

## ВАРІАНТИ ОПТИМІЗАЦІЇ ЕНЕРГОСПОЖИВАННЯ НА ВИРОБНИЦТВО ШТУЧНОГО ХОЛОДУ

*В роботі запропоновано оптимізувати роботу холодильного господарства молокопереробної галузі за допомогою акумуляторів холоду. Представлено можливі варіанти оптимізації графіку електроспоживання та зроблено аналіз даних перетворень в результаті чого знайдено оптимальний варіант.*

**Ключові слова:** Енергоспоживання, Зони доби, Акумулятор холоду, Потужність, Ефективність використання, лід

### ОБГРУНТУВАННЯ АКТУАЛЬНОСТІ ТЕМИ.

На підприємствах переробної галузі широко застосовується льодяна вода для охолодження технологічних процесів. Для її охолодження використовуються панельні та плівкові теплообмінні апарати. На базі яких конструюються акумулятори холоду з фазовим переходом.

Як правило акумулятори холоду використовуються для охолодження технологічної льодяної води.

Для підприємств молочної, пивної та деяких інших галузей, які споживають льодяну воду в якості проміжного холодоносія, навантаження на систему не рівномірне. Як показує моніторинг молочних підприємств, наприклад ВАТ "Шосткінський міськмолкомбінат", максимальне споживання льодяної води починається, приблизно, з 8<sup>00</sup> та закінчується о 18<sup>00</sup>÷19<sup>00</sup>. Оскільки підприємство переробляє до 500 тон молока на добу, то на графіку електроспоживання немає чітко виражених стрибків споживання електричної потужності. Однак, два піки енергоспоживання холоду мають місце.

Окрім традиційного використання акумуляторів холоду їх можна використовувати для зниження температури конденсації на холодильних установках, що призведе до зниження енерговитрат в денні години та збільшить холодопродуктивність установки при незмінній площі теплообміну випарника.

Теплове навантаження від підприємства сприймає центральна холодильна установка. Основними є навантаження від охолодження льодяної води у панельних випарниках.

В установці використовуються два компресори НФ-811 (номінальна потужністю електродвигуна 110 кВт), п'ять – П-220 (132 кВт), три – НФ-812 (55 кВт).

Загальна електрична потужність насосів проміжних холодоносіїв та вентиляторів конденсаторів у порівнянні з компресорами незначна і не врахована у подальшому аналізі.

У центральному розподільчому пункті на кожній з гілок живлення підприємства встановлено лічильники. Так гілки, що живлять компресорний цех, мають номери 6 та 9.

На всіх графіках енергоспоживання представлено криві електроспоживання компресорного цеху по кожній гілці. На реальні криві накладено осереднене године електроспоживання та вказано суму грошей, сплачену за дану годину з урахуванням діючого тарифного плану. Всі графіки поділено наступним чином: період "ніч" – з 23<sup>00</sup> до 6<sup>00</sup>, період "полу пік" - з 6<sup>00</sup> до 8<sup>00</sup>, з 10<sup>00</sup> до 18<sup>00</sup> та з 22<sup>00</sup> до 23<sup>00</sup>; період "пік" - з 8<sup>00</sup> до 10<sup>00</sup> та з 18<sup>00</sup> до 22<sup>00</sup>.

Максимальне споживання електричної потужності компресорним цехом (рис. 1) відбувається у період надходження молока на підприємство, що співпадає з періодом напівпіку з 10<sup>00</sup> до 18<sup>00</sup>. Щоб візуально оцінити витрати на електрику на рис. 2 наведено графік коливання оплати за спожиту електричну енергію.

