки	-12 ... -10 °C	-9 ... -4 °C [2]	-9 ... -4 °C [2]	-6 ... -3 °C [2]	-6 ... -3 °C [2]
	Транспортування холодоносія	Низька витрата та енергоспоживання	Висока витрата та енергоспоживання	Дуже висока витрата та енергоспоживання	Дуже висока витрата та енергоспоживання	Дуже висока витрата та енергоспоживання
	Простір і вартість	Мало; дорого	Багато; необхідне відтаування, дуже дорого	Багато; відносно недорого	Багато; відносно недорого	Багато; відносно недорого
Зберігання льоду	Максимальна густина	46,5 кВт·г/м ³	37...41,7 кВт·г/м ³ [2]	43,5 кВт·г/м ³ [2]	43,5...52,6 кВт·г/м ³ [2]	43,5...52,6 кВт·г/м ³ [8]
	Ємність-сховище	Невелика, недорога; не залежить від холодильної машини	Проста, недорога, має бути під холодильною машиною	Відносно дорога, має бути поруч із холодильною машиною	Закрита, під тиском, має витримувати розширення	Проста, недорога, незалежна від холодильної машини
	Експлуатація	Проста	Лід може розтанути в процесі тривалого зберігання	Заростання змійовиків льодом	Не має проблеми заростання льодом	Проблема нерівномірної зарядки, у випадку, якщо до зарядки був лід
Робота системи	Температура розрядки	-3 °C, max 2 °C, нижче 0 °C, поки є лід	1...2 °C, max 4...5 °C, відносно постійна, поки 80...90 % льоду не розтане [2]	1...2 °C, max 5...6 °C, менше 1,5 °C поки 80 % льоду не розтане [2]	1...3 °C, max 6...7 °C, постійно зростає з розрядкою акумулятора [2]	1...3 °C, max 7 °C, майже постійна, поки 80 % льоду не розтане [2]
	Адаптивність до зміни навантаження	Легко задовольняє змінне навантаження завдяки великій площі кристалів льоду	Легко задовольняє змінне навантаження, якщо лід не злипся	Погано задовольняє навантаження, необхідний барботаж повітрям	Погано задовольняє змінне навантаження	Погано задовольняє змінне навантаження
	Транспортування льоду до навантаження	Перекачується суспензія, необхідне ретельне проектування	Не за допомогою теплообмінника або регулюючий арматури	Неможливо	Неможливо	Неможливо

Холодильна машина 1 заморожує воду в нічний час в акумуляторі холоду 4, а вдень наморожений лід використовується для потреб холодопостачання. Якщо теплової потужності акумулятора холоду не достатньо, то вмикається (ХМ) і холодопостачання одночасно забезпечується і акумулятором холоду, і роботою (ХМ). Якщо (ХМ) на короткий час вийшла з ладу, наприклад, під час профілактичного ремонту, то в цей час в якості основного джерела холоду може використовуватись акумулятор холоду. Під час реконструкції існуючих систем зі збільшенням холодильного навантаження використання акумуляторів холоду дозволяє збільшити потужність на холодопостачання без заміни (ХМ).

В [3] наведений приклад використання акумулятора с фазовим переходом та річним циклом використання, що особливо вигідно за кліматичних умов, коли навантаження на систему кондиціювання в теплий період року можна порівняти з навантаженням системи теплопостачання за холодний період року. В [4] наводяться детальні дані щодо експериментальної експлуатації такої системи (рис. 2).

Ємність теплового акумулятора з фазовим перетворенням 9 складала близько 70 м³. Протягом опалювального періоду вода в акумуляторі, що була низькотемпературним джерелом тепла для теплового насоса, замерзала, а потім протягом теплого сезону цей лід використовувався як джере-

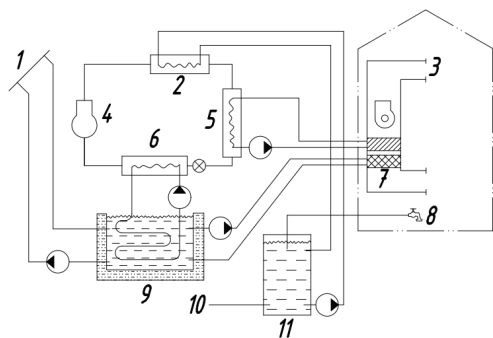


Рис. 2. Система з акумулятором холоду з фазовим переходом та річним циклом використання: 1 — зовнішній колектор (змійовик); 2 — охолоджувач; 3 — система кондиціонування; 4 — компресор; 5 — конденсатор; 6 — випарник; 7 — внутрішній змійовик; 8 — гаряча вода; 9 — резервуар для льоду; 10 — холодна вода; 11 — бак гарячої води

ло холоду для системи кондиціонування.

