

ЕНЕРГОЕФЕКТИВНІ ТА РЕСУРСОЗБЕРЕЖНІ ТЕХНОЛОГІЇ АКУМУЛЯЦІЇ ХОЛОДУ В ХОЛОДИЛЬНИХ СИСТЕМАХ

Петренко О. В., Семенюк Д. П., Смілик М. М.

ВСТУП

На час воєнного стану та у найближчій перспективі проблема функціонування холодильного та кліматичного обладнання в умовах відсутності надійного електропостачання є однією із важливих проблем національної безпеки України. Робота об'єднаної енергетичної системи України супроводжується постійними аварійними та плановими відключеннями електричної енергії, що негативно впливає на підтримку необхідних умов зберігання продуктів, які швидко псуються, медичних препаратів та інших видів продукції та надійність функціонування холодильного обладнання, що призводить до великих матеріальних втрат.

Однією із основних цілей російських ракетних ударів є об'єкти інфраструктури, до яких належать складські приміщення для зберігання харчових продуктів та медичних препаратів. В зв'язку з військовими діями виникли проблеми з логістикою та транспортуванням, що не дозволяє швидко доставляти необхідні об'єми продукції до споживачів. Що в свою чергу вимагає розміщення певних запасів харчових продуктів та медичних препаратів недалеко від місця дислокації споживачів. За наявними даними 44 % підприємств відчувають труднощі, пов'язані з логістикою та транспортуванням. Спостерігається розрив звичних транспортних ланцюжків, зокрема безперервного холодильного ланцюга (БХЛ) виробник-склад-споживач. Відомо, що коливання температури зберігання швидкопсувних продуктів та інших термочутливих матеріалів в межах 5–10 °С може призвести до часткового, а в деяких випадках до остаточного їх псування.

1. Виникнення передумов проблеми та формулювання проблеми

Особливо гостро ця проблема стоїть в питаннях продовольчого та медичного забезпечення, як Збройних сил України, так і інших спеціалізованих підрозділів. Виходячи з інформації служб тилового забезпечення та волонтерів у військах існують проблеми з польовим та мобільним холодильним обладнання для доставки та зберігання м'яса, риби та інших продуктів, що швидко псуються, а також

медикаментів. Питання зберігання цієї продукції в польових умовах особливо є гострою в теплі періоди року, адже не завжди є можливість застосування холодильного обладнання з підключенням до електричної мережі, або використання автономних електрогенераторів особливо недалеко від зони бойових дій. Також аналогічні проблеми зі зберіганням харчових продуктів виникають у населення, що проживає в зоні бойових дій при відсутності електричної енергії.

Таким чином, для забезпечення функціонування безперервного холодильного ланцюга в польових та мобільних умовах треба вирішити чотири взаємопов'язаних проблеми: технологічну, що пов'язана з технологією зберігання і перевезення продукції, що вимагає дотримання певних температурних режимів; експлуатаційну, що пов'язана з технічним оснащенням різного виду холодильного обладнання за об'ємами та температурними режимами, транспортними і допоміжними засобами; енергетичну, що пов'язана з надійним забезпеченням електричною енергією для функціонування всього БХЛ; економічно-екологічну, що пов'язана із енергоефективністю та екологічною безпекою такого обладнання впродовж всього періоду експлуатації.

2. Аналіз наявних методів вирішення проблеми та формулювання завдання для оптимального розвитку техніки

Одним із шляхів вирішення вищезазначених проблем на сучасному рівні є застосування систем акумуляування енергії, зокрема теплоти. Відомо, що можливість акумуляування теплової енергії заснована на використанні фізичного або хімічного процесу, пов'язаного з поглинанням і виділенням теплоти. До основних із них відносяться накопичення-виділення внутрішньої енергії під час нагрівання-охолодження твердих або рідких тіл, фазові переходи з поглинанням-виділенням прихованої теплоти, процес сорбції-десорбції або оборотна хімічна реакція, що перебігає з виділенням-поглинанням теплоти¹. Вищеназвані процеси реалізуються в спеціальних пристроях – акумуляторах теплоти².

Застосування акумуляторів теплоти дозволяє згладити нерівномірне надходження теплової енергії, знизити енерговитрати за

¹ Beckman G., Gilli P. V. Thermal energy storage. Wien : Springer Verlag, 1984. 130 p.

² Kreith F., Kreider J. F. Principles of Solar Engineering. Washington, London : Hemisphere Publishing Corporation, 1978. 534 p.

рахунок використання альтернативних джерел енергії та підвищити ефективність роботи енергетичного обладнання³.

За типом процесів у акумуляторах теплоти розрізняють⁴ такі види акумуляції:

- теплоємнісне акумулювання теплової енергії твердими та рідкими тілами за рахунок зміни температури речовини;
- латентне акумулювання теплової енергії за допомогою використання теплоти фазового переходу речовин;
- термохімічне акумулювання теплової енергії.

Окремим випадком систем акумулювання теплоти є системи акумулювання холоду, які застосовуються в холодильній та кліматичній індустрії.

Робота вищезазначених холодильних систем заснована на накопиченні теплової енергії в акумуляторах холоду при температурі робочої речовини нижче температури навколишнього середовища.

Для акумуляції холоду в холодильній і кліматичній індустрії найчастіше використовують ємнісний і латентний способи акумулювання теплової енергії.

Основне завдання акумуляторів холоду – згладжування нерівномірної потреби в холодопостачанні протягом доби, зменшення встановленої потужності холодильної системи та споживання енергоресурсів (за даними багатьох дослідників відсоток економії може становити від 30 до 70%). Прикладами саме такого використання акумуляторів холоду є, зокрема, системи кондиціонування повітря в промислових цехах, будинках, офісах, системи із сонячними колекторами, системи охолодження молока та молочних продуктів на молокозаводах. Незалежно від специфіки конкретного виробництва нерівномірність теплових навантажень на відповідні холодильні системи визначається періодичною зміною зовнішніх теплонадходжень в приміщення (схід і захід сонця), а на прикладі молокозаводів – періодичністю надходжень молока впродовж доби, необхідністю його охолодження та переробки негайно і в стислі терміни. А в умовах військових дій та за відсутності надійного електропостачання включення в холодильні системи акумуляторів холоду дозволить згладити температурні коливання охолоджуючого середовища.

³ Левенберг В. Д., Ткач М. Р., Гольстрем В. А. Акумулювання тепла : монографія. Київ : Техніка, 1991. 93 с.

⁴ Thermal Energy: Sources, Recovery, and Applications / Boca Raton, Shah Y. T., editor. FL. USA : CRC Press, 2018. P. 650.

Сьогодні розрізняють холодильні системи з акумуляторами холоду «вода–лід» та евтектичні холодильні системи⁵.

У системах кондиціювання повітря (СКП), холодильних установках підприємств харчової та переробної промисловості найпоширенішими є акумулятори холоду, що використовують теплоту фазового переходу «вода–лід». Найчастіше застосовують акумулятори холоду із заморожуванням льоду на поверхні випарника холодильної машини та акумулятори холоду з льодоводяною сумішшю⁶.

Ці системи мають свої переваги та недоліки. До переваг слід віднести екологічну чистоту робочої речовини, дешевизну, доступність, не токсичність, вибухобезпечність. Недоліки слід розглядати окремо, відповідно до реалізації способу акумуляування холоду та його конструктивного виконання⁷. Розглянемо основні конструктивні рішення вище зазначених холодильних систем.

