

УДК 621.565.53:697.7

І.І.Пуховий, докт.техн.наук (Національний технічний університет України "КПІ", Київ)

Автономне холодопостачання влітку для умов континентального клімату з використанням сонячної енергії та природного льоду

Розглянуто варіанти поєднання абсорбційних сонячних холодильників та холодильників, що живляться від фотоелектричних перетворювачів, з льодом, заготовленим взимку на літо. Проведено розрахунки та експериментальні дослідження використання льоду для зменшення надходження теплоти в холодильник, розміщення його в холодильній камері та для охолодження конденсатора.

Рассмотрены варианты соединения абсорбционных солнечных холодильников и холодильников, которые питаются от фотоэлектрических преобразователей, со льдом, заготовленным зимой на лето. Проведены расчеты и экспериментальные исследования использования льда для снижения теплопритоков в холодильник, размещения его в холодильной камере и для охлаждения конденсатора.

Вступ. Для невеликих сільських поселень, при роботі в полі, для військових, геологів, туристів та мисливців, для зберігання і транспортування продуктів, вакцин тощо влітку потрібен холод. В умовах континентального клімату холод у "доелектричний вік" вироблявся заготівлею і акумулюванням природного льоду, що було навіть до середини ХХ століття великим бізнесом (у 1880 р. в США з теплішим, ніж в Україні, кліматом добували 10 млн т льоду [1]). Зараз для виробництва холоду переважно використовується електроенергія, що живить домашні холодильники чи великі холодильні установки. Електроенергію в автономних умовах можна виробити у вітроагрегатах та фотоелектричних перетворювачах (ФЕП). Вітряки влітку малоефективні через малу швидкість вітру, крім того, вони громіздкі, що ускладнює можливе переміщення. Виробництво холоду на основі сонячної енергії має переваги над теплопостачанням із використанням цієї енергії для опалення. Згадані переваги обумовлені тим, що потреба в холоді виникає у літні дні, коли достатньо сонячної енергії.

Холод влітку потрібен для кондиціонування повітря та зберігання продуктів. У відповідності з матеріалами фірми SANYO, на кондиціонування 10 м² площі приміщення потрібно від 0,3 до 0,5 кВт електричної потужності. Для зберігання в побутових умовах харчових продуктів у холодильній шафі компресійного холодильника потрібно від 70 до 250 Вт у залежності від температури в

приміщенні та об'єму шафи холодильника. Враховуючи те, що холодильник працює цілодобово, його слід вважати найбільшим споживачем електроенергії в сім'ї (до 60-70%). Дослідженнями автора встановлено, що холодильник "Дніпро" за місяць споживає 60-75 кВт·год (це легко було визначено влітку, коли сім'я відпочивала, а холодильник був єдиним споживачем енергії у квартирі). При інтенсивній експлуатації слід ще враховувати затрати на охолодження продуктів, що вносяться в холодильну камеру, та охолодження повітря, що проникає через двері при їх відкриванні.

Стан проблеми та постановка задачі дослідження. Холодопостачання влітку, як відзначено вище, можливе з використанням енергії Сонця та акумульованого льоду. Сонячна енергія дозволяє отримувати холод не тільки через термодинамічні компресійні цикли із затратами механічної (електричної) енергії, але і в абсорбційних установках.

Сонячні абсорбційні холодильні установки. В абсорбційних холодильних машинах (АХМ) для всмоктування парів холодильного агента (води, аміаку тощо) застосовується термохімічний компресор (абсорбер). Найбільш відомі АХМ із використанням рідинних абсорбентів (бромистий літій, хлористий літій), які поглинають водяну пару з виділенням теплоти абсорбції. Для таких АХМ потрібен теплоносіє із температурою 80-120°C, який використовується для випаровування води в генераторі (десорбері), поглинутої в абсорбері у

вигляді пари з випарника.

При використанні сонячної енергії досягнення таких температур можливе як у плоских колекторах із подвійним та потрійним заскленням, так і за допомогою колекторів на вакуумованих трубах. Температура в таких колекторах досягає 200°C. У країнах, де хмарність невисока, можуть бути використані також системи з концентраторами сонячної енергії для одержання пари.