Оскільки досягти точного балансу між сезонним споживанням тепла та холоду можливо не кожен рік, то схемою передбачається підвід додаткового тепла із навколишнього середовища, за допомогою зовнішнього колектора 1. Після того, як в теплий період року весь запас накопиченого за зиму льоду вичерпувався, тепловий насос починав працювати в нічний час, заморожуючи лід та скидаючи тепло за допомогою зовнішнього колектора 1. Наморожений за ніч лід використовувався для потреб кондиціонування наступного дня, тобто в цьому режимі акумулятор холоду працює в режимі добового акумулювання. В усіх режимах, коли був задіяний тепловий насос, передбачалась утилізація тепла від конденсації на потреби гарячого водопостачання за допомогою охолоджувача перегрітої пари 2.

Існує також концепція сезонного акумулювання льоду, що використовує природний зимовий холод. В

[5, 6] описані способи отримання льоду за допомогою зимового холоду та його використання в системах кондиціонування.

Для оцінки ефективності в режимі охолодження застосовується холодильний коефіцієнт EER (energy efficiency ratio) або « ϵ » у вітчизняній технічній літературі, рівний відношенню холодопродуктивності холодильної машини до потужності, споживаної компресором:

$$EER = Q_C / N, \quad (1)$$

де Q_C — теплова енергія, що відбирається у випарнику ХМ; N — витрачена електроенергія.

Зауважимо, що в якості основного показника ефективності теплового насоса застосовується коефіцієнт перетворення або опалювальний коефіцієнт COP (coefficient of performance) (« ϕ » у вітчизняній літературі), рівний відношенню теплопродуктивності теплового насоса до потужності, споживаної компресором:

$$COP = Q_R / N = (Q_C + N) / N = EER + 1, \quad (2)$$

де Q_R — енергія, що віддається у конденсаторі теплового насоса; Q_C — теплова енергія, що відбирається у випарнику теплового насоса.

Для умов циклу Карно

$$EER = T_K / (T_K - T_0) - 1, \quad (3)$$

де T_K і T_0 — температури конденсації і кипіння в холодильній машині або тепловому насосі.

Температура T_K визначається тиском конденсації холодоагента (тобто температурним рівнем охолоджувального конденсатор-середовища), а T_0 — температурою холодоносія, яку отримує споживач холоду.

Слід зауважити, що вищенаведені співвідношення відповідають ідеальному випадку, в якому відсутні втрати на здійснення холодильного циклу.

Розглянемо холодильну машину типу «вода—вода»:

$$EER = \mu (T_K / (T_K - T_0)) - 1 = \mu (T_0 / (T_K - T_0)). \quad (4)$$

При цьому реальні значення температур конденсації та випарника можна оцінити за допомогою співвідношень:

$$T_K = 273 + (t_{\text{cp}}^k + 10), \text{ } ^\circ\text{C},$$

де t_{cp}^k — середня температура теплоносія на вході/виході з конденсатора; $T_0 = 273 + (t_{\text{cp}}^b - 8)$, $^\circ\text{C}$;

де t_{cp}^b — середня температура холодоносія на вході/виході з випарника; μ — коефіцієнт, що вра-

ховує втрати в реальному циклі та дорівнює $0,55 \dots 0,70$. Для розрахунків беремо значення коефіцієнта $\mu = 0,7$.

На основі [3] для різних температурних рівнів холодоносія, який виробляє ХМ, проведено варіантні розрахунки холодинного коефіцієнта в залежності від середньої температури теплоносія на вході/виході з конденсатора, яка в свою чергу залежить від температури навколишнього середовища, як правило, температури навколишнього повітря. Результати розрахунків показані на рис. 3.