Технологія акумуляції холоду з накопичувальною (буферною) ємністю

Найпростішим за конструктивними виконанням є холодильна система на базі чілерів з рідинним акумулятором холодом виконаним у вигляді буферної ємності⁸. Для забезпечення можливості постачати холодом кілька споживачів з непостійною витратою рідини та змінними тепловими навантаженнями, з необмеженим перепадом температур, використовують систему охолодження рідини з накопичувальною (буферною) ємністю (рис. 1).

Буферний бак має подвійне призначення. По-перше, він необхідний для згладжування нерівномірності теплового навантаження на холодильну машину, викликану зниженням витрати рідини, що охолоджується. В даному випадку ємність буферного бака визначається різницею між холодопродуктивністю установки та мінімальною кількістю теплоти, яку необхідно відвести від об'єкта під час обов'язкової стоянки компресора.

⁵ Холодильні установки : підручник / І. Г. Чумак та ін. ; за ред. І. Г. Чумака. 6-е вид., перероб. та доп. Одеса : Пальміра, 2006. С. 342.

⁶ Потапов В. О., Петренко О. В., Золотарьов В. В. Перспективні напрями розвитку холодильних систем з акумуляцією холоду. *Прогресивні техніка та технології харчових виробництв ресторанного господарства і торгівлі*. 2013. Вип. 2.(18). С. 72.

⁷ Energy.gov. Офіційний сайт. URL: <https://www.energy.gov/energy-storage-grand-challenge/energy-storage-grand-challenge>. (дата звернення 15.04.2023).

⁸ Бондарь Е. С., Калугін П. В. Енергозберігаючі системи кондиціювання повітря з акумуляцією холоду. URL: <http://www.sun-ice.com.ua/news/>. (дата звернення 05.05.2023).

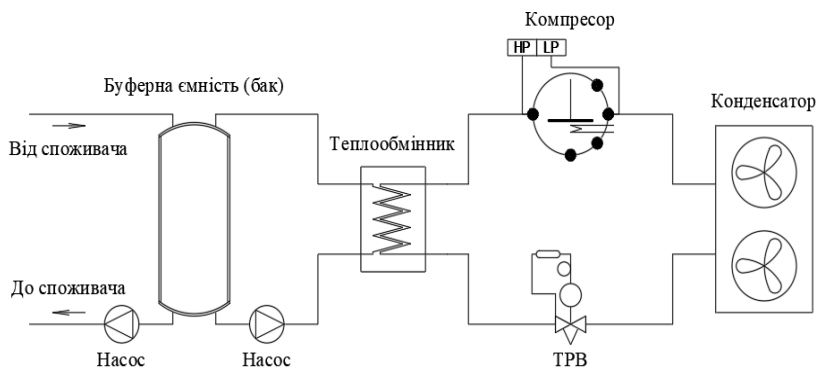


Рис. 1. Схема холодильної системи з буферною ємністю

По-друге, буферний бак використовують як акумулятор холоду збільшення холодопродуктивності установки в період пікових теплових навантажень. У цьому випадку мінімальний обсяг буферного бака визначається з різниці між необхідною та середньою холодопродуктивністю холодильної машини.

Розрахунок буферних баків полягає у визначенні акумуляуючої здатності запасеного обсягу води. Акумуляуюча здатність води визначена її теплоємністю, що дорівнює $4,187 \text{ кДж} \cdot \text{кг}/^\circ\text{C}$.

Таким чином, холодопродуктивність установки в пікові періоди підвищується без збільшення встановленої потужності компресора. Зниження встановленої потужності компресора знижує навантаження на електричній мережі, і зрештою дозволяє знизити витрату електроенергії.

Технологія акумуляції холоду з рідинними акумуляторами-резервуарами витискувального та випорожнювального типів із відокремленими контурами циркуляції

Розглянемо конструктивні особливості рідинних акумуляторів-резервуарів витискувального та випорожнювального типів з відокремленими контурами циркуляції⁹. Так, в акумуляторі-резервуарі витискувального типу холодоносії з різною температурою відокремлені перегородкою, переливаючись через яку, один із них витискує інший, до певної міри змішуючись з ним. Найчастіше такі акумулятори є акумуляторами-резервуарами з відкритою (до атмосфери) поверхнею холодоносія. Акумулятори випорожнювального типу характерні для замкнутих та закритих систем циркуляції холодоагенту (без розриву

⁹ Вторинні холодоносії. URL: <http://www.nio-holod.com.ua>. (дата звернення 20.04.2023).

течії). З іншого боку, для зарядження таких акумуляторів холоду можна використовувати як природний, так і штучний холод. Тому частіше передбачається відокремлення джерела холоду та акумулятора-резервуара.

Одна із типових схем холодопостачання з використанням рідинного акумулятора холоду витискувального типу наведена на рис. 2.

Коли витрати холодоносія на лінії «до споживачів холоду» зменшуються, зростає тиск у цій лінії і надлишки холодоносія за допомогою регулятора тиску «після себе» спрямовуються в акумулятор-резервуар. Цей резервуар поділено вертикальними перегородками, що мають перешкоджати швидкому змішуванню оплененого (від споживача холоду) та охолодженого потоків холодоносія. Коли теплове навантаження є меншим, ніж холодопродуктивність холодильної установки, необхідна температура холодоносія підтримується циклічною роботою холодильних машин за допомогою реле температури 1РТ. При підвищенні коефіцієнта робочого часу до 1 та збільшенні температури холодоносія вище заданого значення реле 2РТ подає сигнал на клапан змішування КЗ. Тоді помпа починає забирати холодоносії, як оплений, так і охолоджений. У випарник почне надходити більш холодний холодоносії, відповідно знизиться і температура холодоносія на лінії «до споживача холоду». Очевидний недолік наведеної схеми полягає у несталості температури холодоносія, що спрямовується до споживача (порушення технологічних вимог), у зміні теплових навантажень на випарник (небезпека зміни режимів кипіння холодоагенту) тощо. Чим більшим є об'єм акумулятора, тим меншими будуть діапазони змін температур холодоносія на лінії «до споживачів холоду» і теплових навантажень на холодильну установку.

На рис. 3 наведена схема з відокремленими контурами циркуляції оплененого та охолодженого холодоносіїв, принцип роботи аналогічний вище наведеній холодильній системі, допускає такий самий рівень автоматизації за діапазоном змін температур чи теплових навантажень на холодильну установку. Особливих переваг даної схеми в порівнянні з схемою наведеною на рис. 2 немає.

Принципові можливості стабілізації температури холодоносія, що спрямовується до споживача холоду, можливості регулювання витрат холодоносія за умов стабільної роботи холодильної установки, можливості достатньо надійної автоматизації роботи всіх елементів холодильної установки у процесах «зарядження», «розрядження» акумулятора холоду дає холодильна система із незалежними контурами циркуляції оплененого та охолодженого холодоносіїв (рис. 4).