Описані вище АХМ функціонують по замкнутому термодинамічному циклу. В установках, що використовують відкритий термодинамічний цикл, пара в генераторі (регенераторі) виходить безпосередньо в атмосферу. Такий генератор (десорбер) може бути виконаний навіть у вигляді нахиленої у сторону Сонця пластини, по якій тече слабкий розчин абсорбенту. Установка була розроблена в ІТТФ НАНУ для умов Ашхабада [14]. Цим же закладом була розроблена абсорбційна установка для Куби.

Недоліком відкритих систем є засмічування розчину LiBr та розбавлення його водою під час дощу. Ці проблеми вирішуються з використанням заскляних регенераторів. Слід відзначити, що конструктивно регенератори можуть бути виконані також у вигляді градирні.

В [2] описаний генератор льоду періодичної дії, що потребує періодичного обслуговування при експлуатації шляхом маніпуляції з вентилями. В такому генераторі льоду тиск у випарнику складає декілька мілібарів. За рахунок випаровування води лід одержують у галетах масою 2 кг. Регенерація абсорбента виконується парою тиском 7 бар ($t = 164^\circ\text{C}$) з концентруючої сонячної системи. При використанні концентраторів площею 16-22 м² одержують 100 кг льоду на добу (за 1 цикл). У випадку наявності котла на органічному паливі за добу можна виконати 3 цикли.

Останнім часом ведуться розробки АХМ із використанням твердих абсорбентів [3, 4]. У цьому випадку зменшується необхідна температура для регенерації. В Тетуамі (Марокко) проведені теоретичні дослідження і змонтована сонячна холодильна установка з використанням активованого вугілля як абсорбента і метанолу як холодильного агента. Установка працює періодично в ритмі появи Сонця. Вдень випаровується з абсор-

бента метанол. Його тиск підвищується, і після досягнення максимального тиску пара йде до конденсатора. Вночі абсорбер охолоджується і всмоктує пару метанолу. Це викликає кипіння у випарнику, яке приводить до одержання холоду.

Є загальна інформація [5] про дослідження швейцарських вчених під керівництвом Ph. Dind, що включали в себе порівняльний аналіз сонячних автономних холодильних систем на основі абсорбційних холодильних машин та холодильних систем із використанням електроенергії, одержаної у фотоелектричних перетворювачах. На жаль, на сайті <http://igt.evid.ch> результати цих досліджень, проведених в Institut de genie thermique, не наводяться. Повідомляється про використання систем "сілікагель-вода" та "цеоліти-вода". Відзначається, що в країнах із помірним кліматом потрібно мати резервний газовий паливник для АХМ. Проведено лабораторні дослідження в м. Yverdon-Les-Bains та практична перевірка в Африці (Буркіна-Фасо) [5]. В інтернеті можна побачити відео про цей холодильник на Videoportale AGE de MMORPG-fr-solaire (<http://www.adeofmmorpg.ru/index.php?key=solaire>).

В Росії у м. Ковров на ОАО КМЗ випускаються АХМ [6] для кондиціонування повітря. В якості теплової енергії для десорбції використовують воду температурою 40-60°C, одержану з використанням плоских сонячних колекторів. Очевидно мова йде про розімкнутий термодинамічний цикл.

В Одесі О.Дорошенко та його співробітники [7, 8] виконують дослідження розімкнутих систем охолодження з використанням системи "LiBr – ZnCl₂ + CaBr₂ + H₂O". Сполучення згаданих речовин не викликає корозії металу. Температури, отримані в АХМ, лежать у діапазоні вище 6-8°C. АХМ забезпечує зниження енергозатрат на 40-60%. Відкритий абсорбційний цикл досліджений також із метою кондиціонування повітря в Одеській державній академії холоду [9]. В якості джерела енергії розглянуто застосування сонячного випромінювання.