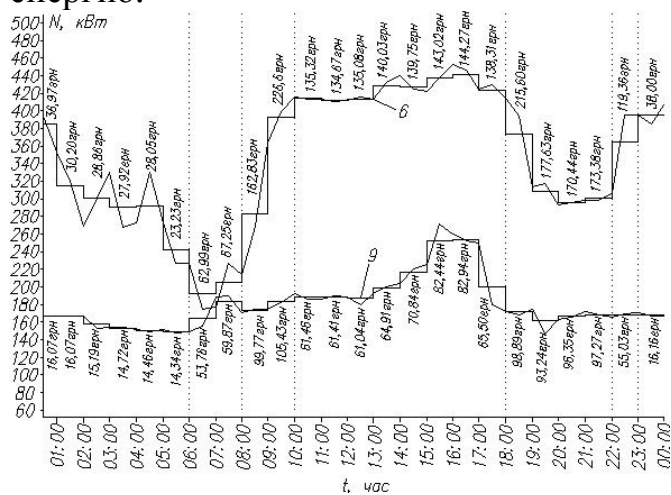


Рисунок 1 – Існуючий графік енергоспоживання компресорного цеху ВАТ "Шосткінський міськмолкомбінат" від 13.09.05: 6, 9 – номери відповідних гілок живлення

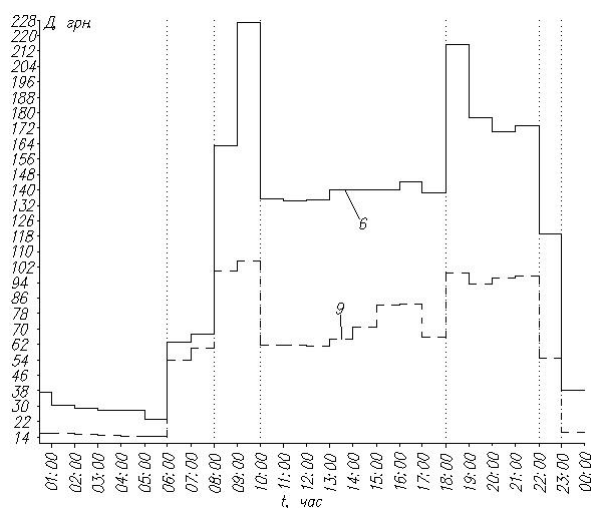


Рисунок 2 – Існуючий графік коливання сплати за спожиту електричну енергію від 13.09.05

Для зменшення витрат на виробництво штучного холоду слід зменшити споживання електричної потужності компресорним цехом. Це можна здійснити за рахунок "зрізання" пікового навантаження на холодильну установку з 6<sup>00</sup> до 23<sup>00</sup> та накопичення аналогічної кількості холоду в акумуляторах холоду (перенесення однакової кількості електричної енергії з денних годин на нічні). Також за рахунок зниження температури конденсації проводимо "зрізання" пікового навантаження (перенесення однакової кількості теплового навантаження на конденсатор на нічні години).

Використання льоду є найбільш ефективним способом для акумуляції холоду, оскільки такі акумулятори є компактними у порівнянні з водяними. Акумулююча здатність льоду 350 кДж/кг, натомість при охолодженні води на 6 °С лише 25 кДж/кг.

ОГЛЯД І АНАЛІЗ ДОСЛІДЖЕНЬ ДАННОЇ ПРОБЛЕМИ.

За першим варіантом видається можливим акумулювати таку кількість холоду, якої достатньо для зняття 60 кВт електричної потужності з піку навантаження на гілці №6, та утримання даного рівня з 9<sup>00</sup> до 18<sup>00</sup> (рис. 3). За рахунок цього можна заощадити близько 85,54 грн./доб. Загалом було "перекинуто" 357,2 кВт·год.

На рис. 3 площі спожитої та заощадженої електричної енергії однакові. Натомість економія витрат на оплату спожитої електричної енергії очевидні, що ілюструє рис. 4.

Варіант другий. За вказаних вище умов вночі акумулюється кількість льоду для "зрізання" піку електричного навантаження на 100 кВт (рис. 5), тобто відключення одного компресора потужністю 132 кВт на період з 9<sup>00</sup> до 19<sup>00</sup>. За цих умов ми пропускаємо увесь денний період "напівпіку" та дещо зменшуємо споживання електричної енергії у години піку. При цьому вночі працює на один компресор більше протягом всього періоду "ніч" і зупиняються тільки на межі зміни тарифних зон. Загальна кількість "перекинутої" електричної потужності дорівнює 717,2 кВт·год.