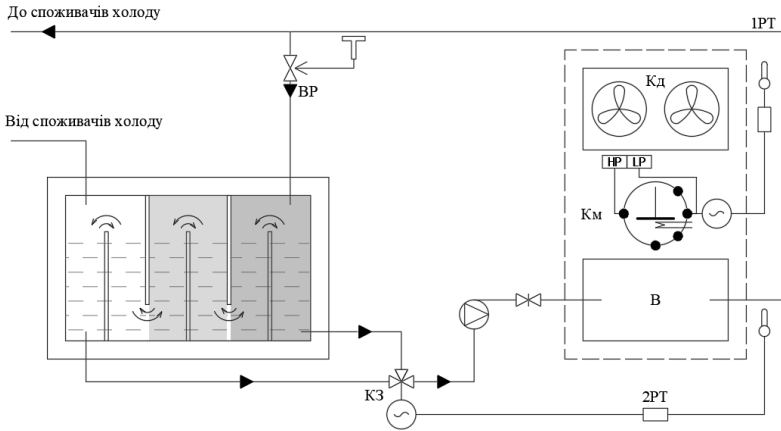


Рис. 2. Принципова схема холодопостачання з проміжним холодоносієм та рідинним акумулятором холоду:
В – випарник; **Км** – компресор; **Кд** – конденсатор; **1РТ, 2РТ** – реле температур; **КЗ** – клапан змішувальний; **ВР** – регулювальний вентиль

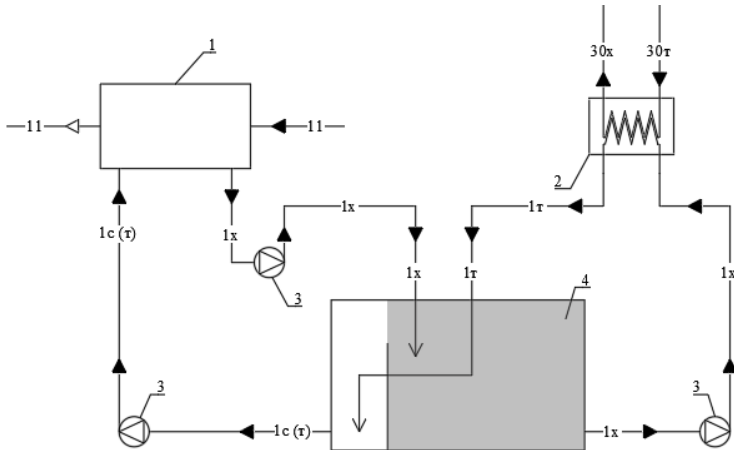


Рис. 3. Принципова схема охолоджувальної системи з проміжним холодоносієм та рідинним акумулятором холоду з двома відокремленими контурами циркуляції холодоносія:
1 – випарник; **2** – теплообмінний апарат; **3** – помпи; **4** – акумулятор;
1x – охолоджений холодоносія; **1r** – отеплений холодоносієм;
1c(r) – холодоносії після змішування; **11** – аміак; **30x** – холодний продукт; **30r** – теплий продукт

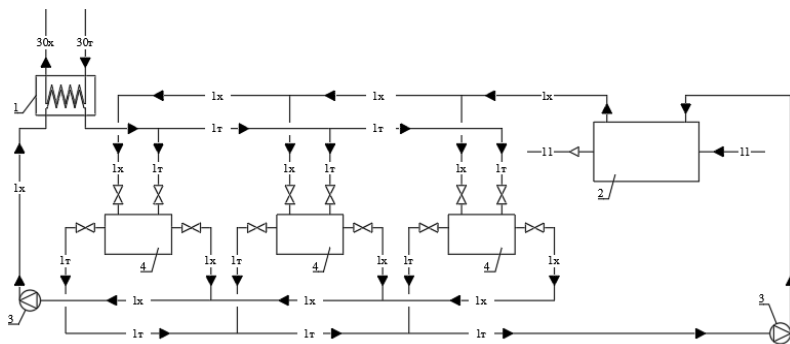


Рис. 4. Принципова схема холодопостачання з проміжним холодоносієм, акумулятором холоду та з незалежними контурами циркуляції оплененого й охолодженого холодоносія:

**1 – теплообмінний апарат; 2 – випарник; 3 – помпи; 4 – акумулятори;
 1x – охолоджений холодоносієм; 1r – опленений холодоносієм; 11 – аміак;
 30x – холодний продукт; 30r – теплий продукт**

Тут можливо заздалегідь «зарядити» два із трьох резервуарів, а в третій порожній злити опленений холодоносієм після теплообмінних апаратів. У робочому ж циклі акумулятора кожний із резервуарів по черзі знаходиться в одному із таких станів:

- «зарядження», коли холодоносієм в резервуарі охолоджується від температури на виході із теплообмінного апарата до температури, необхідної на його вході;
- «робота», коли холодоносієм із «зарядженого» резервуара подається в технологічні апарати;
- «очікування», коли резервуар заповнюється опленений холодоносієм із технологічних апаратів.

Наприклад, коли резервуар після закінчення стану «робота» випорожниться повністю, переключення системи вентилів та помп переводить його у стан «очікування» і т. д.

Автоматизована система керування холодильної системи регулює роботу помп, вентилів з електроприводом за сигналами регуляторів температури у резервуарах, системи термометрів, трипозиційних сигналізаторів рівня холодоносія у резервуарах, сигналізаторів тиску у трубопроводах, а також приладів ручного керування. Відповідний алгоритм керування розроблено до рівня електронної інтегральної схеми (мікропроцесора). Нерівномірність температури холодоносія, що подається із «зарядженого» акумулятора-резервуара, може виникнути за рахунок стратифікації холодоносія по висоті резервуара.

Але якщо резервуар теплоізолюваний ззовні, а внутрішня стінка резервуара виготовлена із теплопровідного матеріалу, то за рахунок природної конвекції температура холодоносія вирівняється по всьому об'єму.

Кількість резервуарів у схемі, наведеній на рис. 4, може бути збільшена, що надає низку технологічних переваг, але збільшує необхідну кількість pomp, вентилів тощо. Необхідні об'єми акумуляторів (у схемах на рис. 2–4) розраховуються, виходячи з найбільш напруженого плану виробництва, витрат холодоносія протягом доби, гідравлічних характеристик контурів його циркуляції, характеристик теплообмінних апаратів тощо. Але заздалегідь ясно, що такі об'єми будуть досить великі і це є істотним недоліком.

Технологія акумуляції холоду шляхом наморожування льоду на поверхні випарника

Розглянемо технологію акумуляції холоду із наморожуванням льоду на поверхні випарника холодильної машини, у цьому випадку наморожування шару льоду на теплообмінній поверхні випарника товщиною 20...40 мм приводить до зменшення коефіцієнта теплопередачі в 2...2,5 рази та зниження температури кипіння холодогенту¹⁰. Зниження ж температури кипіння холодоагенту на 1 °С у діапазоні -10...-20 °С приводить до зниження холодопродуктивності та відповідно збільшення витрат електроенергії на виробництво холоду до 2 %.

Ця технологія застосовується для отримання крижаної води та накопичення запасу льоду (при явно виражених короточасних піках теплових навантажень споживача). Крижану воду отримують за допомогою занурювальних випарників (рис. 5).

Випарник занурений у воду та забезпечує її охолодження, інтенсивність якого посилюють за допомогою мішалки або барботажу повітря. На випарнику проводиться наморожування льоду. Лід може наморожуватися на випарнику у значній кількості під час знижених теплових навантажень. При пікових навантаженнях лід тане, забезпечуючи додаткові можливості охолодження установки. В установках із занурювальним випарником при збільшенні товщини льоду холодильна машина працює на нижчій температурі кипіння, що знижує її продуктивність. До того ж інтенсивність танення льоду нижча. При пікових навантаженнях спостерігається підвищення температури води на виході залежно від температури вхідної води.