Використання фотоелектричних перетворювачів для живлення холодильників. Фотоелектричні перетворювачі функціонують лише вдень при наявності сонячного світла. Тому необхідне

акумуляції енергії чи холоду на ніч. Крім того, холодильники випускаються переважно на напругу 220 В змінного струму, що викликає необхідність використання інвертора. Слід відзначити, що вже продаються холодильники і на постійному струмі 12 В для умов використання в комплексі з ФЕП.

За сприяння міжнародних організацій у Данському технологічному інституті [10] розроблено холодильник для зберігання вакцин, у якому електричний акумулятор для зберігання енергії на ніч не використовується, а холодильник живиться безпосередньо від ФЕП при напрузі 10-40 В. Холод акумулюється вдень у вигляді льоду, і за температури довкілля 32°C в камері забезпечується температура 0-8°C при холодильному коефіцієнті 1,6. Камера для зберігання вакцини має об'єм 50 літрів, а маса льоду, розміщеного в холодильній камері, становить біля 18 кг. Розробники оптимізували роботу компресора, зменшивши пускові струми до 4,5 А при номінальних 2,5 А. Відзначено, що акумулююча здатність льоду на 1 кг ваги на 62% вища від акумулюючої здатності свинцевого акумулятора.

Відомо, що вартість системи живлення без акумуляторної батареї буде біля 4-6 \$ за Вт, з акумулятором без інвертора досягатиме 7-8 \$ за Вт, а з інвертором – 9-10 \$ за Вт. Таким чином, капіталовкладення в систему живлення холодильника можуть складати від 0,6 до 2000 \$ в залежності від типу ФЕП та іншого обладнання, розмірів холодильника і типу його виконання (тип А – найбільш економічний і дорогий, споживає у декілька разів менше електроенергії, ніж тип Е, F та G, які вже перестали продаватися у Європі).

Використання заготовленого взимку льоду для холодопостачання влітку. В умовах континентального клімату є можливість заготівлі та акумуляції льоду, який використовувався до середини ХХ століття і в Україні. Енергетичні затрати на виробництво і використання природного льоду оцінюються в [11]: $E = 0,0042$ кВт·год на 1 МДж холоду (1,4 кВт·год на 1 т льоду, або 0,015 МДж електроенергії на 1 МДж холоду). Зимом в 3 кг льоду є 1 МДж холоду, а при використанні льоду влітку, з урахуванням втрат в акумуляторах, на 1 МДж потрібно мати 3,3-4 кг льоду.

При виробництві льоду на місці його споживання витрати енергії на його виробництво зменшуються. На диспергацію води в повітрі потрібно біля 0,15-0,2 кВт·год. Для інших потреб (акумуляції, роботи насосів тощо) теж потрібна енергія, але загальна її витрата не перевищить 0,5 кВт·год на 1 т льоду, що в 2-3 рази менше, ніж при заготівлі льоду на водоймах.

Зберігання продуктів у льодових складах із використанням льодосоляної суміші (з хлористим натрієм та хлористим магнієм) для отримання температур мінус 10-20°C не є зручним для індивідуальних споживачів і вимагає затрат часу на переміщення продуктів.

У роботі ставиться за мету розглянути можливості та техніко-економічні показники поєднання систем холодопостачання з акумуляцією природного льоду та сонячних холодильних систем.

Комбіноване використання енергії Сонця та природного льоду.

Використання акумуляованого льоду для зменшення теплових протоків у холодильну камеру, що розташована у буферній зоні (БЗ). При встановленні холодильної камери з внутрішньою температурою t_D в теплоізований об'єм більшого розміру з'являється буферна повітряна зона, в якій може бути використаний теплоносій з іншим температурним рівнем, ніж у холодильній камері, що відповідає принципу "навпаки" до ідеї "Системи опалення І.І.Пухового" [12]. Температура в буферній зоні t_B без її охолодження знаходиться за залежністю [13]:

$$t_B = \frac{t_D + \varphi \omega \cdot t_A}{1 + \varphi \omega}.$$

Величини φ (відношення термічних опорів стіни холодильної камери до термічного опору зовнішньої огорожі) та ω (відношення поверхні огорожі буферної зони до поверхні стіни холодильної камери) завжди більші від 1, тому вони впливають на t_B рівнозначно як підвищення температури t_A у приміщенні, де розташована холодильна камера. В залежності від термічного опору зовнішньої огорожі та температури t_A , температура в БЗ знижується на 3-8°C.