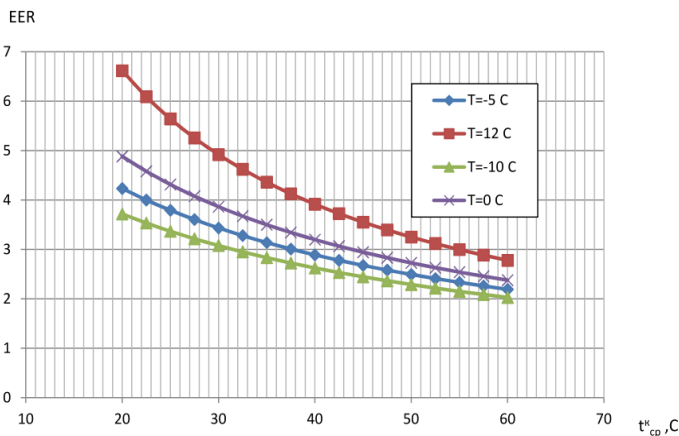


Рис. 3. Залежність холодинного коефіцієнта EER від температура теплоносія, що охолоджує конденсатор t_{cp}^k

працюють, виробляючи холодоносії з температурами: $0\text{ }^{\circ}\text{C}$, $-5\text{ }^{\circ}\text{C}$, $-10\text{ }^{\circ}\text{C}$. Причому зі зниженням температури на конденсаторі різниця в ефективності збільшуються, а у разі підвищення — різниця зменшується. Від'ємні температури холодоносія потрібні для забезпечення режиму зарядки акумулятора холоду з фазовим перетворенням.

Зарядка акумулятора холоду здійснюється в нічний час, коли температура навколишнього повітря менша ніж його температура вдень. Охолоджувачі ХМ не освітлюються сонцем, але все ж слід очікувати деякого зниження сезонного холодинного коефіцієнта системи з акумуляторами холоду у порівнянні з традиційними системами холодопостачання. Але оскільки згідно з [7] нічний пільговий тариф на електроенергію складає 35 % від базового, з урахуванням двозонних тарифів, або 25 % за тризонних тарифів, диференційованих за періодами часу, то з економічної точки зору системи з акумуляторами холоду будуть ефективнішими.

На рис. 4 показаний розрахунковий графік (на 16 липня) зміни потужності системи холодопостачання розташованої в місті Києві стандартної офісної будівлі, площею 5600 м^2 , з яких приблизно 2800 м^2 обладнані системами кондиціонування повітря.

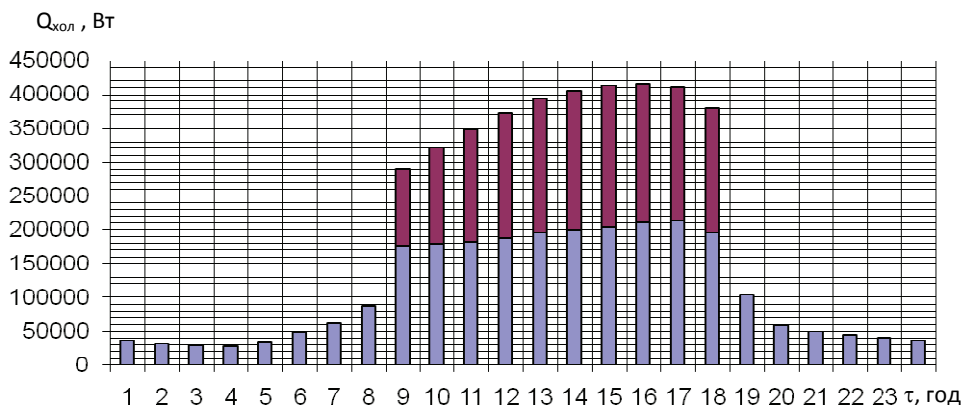


Рис. 4. Зміна холодинного навантаження будівлі Q протягом доби: світлі (сині) стовпчики — навантаження на фанкойли; темні (червоні) — навантаження на охолоджувачі центральних кондиціонерів

