

УДК 621.5.048

**Р.В. Грищенко<sup>✉</sup>, А.В. Форсюк, Я.І. Засядько, О.Ю. Пилипенко**

Національний університет харчових технологій, вул. Володимирська, 68, м. Київ, 01601, Україна

✉ e-mail: rgryshchenko@gmail.com

**ПРО ДОЦІЛЬНІСТЬ ВИКОРИСТАННЯ АКУМУЛЯТОРІВ ХОЛОДУ НА ПІДПРИЄМСТВАХ**

*В роботі наведено аналіз доцільності використання акумуляторів теплової енергії (холоду) на підприємствах харчової промисловості. Проаналізовано графіки енергоспоживання декількох заводів, а також графіки сплати електроенергії за одно- та трьохзональною сіткою тарифів на прикладі молокозаводу «Даропе» у м. Херсон. Отримані результати дають зрозуміти, що ефективність застосування льодоакумуляторів визначається не лише часовим проміжком для накопичення льоду, але і можливою швидкістю танення льоду, що в кінцевому підсумку, визначає кількість льоду в період «заряджання» акумулятора. Пропоновані міркування будуть використанні у розробці методик розрахунку льодоакумуляторів.*

**Ключові слова:** теплообмін – тепловий потік – льодоакумулятори – акумулятори холоду – водний лід – танення водного льоду.

**Р.В. Грищенко, А.В. Форсюк, Я.І. Засядько, О.Ю. Пилипенко**

Національний університет пищевых технологий, ул. Владимирская, 68, г. Киев, 01601, Украина

**ПРО ЦЕЛЕСООБРАЗНОСТЬ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ АККУМУЛЯТОРОВ ХОЛОДА НА ПРЕДПРИЯТИЯХ**

*В работе приведен анализ целесообразности использования аккумуляторов тепловой энергии (холода) на предприятиях пищевой промышленности. Проанализированы графики энергопотребления нескольких заводов, а также графики оплаты электроэнергии за одно- и трехзональной сеткой тарифов на примере молокозавода «Даропе» в г. Херсон. Полученные результаты дают понять, что эффективность применения льдоаккумуляторов определяется не только временным промежутком для накопления льда, но и возможной скоростью его таяния, что, в конечном итоге, определяет количество льда в период «заряда» аккумулятора. Предлагаемые рассуждения будут использованы в разработке методик расчетов льдоаккумуляторов.*

**Ключевые слова:** теплообмен - тепловой поток - льдоаккумуляторы - аккумуляторы холода - водный лед - таяние водного льда.

DOI: <http://dx.doi.org/10.15673/0453-8307.6/2015.56731>

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>**I. ВСТУП**

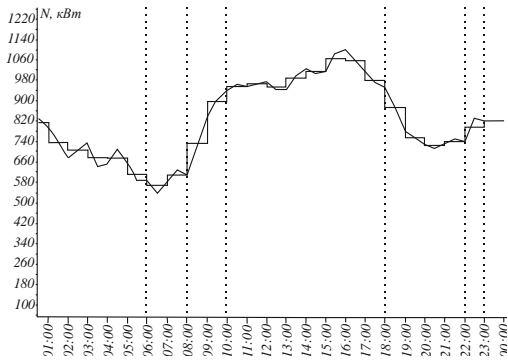
На підприємствах харчової та переробної промисловості, де використовують штучне охолодження, найбільшим споживачем електричної енергії є електрообладнання холодильних установок. Велика частка енергоспоживання характерна також для сучасних систем кондиціонування повітря. Особливістю роботи таких установок є значне добове та сезонне холодильне навантаження, що призводить до суттєвих коливань та нерівномірності споживання електричної енергії.

Перерозподіл споживання електричної енергії від часових проміжків, коли її вартість найбільша, на години з низькою вартістю, видається перспективним. Такий захід може бути реалізований на основі застосування в холодильних установках акумуляторів холоду, зберігши при цьому технологічно задані параметри холодоносіїв впродовж усього періоду холодоспоживання.