У якості джерела холоду в цю буферну зону періодично можуть закладатися ємності з акумулятивним льодом, стінка холодильної камери чи

інші поверхні в БЗ постійно зрошуватимуться водою, яка має температуру 3-5°C після контакту з льодом із льодосховища. У випадку, коли тільки задня стінка із розміщеним на ній конденсатором контактує з повітрям довкілля, теплові притоки для домашнього холодильника, за нашими розрахунками, зменшуються в 2,3-2,8 разів, що викликає відповідне зменшення витрати електроенергії та необхідної потужності. Льодосховище повинне мати біля 2,5-7 тонн льоду на рік для компенсації теплових втрат у квітні-вересні в залежності від розмірів і термічного опору зовнішньої камери. Використання згаданої технології дозволяє гарантувати температуру в холодильній камері без будь-яких змін у конструкції холодильника. При закладанні льоду використовується ручна праця, а при подачі холодної води у зовнішню камеру (БЗ) процес може бути автоматизований.

Експериментальне дослідження енергетичного ефекту від внесення ємностей із льодом в холодильну камеру. Найпростішим рішенням є розміщення в холодильній камері ємностей із природним льодом. Були проведені дослідження з використанням 15 пластикових пляшок по 2 кг води в кожній (30 кг), які були заморожені протягом 1,5-2,5 діб у довкіллі.

Пляшки були розміщені в холодильнику "Ока-3" горизонтально під випарником і на кожній із полиць (по одній зліва і справа). Витрата електроенергії фіксувалась окремим електролічильником, через який холодильник був увімкнений в електромережу. Дослідження проводилися спільно зі студенткою Н.Василенко в 2003 році (березень); 10 днів холодильник, розташований на кухні, працював із розміщеним всередині льодом, а наступні 10 днів – без льоду. Виявилось, що за перші 10 днів (з льодом) витрата електроенергії склала 6 кВт·год, а за другі (без льоду) – 12 кВт·год, що відрізняється у 2 рази. Відзначимо, що лід закладався лише 1 раз, без зміни ємностей, які розтавали 10 днів. При роботі холодильника з льодом усередині середня температура в камері опустилася на 2-2,5 градуси і складала біля 1-2°C.

Ефект зменшення витрати електроенергії полягає не тільки в тому, що лід компенсує теплові притоки, але і в тому, що додаткова акумулююча холодна маса в холодильнику зменшує

кількість включень компресора і відповідно витрату електроенергії при великих пускових струмах і включенні додаткової пускової обмотки за допомогою реле.

Економія електроенергії (при внесенні льоду) на один холодильник такого типу, що живиться від електромережі, за місяць склала біля 25 кВт·год, а за рік – біля 300 кВт·год, на суму близько 90 гривень (за цінами 2010 р.). Лише у масштабах м. Києва при використанні льоду тільки взимку можна за 4 місяці з негативними температурами економити близько 100 кВт·год (протягом 3000 годин), що дає середню економію електричної потужності біля 35-50 Вт на холодильник і для 1 млн холодильників (у м. Києві їх 2,5-4 млн) складе 35 МВт. П'ятикратне зменшення витрати енергії на роботу холодильників (зменшення надходження теплоти та внесення льоду в холодильну камеру) збільшить отримані вище цифри в 2,5 рази (зменшення потужності біля 100 МВт на 1 млн холодильників). Пікова зимова електроенергія є найдорожчою, але в той час, коли стоять морози і є холод, у квартирах і будинках холодильники теж виробляють холод.