Кондиціонування повітря офісних приміщень здійснюється комбінованим шляхом: за допомогою місцевих рециркуляційних фанкойлів; крім того, свіже вентиляційне повітря проходить обробку у центральному кондиціонері (фільтрація, охолодження чи підігрів) та подається у офісні примі-

шення у кількості, що задовольняє санітарні норми. Існують рішення щодо кондиціонування повітря без використання фанкойлів, що підтверджені розрахунками, але, зазвичай, це потребує неприйнятних для інвестора втрат площі на влаштування рециркуляційних повітропроводів, оскільки для зняття теплонадходжень потрібна в 5—10 разів більша витрата повітря, ніж це необхідно за санітарними нормами в частині забезпечення працівників свіжим повітрям.

Згідно з проведеними розрахунками теплонадходжень максимальна пікова продуктивність ХМ складає 430 кВт холоду, з яких 210 кВт витрачаються на охолодження повітря в центральних кондиціонерах, а 220 кВт використовуються на холодопостачання фанкойлів, які здійснюють кінцеву обробку повітря до необхідних комфортних параметрів, що встановлюється користувачем у приміщенні.

В той самий час відомо, що в піковому режимі система буде працювати не більше 10 % від усього часу її роботи. Ми можемо зменшити встановлену потужність та розміри обладнання системи холодопостачання, такого як ХМ, насоси, діаметри трубопроводів та запірної і регулювальної арматури, за рахунок використання акумуляторів холоду на основі охолодженої води чи розсолу, або з використанням теплоти фазового переходу.

Визначимо ємність добового акумулятора холоду, використавши розрахункові дані надходження теплопритоків, при цьому потужність ХМ складатиме 200 кВт, тоді кількість холоду, яку має забезпечити акумулятор холоду впродовж розрахункового дня складе 1549 кВт·год. Маючи на увазі, що згідно з [7] тривалість пільгового нічного періоду для двозонного тарифу складає 8 годин і приймаючи максимальну питому ємність 1 м³ акумулятора холоду 50 кВт·год/м³ [1], отримаємо, що загальний об'єм акумулятора буде складати $V = N/n = 1749/50 = 31 \text{ м}^3$.

Потужності ХМ буде достатньо для зарядки акумулятора в період дії (8 годин) пільгового тарифу ємності:

$$V = (200/50)8 = 32 \text{ м}^3.$$

За рахунок використання акумулятора зменшена встановлена потужність холодильної машини з 430 кВт до 220 кВт, при чому більшу частину часу (не в піковому режимі) холодопостачання буде забезпечуватись за рахунок використання пільгового тарифу у нічний час хоча з трохи меншим холодильним коефіцієнтом.

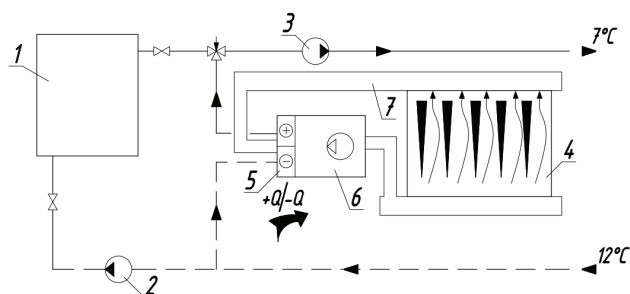


Рис. 5. Система з добовим акумулятором холоду і виробництвом холоду з морозного повітря:

- 1 — парокompресійна ХМ; 2 — циркуляційний насос ХМ;
- 3 — циркуляційний насос системи холодопостачання;
- 4 — контактний акумулятор холоду з фазовим переходом;
- 5 — калорифер вентиляційної установки; 6 — вентилятор вентиляційної установки; 7 — система повітропроводів

повітря через теплообмінник 5, який використовує теплонадходження із системи кондиціонування повітря будівлі. Якщо необхідно, то вмикається і ХМ 1 і ці системи працюють одночасно. Такий акумулятор холоду досліджується авторами в НТУУ КПІ.