¹⁰ Петренко О. В., Потапов В. О., Семенюк Д. П., Якушенко Є. М. Холодильні машини та установки. Дипломне проектування: навчальний посібник. Харків : ХДУХТ, 2019. С. 128.

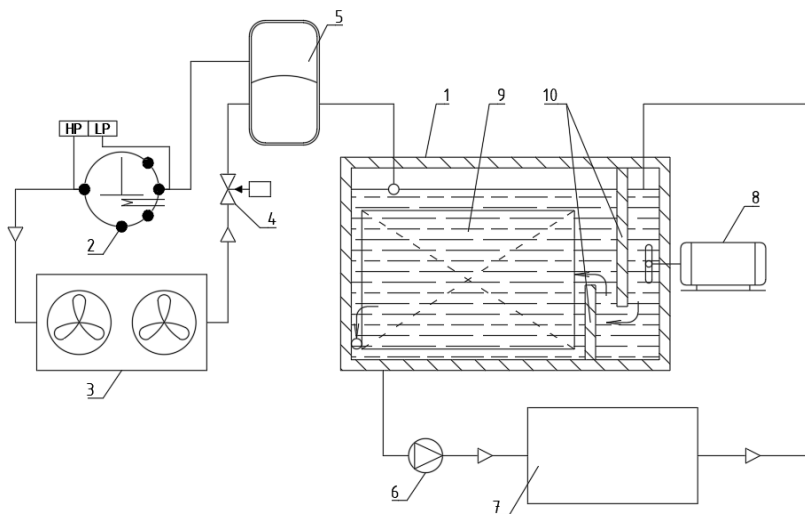


Рис. 5. – Система охолодження з панельним льодоакумулятором:
1 – бак акумулятора; **2** – компресор; **3** – конденсатор; **4** – регулюючий вентиль; **5** – елімінатор рідини; **6** – насос; **7** – охолоджувач;
8 – електродвигун мішалки; **9** – панель випарника; **10** – перегородка

До настання пікового навантаження на поверхні випарника холодильної машини наморозується шар льоду, що плавиться в період пікового навантаження. В описаний акумулятор холоду на базі випарника панельного типу з площею поверхні 30 м^2 . При товщині наморозування льоду 40 мм , масі льоду наморозеного 1 т час наморозування становить $3,8 \text{ год}$, температура води на виході з випарника $+1 \text{ }^\circ\text{C}$, смінь водяного бака $2,51 \text{ м}^3$. Питома теплова навантаження становить середньому 1337 Вт/м^2 , коефіцієнт тепловіддачі – $300 \dots 800 \text{ Вт/м}^2 \cdot \text{К}$.

Льодоакумулятори, що застосовуються в даний час мають такі основні недоліки:

- наморозування льоду здійснюється на поверхні випарника, що збільшує її термічний опір, знижує температуру кипіння холодильного агента і підвищує витрати електроенергії на акумуляування холоду;

- зберігання в ряді випадків льоду на поверхні випарника значно збільшує металоемність і масу акумуляторів;

- використання льоду з температурою плавлення $0 \text{ }^\circ\text{C}$ у випадках, коли необхідна температура холодоносія значно вище (наприклад, в системах кондиціонування повітря, де споживається вода з

температурою 8...10 °С), викликає перевитрату електроенергії, призводить до додаткових капітальних затрат на теплоізоляцію обладнання;

– низькі швидкості плавлення льоду і обмежена теплообмінна поверхня при розрядці льодоакумуляторів призводить до змін температури холодоносія при пікових теплових навантаженнях.

Незважаючи на ці недоліки, акумулятори з наморожуванням на поверхні випарника використовуються в ряді обладнання, наприклад в установках для охолодження молока при транспортуванні.

Технологія акумуляція холоду льодяною сумішшю

У разі застосування акумуляторів холоду із льодоводяною сумішшю лід виготовляють за допомогою льодогенератора та завантажують в акумулятор холоду (рис. 6).

Поверхня теплообміну льоду в цьому способі значно більша, ніж в акумуляторах з накопиченням льоду на поверхні випарника, акумуляція холоду відбувається при постійній температурі кипіння холодоагенту в льодогенераторі. У роботі запропоновано застосування «лускатого» льоду¹¹. За твердженням авторів, важливою перевагою акумуляторів холоду з лускатим льодом є відбір води постійної температури +1°С навіть при піковому навантаженні. Коефіцієнт теплопередачі теплообміннику охолоджувача при застосуванні пневматичної циркуляції води досягає 580 Вт/м² · К. Для отримання 1 т льоду використовується бак об'ємом 4 м³ [3].

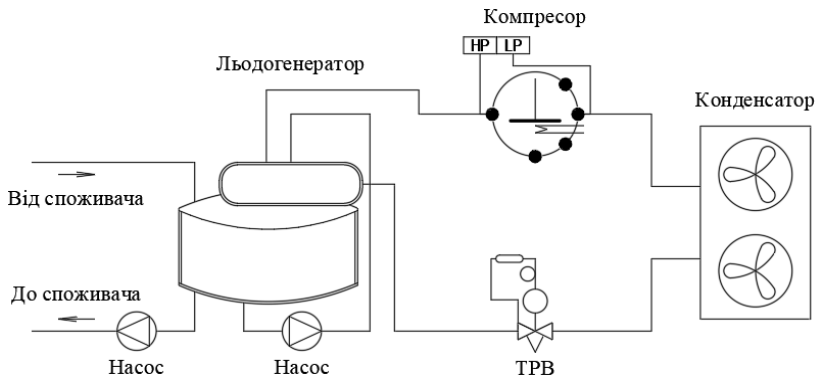


Рис. 6. Схема холодильної системи з льодогенератором

¹¹ Кухаренко В. М. Рідкий лід та холодильні технології: навчально-методичний посібник. Харків : ХПІ, 2019. С. 78.

Однак недоліком акумуляторів з льодоводяною сумішшю є необхідність перемішування цієї суміші та низька температура кипіння холодильного агенту, що знижує показники роботи холодильних машин.

У літературі описані різні методи підвищення ефективності акумуляторів холоду з льодяною сумішшю, наприклад, зрошення генератора холоду циркулюючою водою, барботаж повітря в акумуляторах, розміщення випарника льодогенератора в баку акумулятора та ін.

Негативну роль у разі використання акумуляторів холоду «вода-лід» відіграє й кінетика танення льоду, зумовлена по-різному спрямованими діями градієнта температур і піднімальної архімедової сили, обумовленою аномальною залежністю густини від температури. Акумуляований у такий спосіб холод складно використати повністю при різкозмінній у ньому потребі. Це виражається в тому, що не вдається стабілізувати температурний рівень крижаної води та тим самим гарантувати охолодження рідин і продуктів до необхідної температури.