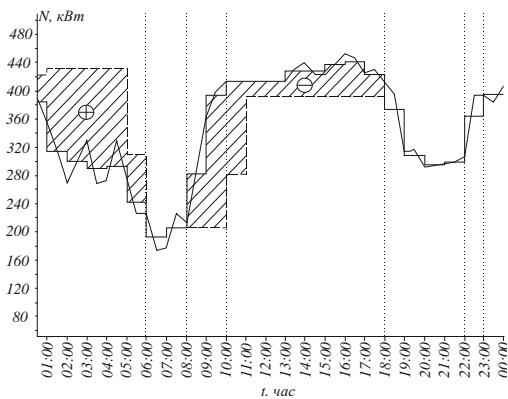
На прикладі ВАТ «Шосткінський міськмолокомбінат» проведено моніторинг добового споживання «крижаної» води на технологічні потреби та електроенергії підприємством [1].

Найбільшим споживачем останньої є центральна холодильна установка, на яку припадає теплове навантаження одержання «крижаної» води. Розглянуто існуючі графіки енергоспоживання заводу, а також запропоновано декілька варіантів оптимізації цих графіків.

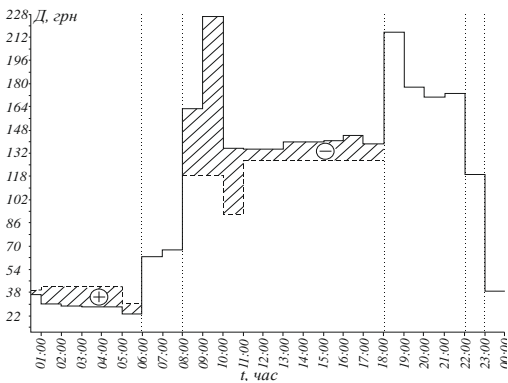
Аналіз запропонованих авторами варіантів оптимізації показує, що всі вони дозволяють отримати певну економію споживання електроенергії. Однак найбільша ефективність досягається у випадку переміщення електричної потужності з так званих «пікових» годин на нічний час, що демонструє рисунок 2. Витрата електроенергії для акумулювання холоду у нічний період, дозволяє ліквідувати значні витрати електроенергії у «піковий» (з 8-00 до 10-00 годин) та «напівпіковий» періоди (з 10 до 18 годин). В цьому випадку відношення суми заощаджених коштів до загальної кількості електричної потужності яку знімаємо вдень є найбільшим 0,336 грн/ кВт\*год (станом на 2012 рік) [1].



**Рисунок 1** - Графіки енергоспоживання та вартості оплати за електроенергію на ВАТ «Шосткінський міськмолкомбінат» [1].