Сезонне акумулювання природного холоду

Розглянемо акумулятор холоду для стандартної вищезгаданої офісної будівлі. Мета використання сезонного акумулятора — відмовитися від використання холодильної машини. Згідно з проведеними розрахунками теплонадходжень максимальна пікова продуктивність ХМ складає 430 кВт холоду. У розрахунковий день, 16 липня, розрахункова витрата холоду буде складати

приблизно 3370 кВт·год, за сезон така система буде споживати приблизно 242 620 кВт·год холоду. Маючи на увазі, що згідно з [1] максимальна продуктивність 1 м³ акумулятора холоду з фазовим переходом складає близько 43...53 кВт·год/м³, то необхідну ємність сезонного акумулятора холоду можна оцінити приблизно в 5100 м³ (242620/47), що забагато — об'єм всієї будівлі складає близько 18 000 м³.

Але якщо ми звернемося до концепції «пасивного будівництва»: з посиленою теплоізоляцією, оптимальною орієнтацією та оптимальними світловими отворами з енергетичної точки зору, то це дає змогу на 75...90 % знизити річне споживання енергії на кліматизацію будівлі, у тому числі, і системи холодопостачання [8]. В такому випадку ємність акумулятора холоду буде складати 1300...510 м³. Ці цифри дають втрати корисної площі ділянки чи будівлі близько 200...400 м², що складає 3,5...8 % від загальної площі будівлі з висотою 3 м і надає таким акумуляторам перспективи практичної реалізації.

Висновки

1. Проведено огляд існуючих технологій з акумуляції холоду з фазовим переходом «вода—лід» та запропоновано схему з акумулятором холоду контактного типу: «вода—лід—повітря».

2. Для будівель «пасивного» типу є доцільним використання сезонних акумуляторів холоду; існує практичних досвід створення таких об'єктів для невеликих будівель без покращеної теплоізоляції.

3. Використання добових акумуляторів холоду має такі переваги:

— дозволяє зменшити встановлену потужність ХМ майже в 2 рази, що дозволяє заощадити кошти на підключенні до міських електромереж;

— дозволяє забезпечити добове акумулявання холоду за 8 годин пільгового нічного тарифу на електроенергію, хоча під час роботи ХМ на зарядку акумуляторів холодильний коефіцієнт трохи менший, але пільгові нічні тарифи роблять такі системи економічно доцільними;

— забезпечує резервне джерело холоду;

— у випадку реконструкції дає можливість збільшення потужності вже існуючого обладнання.

СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ

1. Ванг М. Ж. Системы термической аккумуляции на основе бинарного льда (айс-сларри) в многофункциональных зданиях / М. Ж. Ванг, Н. Кусумото // Тепло и массопередача. — 2001. — № 37. — С. 597—604.
2. Dorgan CE; Elleson JS (1994) Design Guide For Cool Storage. ASHRAE, Atlanta.
3. Бекман Г. Тепловое аккумулярование энергии / Г. Бекман, П. Гилли. — М. : Мир, 1987 г. — 272 с.
4. Holman A. S. ACES (The Annual Cycle Energy System) Demonstration : Construction, Startup and Performance Report. / Holman A. S., Brantley V. R. // OAK Ridge National Laboratory, 1978.
5. Пуховий І. І. Економія природного газу при заміні котлів тепловими насосами та використання теплоти кристалізації води, як альтернативи теплоті ґрунту / І. І. Пуховий // Відновлювана енергетика. — 2006. — № 1. — С. 15—19.
6. Пуховий І. І. Безпосереднє використання теплоти довкілля в системах тепло- і холодопостачання / І. І. Пуховий // Технічна електродинаміка. Тем. Випуск. — 2003. — С. 31—33.
7. Постанова НКРЕ №1241 від 20.12.2001 зі змінами №529 від 19.07.2005 «Про тарифи, диференційовані за періодами часу».
8. Пуховой И. И. Анализ теплопритоков и теплотерь, кондиционирование воздуха с использованием льдохранилищ в пассивных зданиях / И. И. Пуховой, М. А. Кривошеев // Энерготехнологии и ресурсосбережение. — 2011. — № 6. — С. 28—33.

Рекомендована кафедрою теплоенергетики

Стаття надійшла до редакції 26.11.12

Рекомендована до друку 28.12.12

Пуховий Іван Іванович — професор, **Кривошеев Максим Олександрович** — здобувач.

Кафедра теоретичної та промислової теплотехніки, Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут», Київ