Технологія акумуляція холоду з використанням капсул-заповнювачів

Ефективнішим є поєднання ємнісного та латентного способів акумуляції холоду з використанням проміжного холодоносія та капсул-заповнювачів. У цьому випадку лід в акумуляторі холоду не має безпосереднього контакту з рідиною, що охолоджується, а його утворення відбувається в поліетиленових капсулах-накопичувачах¹². Цей акумулятор холоду є теплоізолюваним резервуаром, що заповнюється такими капсулами. Капсули відливаються під тиском із поліетилену високої щільності та заповнюються рідинним розчином кристалогідратів.

У резервуарі акумулятору холоду циркулює рідкий холодоносіє з температурою нижче 0°C, що викликає кристалізацію рідини всередині заповнювачів. Тим самим досягається акумулявання енергії у вигляді прихованої теплоти кристалізації в період фазового переходу з рідкого стану у твердий. Форма капсул у вигляді кулі забезпечує велику площу теплообміну. Використовуючи різні рідини як для охолодження, так і для заповнення капсул, можна задавати температуру льодоутворення.

Такий спосіб акумуляції використано в обладнанні французької фірми “Cristopia” (енергозбережні системи STL), що є підрозділом провідного європейського виробника кліматичної техніки компанії “CIAT” (Франція). Цей виробник пропонує ряд баків-акумуляторів об’ємом від 2 до 100 м³ і капсули-заповнювачі (діаметром 96 мм для

¹² Cristopia. Офіційний сайт. URL: <http://www.cristopia.com>. (дата звернення 20.04.2023).

СКП і 77 мм для холодильних установок), здатні акумулювати теплову енергію при температурах від -33 до 27°C .

Капсули-заповнювачі витримують не менше 10 000 циклів (заморожування-розморожування), термін служби – не менше 20 років. Фірма “Cristoria” пропонує цілий ряд капсул-заповнювачів, розроблених для конкретних галузей.

Спрощена гідравлічна схема (основні елементи), якою можна простежити принцип роботи акумуляторів холоду STL, представлена на рис. 7.

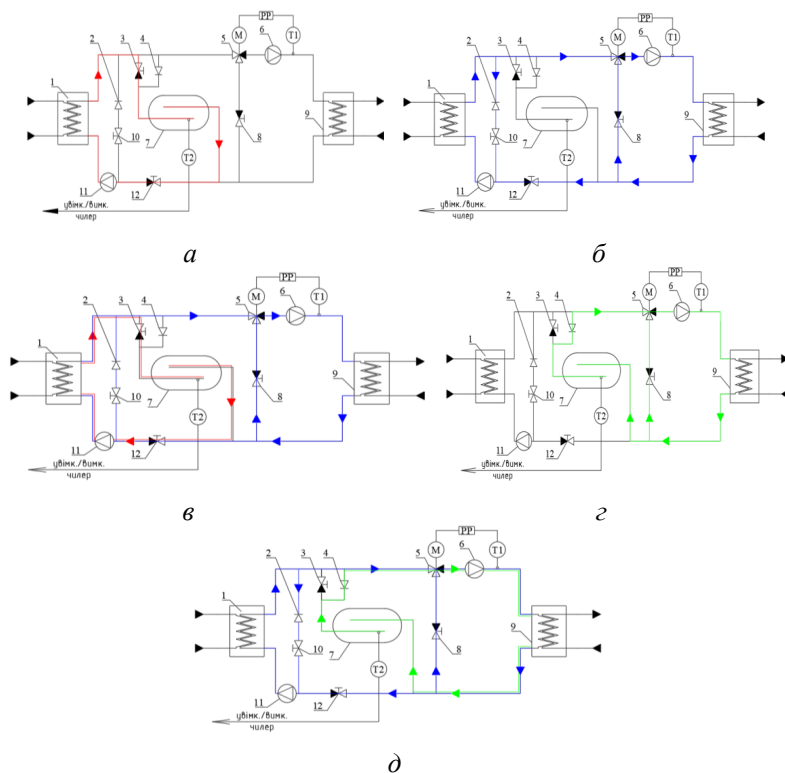


Рис. 7. Гідравлічна схема акумуляторів холоду:

- а** – накопичення холоду в акумуляторі; **б** – пряме охолодження;
- в** – пряме охолодження та накопичення холоду в акумуляторі;
- г** – розрядження акумулятора холоду; **д** – розрядка акумулятора холоду та пряме охолодження; **1** – теплообмінник водоохолоджувача;
- 5** – триходовий вентиль; **6, 11** – насоси; **7** – акумулятор холоду;
- 9** – теплообмінник кондиціонера

Схема складається з двох контурів – первинного і вторинного. Первинний контур служить для заряджання акумулятора холоду. У цьому контурі охолоджувальна рідина циркулює з постійною витратою і температурою, що змінюється. У вторинному контурі рідина, що охолоджує, циркулює з постійною температурою, але зі змінною витратою.

У теплообміннику (випарнику) водоохолоджувача (рис. 7, поз. 1) фреон випаровується і знижує температуру рідини, що охолоджує.

Насоси (6) і (11) забезпечують циркуляцію рідини за первинним та вторинним контурами. Регулювання витрати охолоджуючої рідини за вторинним контуром здійснюється триходовим вентиляем (5).

Робота системи включає 5 режимів.

Режим накопичення холоду в акумуляторі (рис. 7, а)

У період, коли не потрібно охолоджувати навантаження (в ВКВ – приміщення), працює лише первинний контур. Температура рідини, що охолоджує, знижується до температури, меншої точки кристалізації заповнювача в капсулах. Фазовий стан заповнювача змінюється, абсорбується енергія охолодження. У цьому режимі працює тільки насос (11), відкриті клапани (3) та (12), а триходовий вентиль (5) повністю закритий.

У міру кристалізації коефіцієнт теплопередачі поступово зменшується і температура рідини, що охолоджує, знижується. Зниження температури характеризує закінчення циклу заряджання. За встановленої температури термостат Т2 відключає холодильну машину.

Режим прямого охолодження (рис. 7, б)

У разі, коли акумулятор холоду заряджений, а навантаження не перевищує настановної продуктивності водоохолоджувача, реалізується режим прямого охолодження. Вентиль (3) закритий, регулювання продуктивності здійснюється триходовим вентиляем за температурою охолодженої рідини. Подача рідини по контуру здійснюється насосами (6) та (11).

Режим прямого охолодження та накопичення холоду в акумуляторі (рис. 7, в)

Цей режим використовується, коли потреба в холоді менша за продуктивність водоохолоджувача, а температура рідини вище заданої. У цьому режимі працюють насоси (6) та (11). Клапан (10) закритий. Накопичення холоду здійснюється через клапан (3) до спрацьовування термостату. Регулювання продуктивності проводиться триходовим вентиляем датчику Т1.

Режим розряджання акумулятора холоду (рис. 7, г)

Якщо необхідно провести регламентні та ремонтні роботи з чілером, використовується холод, накопичений в акумуляторі.

У цьому режимі клапани (3), (10) і (12) закриті, компресор холодильної машини вимкнений і в теплообмінник кондиціонера надходить рідина, що охолоджується в акумуляторі холоду.

Режим розряджання акумулятора холоду та пряме охолодження (рис. 7, д)

При пікових навантаженнях, коли продуктивності водоохолоджувача недостатньо, акумулятор холоду вмикається на розрядку. Насоси (6) та (11) працюють, регулювання продуктивності здійснюється триходовим вентилям (5).