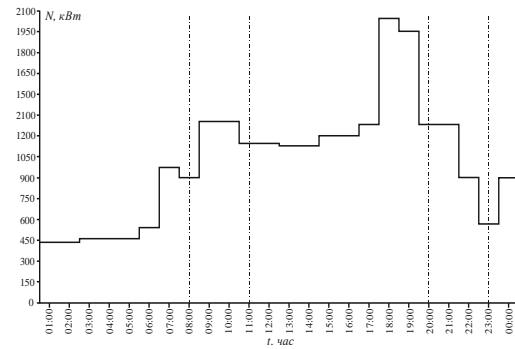


**Рисунок 2** - Найбільш ефективний варіант оптимізації споживання електричної енергії. [1]

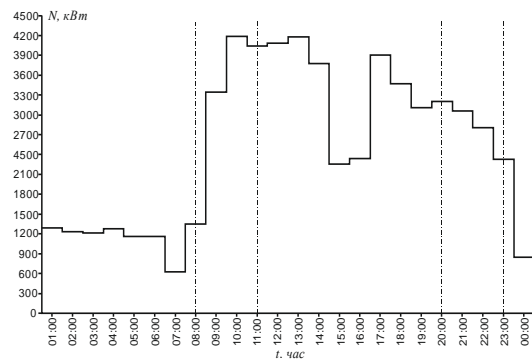


Накопичений в нічний час водний лід, на отримання якого витрачена додаткова електроенергія, вироблена саме у нічний період, використовується в часи максимального навантаження, для забезпечення потреб виробничого процесу. На рисунку нижче продемонстрований варіант оптимізації споживання електричної енергії, який дозволяє економити до 5,1 % коштів, що йдуть на оплату електроенергії [2].

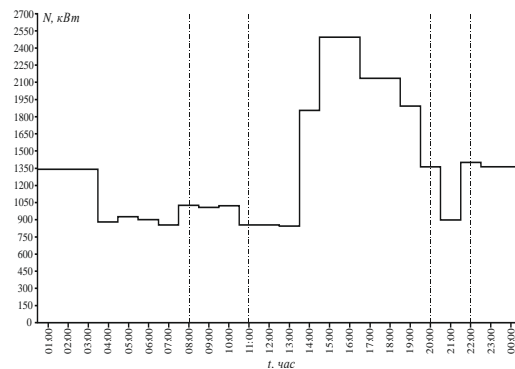
Нижче наведено окремі графіки холодильного навантаження різних заводів з приблизно однаковою потужністю по переробці молока на добу.



**Рисунок 3** - Графік холодильного навантаження молокозаводу Danone м. Херсон



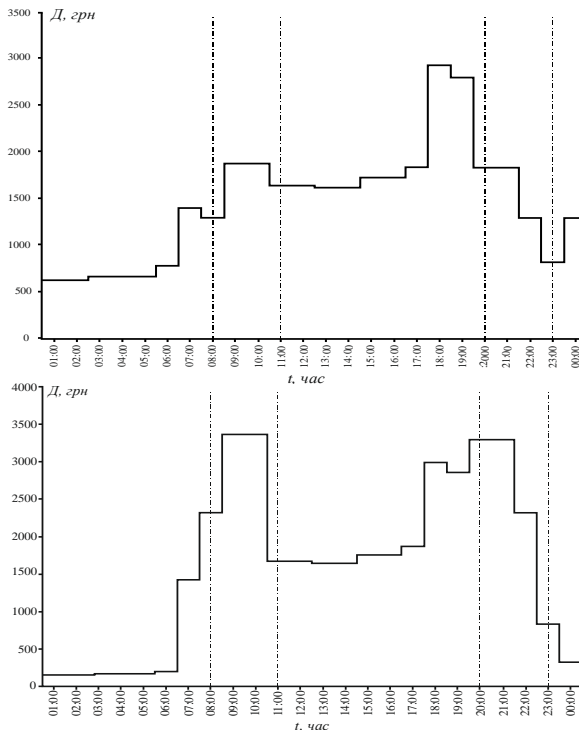
**Рисунок 4** - Графік холодильного навантаження Куп'янського молококонсервного комбінату м. Куп'янськ



**Рисунок 5** - Графік холодильного навантаження Пирятинського сирзаводу м. Пирятин

З аналізу даних графіків можна стверджувати, що характер холодильного навантаження Пирятинського сирзаводу та молокозаводу Danone є досить подібними, оскільки, зростання споживання холоду припадає на другу половину дня з яскраво вираженими піковим навантаженням впродовж 3-5 годин. На Куп'янському молочноконсервному комбінаті, спостерігається яскраво виражений «пік» навантаження з 9<sup>00</sup> до 14<sup>00</sup>, а також з 17<sup>00</sup> до 21<sup>00</sup> годин. Падіння споживання холоду на всіх трьох представлених вище заводах спостерігається з 23<sup>00</sup> години вечора до 7<sup>00</sup> години ранку, що дає можливість в цей час акумулювати теплову енергію та використовувати її в пікові години.