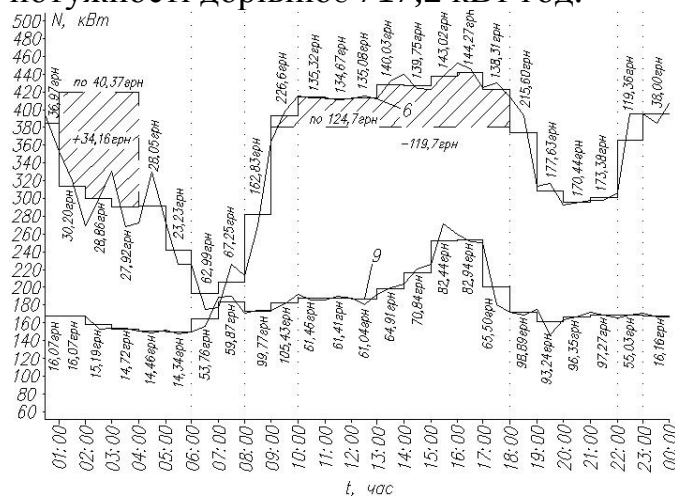


Рисунок 3 – Перший варіант переміщення електричної потужності на протягом доби

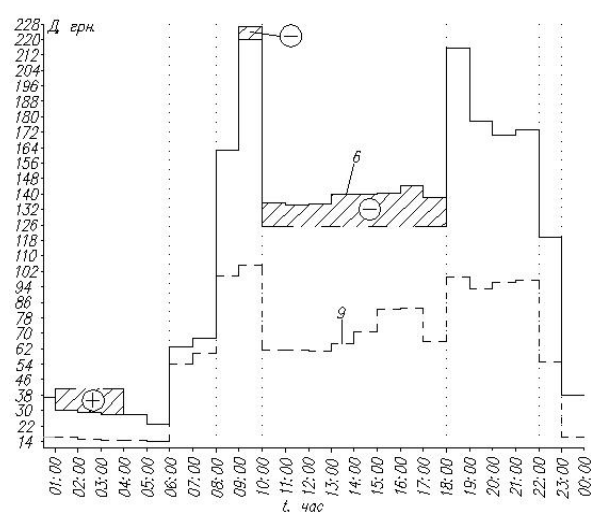


Рисунок 4 – Перший варіант оптимізації сплати за спожиту електричну енергію:  
"-" – зменшення витрат; "+" – зростання витрат

За даних перетворень з 9<sup>00</sup> до 19<sup>00</sup> ми сплачуємо на 265,83 гривні менше ніж при наявному режимі роботи. Вночі сплачується на 72,04 грн. більше ніж було. Як видно із співставлення площі «+» та «-» на рис. 6, заощадження очевидні, а співставлення витрат та заощаджень підтверджує це.

Таки чином, за даного режиму на добу можна заощаджувати близько 193 грн., а за місяць майже 6000 грн., що приблизно складає фонд заробітної плати операторів компресорного цеху.

Варіант третій. Нажаль, оптимізацію за вказаними варіантами досить складно втілити на практиці внаслідок великого часу, протягом якого розморожується накопичений лід.

На рис. 7 споживання електричної енергії у період ранішнього піку зведено до мінімуму, тобто працює лише один компресор. За даних умов ми зсуваємо

перехід на споживання максимальної кількості електричної потужності. Це досягається за рахунок генерування льоду у нічний період, якого вистачає на зниження та підтримання рівня спожитої енергії на 48,5 кВт менше, ніж максимальне добове споживання.