Таким чином, для розглянутих холодильних систем з акумуляторами холоду «вода-лід» перспективним напрямом підвищення енергоефективності є пошук конструктивних рішень, направлених на усунення безпосереднього контакту льоду з рідиною, що охолоджує, та застосування речовин, здатних змінювати свій фазовий стан у широкому інтервалі температур (як у плюсовому так і в мінусовому) та не змінювати фізичних та хімічних властивостей протягом багатьох робочих циклів.

Технологія акумуляції холоду з використанням евтектичних розчинів

На підприємствах торгівлі, холодильному автотранспорті, контейнерних перевезеннях, а також у побуті застосовують акумуляторні системи, що використовують теплоту плавлення евтектичних розчинів – евтектичні холодильні системи¹³.

Евтектичний лід виготовляють шляхом заморожування водних розчинів солей кріогідратної концентрації, органічних речовин та їхніх сплавів і сумішей у закритих металевих або пластмасових ємностях. Заморожені евтектичні розчини мають низьку постійну температуру плавлення – нижче 0 °С (до мінус 80 °С).

Прикладом перспективного застосування ЕХС є безмашинне охолодження із застосуванням АХ в ізотермічному холодильному транспорті для внутрішньоміських перевезень.

За кордоном цей вид охолодження широко розповсюджений, перш за все завдяки екологічній чистоті, зокрема фірма “Carrier Transicold” (Франція) пропонує серію установок з машинно-акумуляційним охолодженням “Vatna” для ізотермічних автофургонів об’ємом від 4 до 23 м³ із температурою замерзання евтектичного розчину мінус 32 °С. Установки призначені для перевезення морозива та швидкозаморожених продуктів і розраховані на 14 годин безперервної роботи

¹³ Семенюк Д. П., Петренко О. В. Холодильне обладнання : підручник. Харків : Світ книг, 2021. С. 355.

при температурі навколишнього повітря 30°C¹⁴. Світовий лідер у виробництві евтектичних плит – фірма “FIT s.p.a.» з Італії – пропонує серії евтектичних плит моделей EBS, EFR і ES.

Транспортний засіб для перевезення заморожених продуктів має бути оснащений ізотермічною будкою та приєднаннями для холодильного агрегату, що підключається до евтектичних плит. Евтектичні плити, своєю чергою, встановлюються всередині ізотермічної будки на її стелі, що дозволяє підтримувати постійну температуру в усьому обсязі ізотермічного відсіку (рис. 8).



Рис. 8. Приклад монтажу евтектичних плит в рефрижераторному транспорті

Евтектична плита EFR складається з двох холодноштампованих листів сталі, спаяних між собою контактним електричним зварюванням, між якими прокладено змієвиковий випарник. Зовнішня поверхня плит покрита тонким шаром цинку, напилення якого виконується спеціальним роботом. Порожнина плити заповнена евтектичним розчином, точка замерзання та плавлення якого має певне постійне значення. Змієвиковий випарник охолоджує евтектичний розчин до повного замерзання (рис. 9).

Щоб забезпечити коректну роботу евтектичної плити необхідно, щоб замерзання розчину проходило від її периферії до центра. Розташований особливим чином змійовик і зовнішні фітинги контуру дозволяють задати фреону потрібний напрямок і вирішити це завдання.

Для монтажу евтектичних плит рекомендується використовувати спеціальне кріплення, яке включає профілі з нержавіючої сталі і набір болтів і гайок, а також спеціальні прокладки з протиковзної гуми.

¹⁴ Carrier Transicold. Офіційний сайт. URL: <http://www.carriertransicoldeurope.com>. (дата звернення 05.05.2023).

Серія EBS повністю виконана з нержавіючої сталі та має конструкцію, аналогічну моделі EFR. Основною відмінністю моделей серії EBS від плит серії EFR, крім матеріалу виконання, є їх подовжена форма, що дозволяє використовувати їх у сфері «торгівлі з коліс» (різні автолавки), а також у інших випадках, де допускається контакт з продуктами харчування, наприклад вітрини для охолодженої чи замороженої продукції тощо (рис. 10).



Рис. 9. Загальний вигляд евтектичної плити EFR

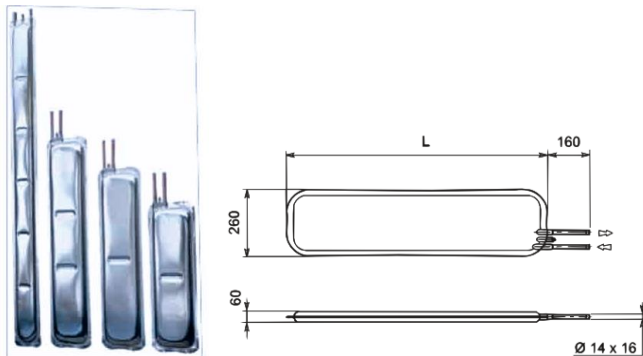


Рис. 10. Загальний вигляд евтектичної плити серії EBS

Серія ES також повністю виповнена з нержавіючої сталі та конструктивно відрізняється від серій EFR та EBS тим, що у неї відсутній змійовик (рис. 11).

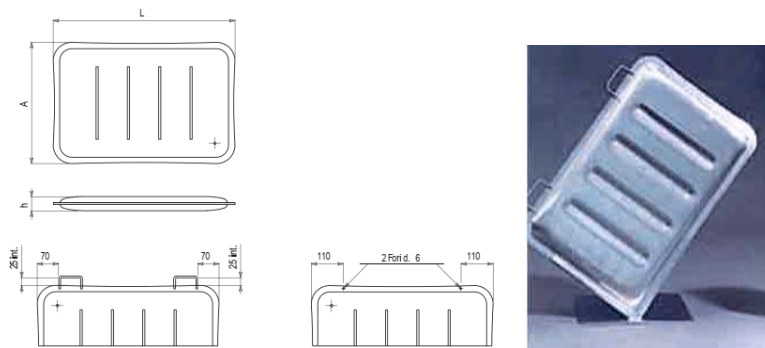


Рис. 11. Загальний вигляд евтектичної плити серії ES

Таким чином, на відміну від EFR та EBS, вона не може підключатися до холодильного агрегату та повинна заморожуватися у низькотемпературній холодильній камері. Будучи портативними акумуляторами холоду, плити серії ES можуть використовуватися для підтримки потрібного температурного режиму в будь-яких ізотермічних камерах для зберігання, перевезення, роздрібною торгівлі тощо, будь то кузов автомобіля, катер, візок для торгівлі морозивом або камера зберігання продукції.

Комбіновані технології акумуляції холоду (рефрижераторні засоби підвезення для забезпечення потреб військ Збройних Сил України)

У з'єднаннях (частинах) Сухопутних військ Збройних Сил України для підвезення і короткочасного зберігання м'яса та інших швидкопсувних продуктів у особливий період використовуються¹⁵: автомобіль-рефрижератор – ЛуМЗ-890Б; причепи-рефрижератори – ЛуМЗ-853Б і ПР-0,6. Причепи-рефрижератор ПР-0,6, крім того, виконує ще одну функцію – заряджання (заморожування) 28 зероторів з 0,5 %-м водним розчином хромпіку, які призначені для охолодження контейнерів ізотермічних КІ-50. Автомобіль-рефрижератор ЛуМЗ-890Б може використовуватися як самостійно, так і у складі автопоїзда АР-1 (у комплекті з причепом-рефрижератором

¹⁵ Сапіга Р. І., Задерієнко С. І., Яковлев М. Ю., Неуров І. В. Технічні засоби підвезення і зберігання продовольства та води : навчальний посібник. Львів : АСВ, 2009. С. 48.