Акумулювання теплової енергії у нічний період дозволить суттєво знизити витрату фінансових ресурсів підприємства на сплату електроенергії.



**Рисунок 6** - Графік сплати електроенергії молокозаводу Danone за одно- та трьохзональною сіткою тарифів відповідно

На прикладі даних холодильного навантаження молокозаводу Danone, представлено графіки сплати за електроенергію (Д, грн.), за одно- та трьохзональною сіткою тарифів. В даному випадку з 24<sup>00</sup> години вечора до 6<sup>00</sup> години ранку ми маємо мінімальну витрату грошей на електроенергію. У свою чергу це дозволяє активно акумулювати теплову енергію в акумуляторах холоду і таким чином «зрізати» холодильне навантаження в пікові години роботи підприємства, коли тарифний коефіцієнт оплати електроенергії є найбільшим. Аналогічна ситуація спостерігається на Пирятинському сирзаводі і Куп'янському молочноконсервному комбінаті.

Підсумовуючи вище сказане, варто зазначити, що в нічний період ми маємо 5-6 годин для акумуляції теплової енергії, але її використання обмежене двома годинами піку, оскільки подальше використання накопиченого «холоду» є малоефективним поза зоною «піку». Тому питання динаміки танення льоду є суттєво важливим. Так, при заморожуванні певної кількості льоду, є можливість змінювати  $\Delta t$  (різниця між температурою кипіння холодоагенту та температурою води) у широких межах, що впливає на швидкість та динаміку замороження. При таненні льоду така можливість відсутня, оскільки температура після технічного обладнання не має перевищувати  $+5 \pm 10^{\circ}\text{C}$ , що визначає актуальність дослідження динаміки танення льоду.

## II. ПОСТАНОВКА ЗАДАЧІ

Акумулювання штучного холоду може здійснюватись двома шляхами: накопиченням великої кількості охолодженого теплоносія в ємностях, або на основі використання фазового переходу, шляхом накопиченням льоду на поверхні теплообміну чи у ємностях з холодоносієм. Найбільш компактними та простими у використанні, якщо холодоносієм слугує «крижана» вода, є акумулятори холоду з накопиченням льоду на теплообмінній поверхні з подальшим його таненням у визначені години.

Найвні на даний час методики розрахунку та підбору акумуляторів холоду з накопиченням льоду на теплообмінній поверхні не дають можливості адекватно визначити показники енергоефективності процесу замороження льоду та його плавлення. Це обумовлено тим, що більшість залежностей заснована лише на балансових співвідношеннях між масою накопиченого льоду та кількістю тепла, яку необхідно відвести від «крижаної» води. При цьому не враховується зв'язок температурних параметрів процесу з динамікою льодоутворення і танення льоду, що призводить до неможливості визначити реальну мінімальну досяжну температуру «крижаної» води, оскільки невідома інтенсивність вивільнення «холоду» в результаті танення льоду. Як наслідок, складно і у більшості випадків неможливо, визначити час і швидкість танення льоду певної товщини для заданих режимних параметрів, що, в свою чергу, ускладнює розрахунок максимальної кількості холоду для «пікового» споживання.

Підсумовуючи вище сказане, видається доцільним розробити науково обґрунтовану методику розрахунку та проектування оптимальних акумуляторів холоду, які враховували б не лише умови утворення льоду на теплообмінній поверхні, як це розглядається в роботах [3, 4], але й умови його танення, оскільки саме період танення, який є відносно коротким, і визначатиме максимальну кількість льоду, яку доцільно генерувати.

Спроектовані за такою методикою акумулятори холоду, дозволять одержати максимальний економічний ефект від їхнього використання без порушення технологічних вимог виробництва.