Звичайно, такий метод дещо зменшує об'єм камери, але раціональне розташування продуктів може компенсувати цей недолік, коли мова йде про економію капітальних затрат чи електроенергії, особливо в автономних умовах. Метод внесення льоду в холодильну камеру потребує для домашнього холодильника не більше 1-1,5 т льоду на рік при заміні його приблизно кожні 10 днів.

Збільшення холодильного коефіцієнта. Автор розробив декілька технічних рішень, викладених у заявці на винахід №4067056/13(072682) від 11 травня 1986 р. Заявка подана в патентне відомство СРСР, але у зв'язку з розпадом СРСР отримання патенту не завершено. Ці рішення дозволяють використовувати для охолодження конденсатора в домашньому холодильнику природний холод, акумульований і взятий безпосередньо з атмосфери. У відповідності з термодинамічними залежностями для зворотних циклів це дозволяє в 1,2-1,6 разів підвищити холодильний коефіцієнт ε і в стільки ж разів зменшити витрату електроенергії.

Висновки. Підсумовуючи отримані результати, відзначимо, що із застосуванням усіх розгляну-

тих технологій можна зменшити витрату електроенергії холодильником максимально у 7-8 разів і мінімально в 4-6 разів. Відповідно, капіталовкладення у ФЕП теж можна зменшити і довести до 200-500 \$ на один домашній холодильник. Капіталовкладення в акумулятор льоду з теплоізоляцією (наприклад, із тирси) та інші пристрої, за нашими оцінками, не перевищують 200 \$. В результаті можливе як мінімум подвійне зменшення капітальних затрат у тих місцях, де можна взимку виробляти лід і забезпечувати його акумуляування на літо. Всі методи зменшення споживання енергії також можуть бути використані в абсорбційних холодильниках і в домашніх холодильниках на традиційній електроенергії.

1. *Ледяной бизнес*. Business Week. – 18.02.03. – www.wordecconomy.ru
2. *Boubour J.* Association solail-vapeur//<http://pagesperso-orange.fr/jean.boubour>
3. *Lemmini F., Errougani A., Behtayeb F.* // FIER. – 2002. – P. 260–267; <http://www.fst.ac.ma/fier/43> PDF
4. *Pons M., Chalfen J.B.*. Theme 2: Procèdes a adsorption // <http://www.limsi.fr/RS2000FF/Meca2000FF/chap>

5. *Buchter F.B., Dind Ph., Pons V.* An experimental solar covered adsorptive refrigerator tested in Burkina-Faso// Int. Jour. of Refrigeration. – 2003. – № 26. – P. 79–86.
6. *Продукция Ковровского МЗ* // <http://kmz.kovrov.ru>
7. *Дорошенко А.В., Яромлович Ю.Р.* Косвенно-испарительные охладители // Холодильная техника. – 1997. – №12. – С. 31–34.
8. *Дорошенко А.В.*, Гелиосистемы и тепловые насосы в системах автономного тепло- и хладоснабжения// 2007.-АВОК, № 7 // www.abok.ru/for_spec/articles.php
9. *Поберезкін О.А.* Розробка систем кондиціонування повітря на основі абсорбційного циклу відкритого типу і сонячної енергії. Автореф. канд. дис. Одеська держ. акад. холоду. Одеса. – 2002. – 18 с.
10. *Henrik Pedersen, Soren Poulsen, Ivan Katic.* Solar-Chill a solar PV refrigerator without battery // Danish Technological Institut.- http://www.solarchill.org/images/Eurosun2004_paper_254.pdf
11. *Быков А.В.* Различные области применения холода. – М: Агропромиздат, 1985. – 269 с.
12. *Пуховой И.И.* Пат №1388665 (СССР) МКИ F 24Д 15/00. Система отопления здания И.И. Пухового. – 1988. – бюл. 34.
13. *Пуховой И.И.* Система отопления зданий без теплового насоса с использованием природной холодной воды // Промышленная теплотехника. – 1992. – Том 14. – № 1–3. – С. 57–61.
14. Системы солнечного тепло- и холодоснабжения. Под. ред. *Сарнацкого Э.В.* и *Чистовича С.А.* – М.: Стройиздат. – 1990. – 320 с.