ЛуМЗ-853Б), а холодильна установка може бути змонтована на зовнішній або внутрішній стороні передньої стінки кузова-фургона.

Кузов автомобіля-рефрижератора ЛуМЗ-890Б суцільнометалевий, в якості ізоляції використовується пінопласт. Кузов розділений на два відділення. У передньому відділенні розміщується холодильна машина, у вантажному відсіку є 12 гаків для підвішування напівтуш, а на підлозі укладені дерев'яні ґрати для укладання замороженого м'яса навалом.

Автомобіль-рефрижератор ЛуМЗ-890Б складається з трьох основних частин: бази монтажу автомобіля ЗИЛ-130, ізотермічного кузова, холодильної машини АР-4, що працює автономно від бензинового двигуна, або від електродвигуна підключеного до зовнішньої електромережі напругою 220/380 В. Кузов автомобіля-рефрижератора суцільнометалевий, зварний із вантажним теплоізольованим відсіком і машинним відділенням. Він встановлюється на шасі автомобіля і кріпиться до рами за допомогою драбин. Вантажний відсік герметично закривається позаду утепленими дверима за допомогою ексцентрикового замка, який при необхідності може бути опломбований. Вантажний відсік має гаки для підвішування м'ясних туш і підлогові ґрати. Машинне відділення розташоване в передній частині кузова і має двоє бічних дверей. Кузов має металевий каркас, утеплений пінопластом і фанерований зовні тонколистовою сталлю, а зсередини – оцинкованою сталлю. Наявність дерев'яних брусів у конструкції каркаса, до яких кріпиться внутрішнє облицювання, виключає безпосередній контакт її із зовнішнім металевим покриттям і утворення «теплових містків», що приводять до збільшення коефіцієнта теплопередачі кузова. Захист теплоізоляції підлоги від зволоження виконаний так, що шви пропаяні усередині облицювання харчовим оловом на висоту 250 мм. Холодильна машина АР-4 змонтована в машинному відділенні і призначена для автоматичної підтримки у вантажному відсіку температури від -15 до $+4$ °С при перевезенні заморожених і охолоджених вантажів. Холодильна машина складається з наступних елементів: компресора, конденсатора, ресивера, теплообмінника, фільтра-осушувача, терморегулювального вентиля (ТРВ), повітроохолоджувача, приладів автоматики (реле тиску і двох реле температури) і контрольно-вимірювальних приладів (двох манометрів).

Розглянемо конструктивні особливості холодильної системи. Компресор ФВ-6 – фреоновий вертикальний не прямооточний, двоциліндровий, холодовиробнича потужність 7500 Вт. Привод компресора під час роботи на стоянці – від бензинового двигуна або від

електродвигуна, за наявності мережі змінного струму; під час руху автомобіля – від бензинового двигуна. Конденсатор – ребристо-трубний з примусовою циркуляцією повітря від чотирилопатевого вентилятора. Ресивер – вертикального типу циліндричної форми.

Теплообмінник – змієвикового типу ізольований азбестовим шнуром. В якості поглинача вологи в фільтрі-осушувачі використовується силікагель. Терморегулювальний вентиль ТРВ-7М із зовнішнім зрівнюванням. Повітроохолоджувач виконаний у вигляді трисекційної, змієвикової батареї з пластинчастими ребрами з латуні і примусовою циркуляцією повітря від чотирилопатевого вентилятора. Повітроохолоджувач з щитом огорожі, вентилятором і ТРВ змонтований на передній стінці вантажного відсіку. Генератор служить для заряджання акумулятора, що живить ланцюг управління холодильної машини напругою 12 В при її роботі від бензинового двигуна. Прилади автоматики складаються з двоблокового реле тиску для заисту компресора шляхом його зупинки, та двох реле температури марки РДА-3. Два манометри показують тиск кипіння і конденсації фреону.

Щит управління роботою холодильної машини розташований у лівій частині машинного відділення. Холодильна машина має два електричних ланцюги управління з напругою живлення 220 В – при роботі від електродвигуна і 12 В – при роботі від бензинового двигуна.

Причип-рефрижератор ЛуМЗ-853Б має аналогічну будову з автомобілем-рефрижератором ЛуМЗ-890Б і відрізняється базою монтажу і вантажопідйомністю. Причип-рефрижератор ПР-0,6 призначений для транспортування і зберігання швидкопсувних продуктів у польових умовах, а також для заморожування евтектичного розчину в зероторах, необхідних для охолодження ізотермічних контейнерів КІ-50.

Причип-рефрижератор ПР-0,6 складається зі спеціального кузова-фургона, змонтованого на шасі двовісного низькорамного причепа 2-ПН-2М. Кузов-фургон має два відсіки: холодильну камеру і машинне відділення. Холодильна камера є суцільнозварною конструкцією з листової іржостійкої сталі. Порожнина між зовнішніми і внутрішніми стінками каркаса заповнена пінопластом. Усередині холодильної камери змонтовані дві стельові і чотири пристінні батареї акумуляції, що є ємкостями, звареними з іржостійких гофрованих сталевих листів. У батареях знаходяться змієвикові випарники холодильних машин. Їх місткість заповнена евтектичним розчином: натрій азотнокислий NaNO_3 – 35,8 %, селітра калієва KNO_3 – 6,3 %, натрію силікат NaSiO_3 – 0,5 %, натрій азотистокислий NaNO_2 – 0,5 %, вода H_2O – 57 %. Крім того, можуть бути використані й інші суміші

речовин. Наприклад, хлористого натрію, калію або кальцію з відповідними антикорозійними інгібіторами. У нижній частині холодильної камери, на правій і лівій стінках, змонтовані дві касети, в які через невеликі дверцята встановлюються по 14 штук зероторів, заповнених 0,5 %-й розчином хромпіку. Після заморожування розчину в зероторах їх використовують для забезпечення температурного режиму при зберіганні м'яса в ізотермічних контейнерах КІ-50. Зеротори є плоскими прямокутними банками місткістю три літри кожна. У торцевій стороні банки зроблений заливний отвір, що герметично закривається різьбовою металевою заглушкою. У центрі площини банки є крізний отвір для кріплення зеротора на кришці контейнера. У машинному відділенні ПР-0,6 змонтовані два герметичних низькотемпературних компресорно-конденсаторних агрегати холодовиробничою потужністю по 1625 Вт кожен. Для енергоживлення холодильних агрегатів, у разі відсутності зовнішнього джерела, служить бензиновий електричний агрегат АБ-8-Т/230М або АБ-8-Т/400. За наявності зовнішньої електромережі живлення здійснюється від неї. У машинному відділенні є щити управління й автоматичного захисту від перевантажень струмів короткого замикання та автоматичного перемикання напруги мережі живлення.