Проведений ринковий моніторинг показує, що значним попитом користуються акумулятори холоду з фазовим переходом тверде тіло – рідина (лід – «крижана вода») без звільнення теплообмінної поверхні від льоду. Це обумовлено компактністю апаратів, простотою їх конструкції та більш низькою вартістю. Більшість з них мають циліндричну теплообмінну поверхню. Ця обставина спонукає до вивчення процесу танення льоду на циліндричних теплообмінних поверхнях та умов роботи, що характерні для вказаного типу акумуляторів холоду.

### III. МАТЕМАТИЧНЕ МОДЕЛЮВАННЯ

При аналізі наявної літератури розглянуто ряд співвідношень, за допомогою яких можна визначити час льодоутворення за різних режимних параметрів. В роботі [3] Пилипенка О.Ю. та Засядька Я.І. запропоновано диференціальне рівняння визначення швидкості утворення льоду на вертикальній зовнішній поверхні труби:

$$\frac{dr}{dt} = \frac{\left[ \frac{\theta_0 - t_0}{\frac{1}{2 \cdot \lambda_l} \cdot \ln \frac{d_{306} + 2 \cdot r}{d_{306}} + \frac{1}{2 \cdot \lambda_m} \cdot \ln \frac{d_{306}}{d_{вн}} + \frac{1}{\alpha_0 \cdot d_{вн}}} \right]}{\left[ -\alpha_w \cdot (d_{306} + 2 \cdot r) \cdot \left[ (t_w - \theta_0) + \frac{\omega^2 \cdot (2 + \frac{1}{Pr_w})}{3 \cdot Cp_w} \right] \right]} \cdot \rho \cdot (d_{306} + 2 \cdot r) \quad (1)$$

де  $Cp_w$  – ізобарна теплоємність води, Дж/(кг·К);  $\lambda_l$  – коефіцієнт теплопровідності льоду, Вт/(м·К);  $Pr_w$  – число подібності Прандтля;  $d_{вн}$  – внутрішній діаметр труби, м;  $t_w$  – температура води, °С;  $t_0$  – температура холодоносія, °С;  $r$  – товщина шару льоду, м;  $dr$  – зміна (приріст) товщини льоду, м;  $\lambda_m$  – коефіцієнт теплопровідності стінки труби, Вт/(м·К);  $d_{306}$  – зовнішній діаметр труби, м;  $\alpha_w$  – коефіцієнт тепловіддачі від води до міжфазної поверхні, Вт/(м<sup>2</sup>·К);  $\theta_0$  – температура поверхні льоду на межі розподілу фаз лід–вода, °С;  $\rho$  – прихована теплота кристалізації льоду приведена до одиниці об'єму, кДж/м<sup>3</sup>;  $\omega$  – швидкість руху води поблизу міжфазної поверхні, м/с.

В рівняння (1) входять постійні величини, значення яких обумовлено конструктивними особливостями апаратів ( $d_{306}$ ,  $d_{вн}$ ,  $\lambda_m$ ,  $\lambda_l$ ) та теплофізичними характеристиками води та льоду ( $\theta_0$ ,  $\rho$ ). Деякими параметрами можливо задаватися на початку розрахунку ( $t_w$ ,  $t_0$ ,  $Q$  – витрата води що рухається вздовж поверхні теплообміну). Ці параметри є постійними впродовж всього процесу льодоутворення і є граничними умовами процесу. Розглядалась циліндрична поверхня теплообміну, яка зовні омивається водою, а зсередини – охолоджується холодильним агентом, що випаровується. Утворення льоду на теплообмінній поверхні відбувається вздовж радіуса циліндру. Вважалось, що в кожен момент часу буде існувати квазістаціонарний режим теплообміну. Оскільки формула (1) включає теплофізичні параметри води та льоду,

враховує процес теплообміну та має диференціальний вигляд видається можливим використати її для дослідження динаміки танення льоду. Проте адекватність отриманих результатів потребує перевірки дослідними даними.