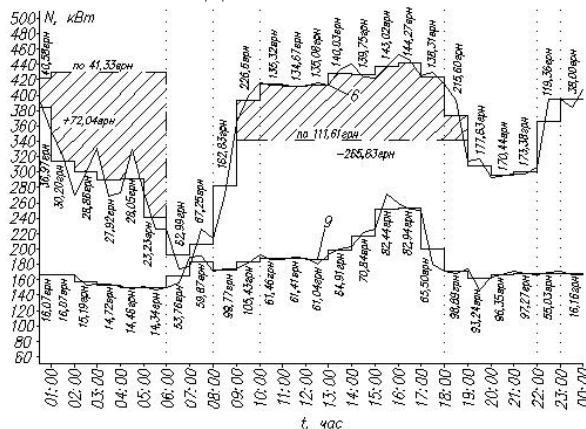


Рисунок 5 – Другий варіант переміщення електричної потужності на протягом доби

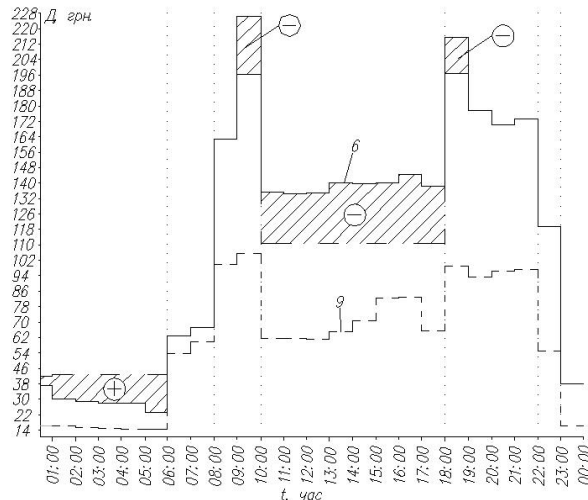


Рисунок 6 – Другий варіант оптимізації сплати за спожиту електричну енергію

При такому перетворенні графіку споживання електричної енергії вночі працюють три компресори на замороження води, при чому використано 628,4 кВт·год. Погодинний графік рівня сплати за спожиту електричну енергію, в даному випадку, не має першого піку, що суттєво впливає на загальну різницю між площами спожитої енергії вночі та заощадженою енергією вдень (рис. 8). Таким чином, заощаджується близьмо 211 грн. на добу, приблизно як і у другому варіанті при відніманні від піку спожитої електричної енергії 100 кВт, але в даному варіанті установка потребує менше енергії вночі. Тобто при зрізанні піку на сплаті за електроенергію заощаджується більше грошей при менших витратах електроенергії.

Детальний опис усіх графіків, енергоспоживання заводу та інші варіанти оптимізації представлено у статті [1].

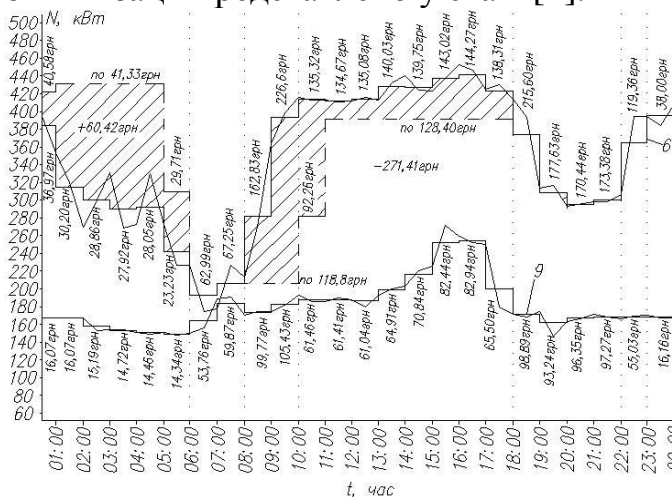


Рисунок 7 – Третій варіант переміщення електричної потужності на протягом доби



Рисунок 8 – Третій варіант оптимізації сплати за спожиту електричну енергію

## МЕТА.

На меті статі є порівняння економічної ефективності використання з акумульованого холоду для охолодження безпосередньо льодяної води та зниження температури конденсації холодильної установки.