Контроль за процесом акумуляції холоду здійснюється за допомогою датчика реле (реле температури) ТР-5, який кріпиться до бічної стінки машинного відділення, а його термічний патрубок знаходиться в гільзі усередині бічної акумуляційної плити. Холодильні агрегати працюють автономно, кожен від свого реле температури. Охолодження об'єму повітря в холодильній камері здійснюється від шести плит акумуляції із замороженим евтектичним розчином до температури -24°C за рахунок кипіння фреону R-22 у змійовиках усередині плит. При цьому одночасно заморожується 0,5 %-й розчин хромпіку в 28 зероторах, установлених у касетах. При пониженні температури повітря в холодильній камері до -18°C вимикаються холодильні агрегати й охолодження здійснюється за рахунок акумуляції холоду – танення (тепло поступає через стінки холодильної камери від зовнішнього середовища) евтектичного розчину в плитах акумуляції. Підвищення температури повітря до $+4^{\circ}\text{C}$ у холодильній камері відбувається протягом трьох діб. Повторне заряджання (заморожування) плит триває близько 10 годин. При досягненні евтектичним льодом температури -24°C на щиті управління спалахує сигнальна лампа, що вказує на вихід у робочий режим, тобто камера підготовлена до завантаження, транспортування і зберігання швидкокопсуваних продуктів.

ВИСНОВКИ

За результатами проведеного дослідження можна зробити наступні висновки:

– для систем акумуляції холоду, які працюють за технологією вода-лід перспективним напрямом підвищення їхньої енергоефективності є пошук конструктивних рішень, направлених на усунення безпосереднього контакту льоду з рідиною, що охолоджує, за рахунок використання додаткових елементів заповнених речовинами здатними змінювати свій фазовий стан у широкому інтервалі температур;

– для систем акумуляції холоду з евтектичними розчинами перспективним напрямом енергоефективного застосування є пошук речовин, які можна використовувати для акумуляторів холоду, здатних працювати в широкому температурному режимі з багаторазовою термоциклічністю;

– для комбінованих технологій акумуляції холоду перспективним напрямом енергоефективного застосування є використання евтектичних холодильних систем та холодильних систем з наморожуванням льоду на теплообмінних поверхнях.

Для забезпечення холодопостачання в польових умовах найбільш актуальним є використання комбінованої технології акумуляції холоду, яка потребує подальших детальних досліджень з пошуку оптимальних конструктивних рішень, нових евтектичних розчинів та параметрів роботи холодильних систем.

Також потребує дослідження проблема незалежного енергозабезпечення холодильних систем за рахунок використання альтернативних джерел енергії, що забезпечить їх безперебійну роботу та гарантуватиме зберігання харчової продукції в польових умовах.

АНОТАЦІЯ

На час воєнного стану та у найближчій перспективі проблема функціонування холодильного та кліматичного обладнання в умовах відсутності надійного електропостачання є однією із важливих проблем національної безпеки України. Особливо гостро ця проблема стоїть в питаннях продовольчого та медичного забезпечення, як Збройних сил України, так і інших спеціалізованих підрозділів. Аналогічні проблеми зі зберіганням харчової продукції та медикаментів виникають у населення, що проживає в зоні бойових дій при відсутності електричної енергії.

Одним із шляхів вирішення вищезазначених проблем на сучасному рівні є застосування систем акумулювання енергії.

Застосування акумуляторів теплоти дозволяє згладити нерівномірне надходження теплової енергії, знизити енерговитрати за рахунок використання альтернативних джерел енергії та підвищити ефективність роботи енергетичного обладнання. Окремим випадком систем акумуляування теплоти є системи акумуляування холоду. Для акумуляції холоду найчастіше використовують ємнісний і латентний способи акумуляування теплової енергії. В умовах військових дій та за відсутності надійного електропостачання включення в холодильні системи акумуляторів холоду дозволить згладити температурні коливання охолоджуючого середовища.

Для забезпечення холодопостачання в польових умовах найбільш актуальним є використання комбінованої технології акумуляції холоду, яка потребує подальших детальних досліджень з пошуку оптимальних конструктивних рішень, нових евтектичних розчинів та параметрів роботи холодильних систем.

Також потребує дослідження проблема незалежного енергозабезпечення холодильних систем за рахунок використання альтернативних джерел енергії, що забезпечить їх безперебійну роботу та гарантуватиме зберігання харчової продукції в польових умовах.

Література

1. Beckman G., Gilli P. V. Thermal energy storage. Wien : Springer Verlag, 1984. 230 p.
2. Kreith F., Kreider J. F. Principles of Solar Engineering. Washington, London: Hemisphere Publishing Corporation, 1978. 778 p.
3. Левенберг В. Д., Ткач М. Р., Гольстром В. А. Акумуляування тепла : монографія. Київ : Техніка, 1991. 112 с.
4. Thermal Energy: Sources, Recovery, and Applications / Boca Raton, Shah YT, editor. FL. USA : CRC Press, 2018. 888p.
5. Холодильні установки : підручник / І. Г. Чумак та ін. ; за ред. І. Г. Чумака. 6-е вид., перероб. та доп. Одеса : Пальміра, 2006. 552 с.
6. Потапов В. О., Петренко О. В., Золотарьов В. В. Перспективні напрями розвитку холодильних систем з акумуляцією холоду. *Прогресивні техніка та технології харчових виробництв ресторанного господарства і торгівлі*. 2013. Вип. 2 (18). С. 69–78.
7. Energy.gov. Офіційний сайт. URL: <https://www.energy.gov/energy-storage-grand-challenge/energy-storage-grand-challenge>. (дата звернення 15.04.2023).
8. Бондарь Е. С., Калугін П. В. Енергозберігаючі системи кондиціонування повітря з акумуляцією холоду. URL: http://www.sun-ice.com.ua/news/_ (дата звернення 05.05.2023).

9. Вторинні холодоносії. URL: <http://www.nio-holod.com.ua>. (дата звернення 20.04.2023).

10. Петренко О. В., Потапов В. О., Семенюк Д. П., Якушенко Є. М. Холодильні машини та установки. Дипломне проектування : навчальний посібник. Харків : ХДУХТ, 2019. 176 с.

11. Кухаренко В. М. Рідкий лід та холодильні технології : навчально-методичний посібник. Харків : ХПІ, 2019. 132 с.

12. Cristopia. Офіційний сайт. URL: <http://www.cristopia.com> (дата звернення 20.04.2023).

13. Семенюк Д. П., Петренко О. В. Холодильне обладнання : підручник. Харків : Світ книг, 2021. 633 с.

14. Carrier Transicold. Офіційний сайт. URL: <http://www.carriertransicoldeurope.com>. (дата звернення 05.05.2023).

15. Сапіга Р. І., Задерієнко С. І., Яковлев М. Ю., Неуров І. В. Технічні засоби підвезення і зберігання продовольства та води : навчальний посібник. Львів : АСВ, 2009. 92 с.

Information about the authors:

Petrenko Olena Volodymyrivna,

Candidate of Technical Sciences,
Associate Professor at the Department of Integrated Electrical
Technologies and Power Engineering
State Biotechnological University
44, Alchevskykh str., Kharkiv, 61002, Ukraine

Semeniuk Dmytro Pavlovych,

Candidate of Technical Sciences,
Associate Professor at the Department of Integrated Electrical
Technologies and Power Engineering
State Biotechnological University
44, Alchevskykh str., Kharkiv, 61002, Ukraine

Smilyk Maxim Mykhailovych,

Assistant at the Department of Integrated Electrical
Technologies and Power Engineering
State Biotechnological University
44, Alchevskykh str., Kharkiv, 61002, Ukraine