Ахмедом Фертеллі [4] запропоновано диференціальне рівняння визначення часу льодоутворення на горизонтальній пластиковій трубі:

$$dt^* = \left[ 1 + \frac{1}{R_0^*} + \frac{1}{R_{po}^*} \left( 1 + \frac{2}{R_0^*} \right) \ln r^* + \frac{(\ln r^*)^2}{R_0^* R_{po}^*} \right] r^* dr^* \quad (2)$$

де  $t^*$  – безрозмірний час;  $R_0^*$  – безрозмірний зовнішній радіус труби;  $R_{po}^*$  – безрозмірний термічний опір з внутрішньої сторони труби та стінки труби;  $r^*$  – безрозмірна координата у радіальному напрямку (безрозмірний радіус труби з шаром льоду).

Під час дослідів [4] розглядалося формування льоду на горизонтальній поліетиленовій трубі, охолоджуваній пропіленгліколом, що була занурена у нерухому воду з температурою близько 0 °С. Але описати динаміку танення льоду при вимушеному русі холодоносія неможливо, оскільки в рівнянні відсутня складова, що описує конвективний теплообмін. Враховуючи, що охолодження труби було однофазним, рівняння (2) є частковим випадком диференціального рівняння (1), коли коефіцієнт тепловіддачі  $\alpha_0 = \text{const}$ .

Час танення заданої товщини льоду  $\zeta$  на плоскій стінці при інтенсивній циркуляції води, пропонується визначати за приведеним нижче рівнянням:

$$\tau = \frac{r_0 \cdot \zeta}{\alpha_1 \cdot (t_1 - \theta_0)} \quad (3)$$

де  $t_1$  – температура води, що омиває поверхню льоду, °С;  $\alpha_1$  – коефіцієнт тепловіддачі з боку води при вимушеному русі;  $\zeta$  – товщина шару льоду;  $r_0$  – прихована теплота льодоутворення приведена до одиниці об'єму, кДж/м<sup>3</sup>.

Дану формулу зручно використовувати у інженерних розрахунках, однак застосування в межах циліндричної поверхні є недостатньо обґрунтованим.

Розглянуті вище математичні моделі в основному направлені на дослідження динаміки льодоутворення, окрім останньої, що розглядає динаміку танення льоду лише на плоскій поверхні. Отже для подальшого вивчення динаміки танення льоду на вертикальній циліндричній поверхні з повздовжнім обтіканням холодоносієм(вода), необхідно провести математичне моделювання процесів, а також перевірити на адекватність наявні формули, розглянуті вище, та порівняти отримані теоретичні результати з дослідними даними.

### III. ВИСНОВКИ

Враховуючи все вище сказане, варто зауважити, що протягом нічних періодів холодильні

системи підприємств працюють з недовантаженням, оскільки суттєво знижується теплонавантаження від навколишнього середовища та знижується тиск і температура конденсації. Крім того, при роботі підприємства за багатозональним тарифом вартість електричної енергії в цей період є найнижчою. Натомість протягом найжаркіших періодів доби (12<sup>00</sup>...15<sup>00</sup> годин), навантаження холодильної системи досягає максимуму і у той же період є максимальною вартість електричної енергії. Також постає питання про зміну технологічної схеми на деяких підприємствах, для ефективного використання акумуляції теплової енергії у нічні періоди. Вказані обставини є передумовою до розробки холодоакумуляуючих систем, які б дозволяли накопичувати холод у вигляді теплоти фазового переходу лід-вода і потім реалізувати цю енергію під час пікового енергоспоживання.

В існуючих методиках вибору акумуляторів холоду з накопиченням льоду не враховується динаміка його танення. Крім того, існує ряд складнощів, через які неможливо визначити час і швидкість танення льоду певної товщини. Вказана проблема є досить складною, оскільки, по-перше, дана задача є нестационарною, тобто умови теплообміну змінюються внаслідок зростання товщини шару льоду і зменшення інтенсивності тепловіддачі. Наявні аналітичні рішення не дозволяють описати дану задачу, оскільки неможливо врахувати зміну інтенсивності тепловіддачі до потоку фреону який випаровується через постійне зниження теплового потоку, як наслідок зростання товщини шару льоду. Разом із тим, дана обставина є критичною, оскільки вона визначає оптимальну тривалість

періоду льодогенерації. Другим критичним параметром є інтенсивність танення льоду.