Після проведення аналізу потрібно встановити як вигідніше використовувати накопичений лід.

## АНАЛІЗ І ОБГРУНТУВАННЯ ДОСЛІДЖЕНЬ.

Зниження температури конденсації можна досягти за рахунок підмішування льодяної води до охолоджувальної води конденсаторів. Видається можливим накопичити деяку кількість льоду вночі та використовувати його для зниження температури оборотної води, що подається у конденсатор.

Розглянемо два випадки: перший – зниження температури води, що подається на зрошувальний колектор випарного конденсатору, другий – зниження температури води на вході до кожухотрубного конденсатора.

Аналіз варіантів дозволяє констатувати, що перший ефективно працювати не буде. Разом з пониженням температури конденсації буде охолоджуватися і повітря, тобто витрачається накопичений холод. Окрім того, відомо, що добове коливання температури мокрого термометра протягом доби складає лише  $3 \div 4 \cdot ^\circ\text{C}$  [2], це відповідає коливанню температури конденсації у випарному конденсаторі  $1 \div 2 \cdot ^\circ\text{C}$  [3]. Таке коливання, при розрахунку одноступеневої установки з температурою кипіння  $-10 \cdot ^\circ\text{C}$  на компресорі П-220, дає коливання споживаної електричної потужності приблизно 3 кВт.

Другий варіант видається більш доцільним для використання, оскільки, знижуючи температуру води на вході до конденсатора, можна досягти на виході температури мокрого термометру. В ідеальному випадку при подаванні води з такою температурою на градирню остання нагріватися не буде. В такому випадку отримуємо найменшу можливу температуру конденсації. З іншого боку пряма зміни (рис. 9) споживання електричної потужності компресора П-220 за температури кипіння  $-10 \cdot ^\circ\text{C}$  має більш крутий нахил по відношенню до прямої випарного конденсатора, тому використання акумуляції холоду в даному випадку доцільніше.

Для визначення економічного ефекту від роботи реальної холодильної установки ВАТ "Шосткінський міськмолкомбінат" станом на 13.09.05 було проведено варіаційний розрахунок з урахуванням реального часу роботи компресорів установки для системи з існуючими випарними та умовно встановленими кожухотрубними конденсаторами. При розрахунку температури конденсації для системи з кожухотрубним конденсатором приймалося припущення щодо можливості отримання температури води на виході з конденсатора рівної температури мокрого термометра для кліматичних умов міста Шостка.

Після розрахунку одержано графік (рис. 10) споживання електричної потужності компресорами що повністю співпадає з реальним коливанням кривих на рис. 1. Тут не було враховано енергоспоживання насосів, вентиляторів та іншого обладнання підключеного до гілок живлення №6 та №9.

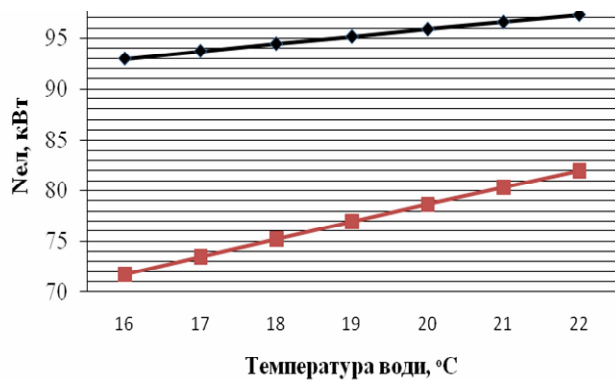


Рисунок 9 – Зміна енергоспоживання компресора П-220 при роботі з випарним (темна лінія) та кожухотрубним (світла лінія) конденсатором

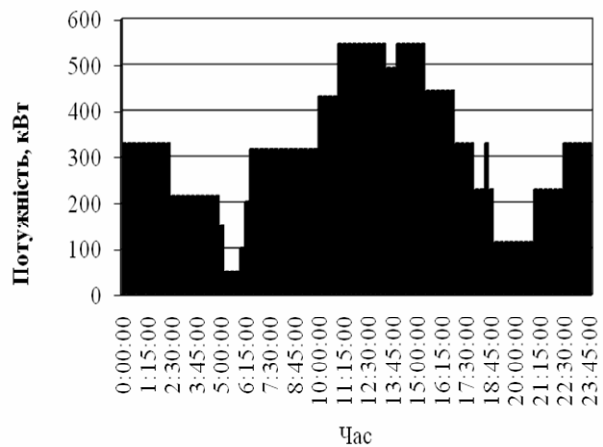


Рисунок 10 – Зміна енергоспоживання компресорів холодильної установки при роботі з випарними конденсаторами

Провівши оптимізацію споживання електричної енергії шляхом віднімання заощадженої потужності від реально існуючої та додавання необхідної потужності для накопичення льоду вночі, отримано рис. 11, де видно суттєву різницю у площях спожитої та заощадженої потужностей. На рис. 12 представлено коливання витрати коштів на сплату за спожиту електричну енергію. З нього видно, що вночі вироблення холоду на порядок дешевше ніж заощаджена потужність вдень.

Загалом знято навантаження з 8<sup>00</sup> до 22<sup>00</sup> на рівні 1111 кВт·год., а витрачено вночі 114,24 кВт·год.. У грошовому вимірі це складає 435,03 грн та 10,98 грн відповідно. Економія складає майже 424 грн за добу, що в місяць дорівнює 12721,5 грн.

Однозначно казати про перевагу системи з акумулятором холоду на кожухотрубному конденсаторі не можна, оскільки порівнювалися різні типи пристроїв. Для того щоб виявити реальну економію даної системи було проведено розрахунок всієї установки з використанням кожухотрубного конденсатора, що працює в ідеальних умовах (температура води на вході до конденсатора дорівнює температурі мокрого термометру, температурні перепади води в конденсаторі та між водою на виході і температурою конденсації мінімальні).

Розрахунок показав, що загалом знімається 722,46 кВт·год. потужності лише за рахунок переходу на кожухотрубні конденсатори.

Порівнявши розрахункові потужності саме при роботі на кожухотрубних конденсаторах з та без пониження температури конденсації, отримуємо реальну економію. Так знято навантаження з 8<sup>00</sup> до 22<sup>00</sup> на рівні 388,55 кВт·год., а витрачено в ночі 99,28 кВт·год.. У грошовому вимірі це складає 151,77 грн та 9,54 грн відповідно. Економія складає 142,23 грн за добу, що в місяць дорівнює 4266,9 грн.

Як бачимо, більший економічний ефект маємо для даної холодильної установки при переході на кожухотрубні конденсатори, ніж від акумуляції

Figure 1 consists of two graphs. The left graph shows the power consumption (N, kW) of the heating system over time (t, hours) from 01:00 to 23:00. The y-axis ranges from 60 to 500 kW. The right graph shows the energy consumption (D, Gcal) of the heating system over time (t, hours) from 01:00 to 23:00. The y-axis ranges from 14 to 228 Gcal. Both graphs show a significant increase in consumption starting around 08:00, peaking around 14:00, and then decreasing.