Таким чином планується провести цикл досліджень із швидкості танення водного льоду, тобто визначення критичного параметру вивільнення енергії у вигляді холоду, яка може бути використаною у системах акумуляції теплової енергії, на підприємствах харчової промисловості та систем кондиціонування повітря для суттєвої економії обігових коштів.

## ЛІТЕРАТУРА

1. **Пилипенко, О. Ю.** Обґрунтування доцільності використання акумуляторів холоду з фазовим переходом [Текст] / О. Ю. Пилипенко, Я. І. Засядько // Холодильна техніка і технологія. – 2008. – № 5 (115). – С. 11-15.
2. **Пилипенко, А. Ю.** Экспериментальное и теоретическое изучение образования льда на вертикальной трубе [Текст] / А. Ю. Пилипенко, Я. И. Засядько // Холодильная техника. – 2014. – № 6 (62). – С. 42-47.
3. **Пилипенко, О. Ю.** Динаміка кристалізації льоду на вертикальних охолоджуваних трубах в елементах акумуляторів теплової енергії систем охолодження та кондиціонування повітря [Текст] : дисертація ... кандидата технічних наук / О. Ю. Пилипенко – Київ, 2012. – 267с.
4. **Fertelli, A.** Air-conditioning System with Ice Thermal Storage [Текст] : dissert. ... Doctor of Philosophy Mechanical Engineering / Ahmet Fertelli. – Adana, 2008. – 191 p.

Отримана в редакції 07.09.2015, прийнята до друку 03.11.2015

**R. Gryshchenko, A. Forsiuk, Ya. Zasiadko, O. Pylypenko**

National University of Food Technologies, 68 Volodymyrska str., Kyiv, 01601, Ukraine

## THE ADVISABILITY OF COLD ACCUMULATORS UTILIZATION IN INDUSTRY

*The advisability of thermal energy accumulators' utilization in food industry is presented and substantiated in the article. The time graphs of energy consumption for some plants along with the plots of electrical energy payments within a single- triple-zones tariffs as characteristic for the "Danone" dairy plant in the city of Kherson have been analyzed. The results obtained have proved that the effectiveness of cold accumulators application is greatly determined not only by the available time of ice accumulation, but also by the achievable speed of the ice melting, which, eventually, determines the amount of ice which is necessary to generate during the accumulator "charge" period. The proposed considerations will be used at the developing of an ice accumulator design calculations methodology.*

**Key words:** heat transfer; heat flux; ice accumulator; cold accumulator; water ice; melting ice water.

## REFERENCES

1. **Pylypenko, O. Iu., Zasiadko, Ia. I.** 2008. Обґрунтування доцільності використання акумуляторів холоду з фазовим переходом. *Refrigeration engineering and technology*, No. 5 (115), 11-15.
2. **Pylypenko, A. Iu., Zasiadko, Ia. Y.** 2014. Экспериментальное и теоретическое изучение образования льда на вертикальной. *Холодильная техника*, No. 6 (62), 42-47.

3. **Pylypenko, O. Iu.** 2012. Динаміка кристалізації льоду на вертикальних охолоджуваних трубах в елементах акумуляторів теплової енергії систем охолодження та кондиціонування повітря : дисертація ... кандидата технічних наук. Київ, 267 p.
4. **Fertelli, A.** 2008. Air-conditioning System with Ice Thermal Storage : dissert. ... Doctor of Philosophy Mechanical Engineering, Adana, 191 p.

Received 07 September 2015  
Approved 03 November 2015  
Available in Internet 25.12.2015