| Time (t, hours) | Power Consumption (N, kW) | Energy Consumption (D, Gcal) |
|-----------------|---------------------------|------------------------------|
| 01:00           | 16.07                     | 14                           |
| 02:00           | 16.07                     | 14                           |
| 03:00           | 15.19                     | 14                           |
| 04:00           | 14.72                     | 14                           |
| 05:00           | 14.46                     | 14                           |
| 06:00           | 14.34                     | 14                           |
| 07:00           | 53.76                     | 14                           |
| 08:00           | 59.87                     | 14                           |
| 09:00           | 89.76                     | 14                           |
| 10:00           | 95.42                     | 14                           |
| 11:00           | 60.75                     | 14                           |
| 12:00           | 47.21                     | 14                           |
| 13:00           | 46.81                     | 14                           |
| 14:00           | 52.12                     | 14                           |
| 15:00           | 56.64                     | 14                           |
| 16:00           | 71.08                     | 14                           |
| 17:00           | 65.50                     | 14                           |
| 18:00           | 98.89                     | 14                           |
| 19:00           | 93.24                     | 14                           |
| 20:00           | 96.35                     | 14                           |
| 21:00           | 97.27                     | 14                           |
| 22:00           | 55.03                     | 14                           |
| 23:00           | 16.16                     | 14                           |

Рисунок 12 – Варіант оптимізації  
сплати за спожиту електричну енергію  
при зниженні температури конденсації

Графік залежності показу  $D/N$  від номера варіанту. Показує зростаючий тренд з чотирма даними точками.

| Номер варіанту | $D/N$ |
|----------------|-------|
| 1              | 0,24  |
| 2              | 0,27  |
| 3              | 0,34  |
| 4              | 0,37  |

| N      | D/N  |
|--------|------|
| 357.2  | 0.24 |
| 717.2  | 0.27 |
| 628.4  | 0.34 |
| 388.55 | 0.37 |

Рисунок 14 – Залежність ефективності  
переміщення електроенергії від  
кількості переміщеної електричної  
енергії

$$\begin{aligned} D_1/N_1 &= 0,24 \text{ гρη/}(\kappa\text{Вт}\cdot\text{год}), \\ D_2/N_2 &= 0,27 \text{ гρη/}(\kappa\text{Вт}\cdot\text{год}), \\ D_3/N_3 &= 0,336 \text{ гρη/}(\kappa\text{Вт}\cdot\text{год}), \\ D_4/N_4 &= 0,366 \text{ гρη/}(\kappa\text{Вт}\cdot\text{год}). \end{aligned}$$

Одержаний графік на рис. 13 свідчить, що найбільш ефективним виявляється «зрізання» електричної потужності способом зниження температури конденсації.

На рис. 14 за однакової кількості переміщеної потужності ефективність більша у варіанті зниження температури конденсації в проточному конденсаторі.

### ВИСНОВКИ

Виходячи з усього вище викладеного, можна зробити наступні висновки:

- найперспективніший варіант використання акумуляторів холоду – є використання їх для зниження температури конденсації з  $8^{00}$  до  $22^{00}$ ,
- використання акумуляції холоду для зниження температури конденсації на випарних конденсаторах недоцільне,
- накопичення льоду вночі майже не обмежено потужністю обладнання та часом роботи установки,
- використання максимальної кількості холоду в період піку обмежено швидкістю танення льоду та часом надходження молока на підприємство.

### ПЕРСПЕКТИВИ ПОДАЛЬШИХ ДОСЛІДЖЕНЬ.

Для повного використання вказаних переваг акумуляції холоду на виробництві, необхідно вивчити процеси фазового переходу, створити математичні моделі швидкості замерзання води та танення льоду, розробити алгоритм дій при використанні накопиченого льоду та методики інженерних розрахунків обладнання.

### Література

1. *Пилипенко О. Ю.* Обґрунтування доцільності використання акумуляторів холоду з фазовим переходом / О. Ю. Пилипенко, Я. І. Засядько // Холодильна техніка і технологія. – 2008. – № 5 (115). – С. 11-15.
2. *Мирончук Ю. А.* Исследование целесообразности применения многозональных тарифов на электроэнергию для распределительных холодильников / Ю. А. Мирончук // Холодильна техніка і технологія. – 2008. – № 4 (114). – С. 4-9.
3. *Явнель Б. К.* Курсовое и дипломное проектирование холодильных установок и систем кондиционирования воздуха / Б. К. Явнель. – 3-е изд. перераб. и доп. – М. : Агропромиздат, 1989. – 223 с.