

УДК 697.94.(075)

д.т.н., доцент В.Й. Лабай,  
Національний університет “Львівська політехніка”

**ЗАЛЕЖНІСТЬ ВТРАТ ЕКСЕРГІЇ  
В ЕЛЕМЕНТАХ ХОЛОДИЛЬНИХ МАШИН SPLIT-КОНДИЦІОНЕРІВ  
ВІД КІНЦЕВИХ РІЗНИЦЬ ТЕМПЕРАТУР  
У ВИПАРНИКУ І КОНДЕНСАТОРІ**

*Використано розроблений ексергетичний метод аналізу роботи одноступеневих хладонових холодильних машин split-кондиціонерів. Встановлена залежність втрат ексергії у компресорі, конденсаторі, дроселі і випарнику split-кондиціонера фірми „Sanuo” холодопродуктивністю 2020 Вт від кінцевих різниць температур у випарнику і конденсаторі.*

*Список літ.: 5 назв.*

*Ключові слова: ексергія, баланс, втрати, кондиціонер.*

**Постанова проблеми.** Холодильні машини, які застосовують в split-кондиціонерах, потребують вдосконалення для підвищення їх енергоефективності, яке можливе з використанням сучасного методу термодинаміки – ексергетичного [1, 2, 3].

Ексергетичний аналіз дозволяє встановити максимальні термодинамічні можливості холодильної машини, визначити втрати ексергії в ній та обґрунтувати рекомендації з вдосконалення окремих її елементів. А для цього треба досконало вивчити всі аспекти роботи холодильної машини split-кондиціонерів.

**Аналіз останніх досліджень та публікацій.** Найдетальніше ексергетичний метод аналізу одноступеневих холодильних машин наведений в [1], який непристосований для холодильних машин split-кондиціонерів, у яких випарник і конденсатор омиваються відповідним повітрям, а в контурі холодильної машини циркулює інший холодоагент. Також коротко цей метод аналізу висвітлений у [2, 3].

Тому автором розроблений ексергетичний метод аналізу роботи одноступеневих хладонових холодильних машин (без ефективного охолодження компресора) для split-кондиціонерів [4, 5]. У цьому методі використана принципова схема холодильної машини, яка наведена на рис. 1, а, і відповідно побудова процесів її роботи на  $p,i$ -діаграмі – на рис. 1, б та холодильний агент хладон-22 (R22). Такий метод термодинамічного вивчення холодильної машини дає можливість дослідити її як загалом, так і її окремі частини, щоб отримати повну інформацію про процеси перетворення енергії,

які мають місце в холодильній машині. Результатом аналізу є знаходження втрат ексергії в окремих елементах холодильної машини та ексергетичного ККД процесу загалом.

**Мета роботи** – визначення залежності втрат ексергії у компресорі, конденсаторі, дроселі і випарнику холодильних машин split-кондиціонерів від кінцевих різниць температур у випарнику і конденсаторі. Для цього потрібно встановити:

– втрати ексергії у компресорі, конденсаторі, дроселі і випарнику, наприклад, split-кондиціонера “Sanyo” холодопродуктивністю 2020 Вт за стандартних зовнішніх температурних умов випробування, залежно від кінцевих різниць температур у випарнику і конденсаторі;

– аналітичні залежності між втратами ексергії у компресорі, конденсаторі, дроселі і випарнику вибраного split-кондиціонера “Sanyo” і кінцевими різницями температур у випарнику і конденсаторі.

Це і було завданням досліджень.

**Виклад основного матеріалу.** Ексергетичний ККД  $\eta_e$  одноступеневої парокомпресорної хладонової холодильної машини split-кондиціонерів визначали з її ексергетичного балансу, який має вигляд:

$$E_{\text{вх}} = E_{\text{вих}} + \Sigma D, \quad \% , \quad (1)$$

де  $E_{\text{вх}}$  – вхідний потік ексергії у компресор кондиціонера (робота компресора), %;  $E_{\text{вих}}$  – вихідний потік ексергії з випарника кондиціонера, або ексергетична холодопродуктивність кондиціонера, %;  $\Sigma D$  – загальні втрати потоку ексергії у всіх апаратах холодильної машини кондиціонера, %.

Виходячи з цього, ексергетичний ККД  $\eta_e$  визначали так:

$$\eta_e = \frac{E_{\text{вих}}}{E_{\text{вх}}} = 1 - \frac{\Sigma D}{E_{\text{вх}}} . \quad (2)$$

Технічні характеристики вибраного для досліджень split-кондиціонера “Sanyo” за стандартних зовнішніх температурних умов  $t_{H_1} = +35^\circ\text{C}$  і  $t_{C_1} = +27^\circ\text{C}$ : холодопродуктивність  $Q_x^{\text{CT}} = 2020$  Вт, споживана потужність  $N_{\text{сп}}^{\text{CT}} = 610$  Вт, кількість конденсату  $W_{\text{конд}}^{\text{CT}} = 0,9$  л/год, витрати повітря на випарнику  $L_{\text{вип}}^{\text{CT}} = 450$  м<sup>3</sup>/год і конденсаторі  $L_{\text{к}}^{\text{CT}} = 1360$  м<sup>3</sup>/год кондиціонера і, відповідно, ексергетичний ККД  $\eta_e = 0,249$ , холодильний агент хладон-22 (R22).

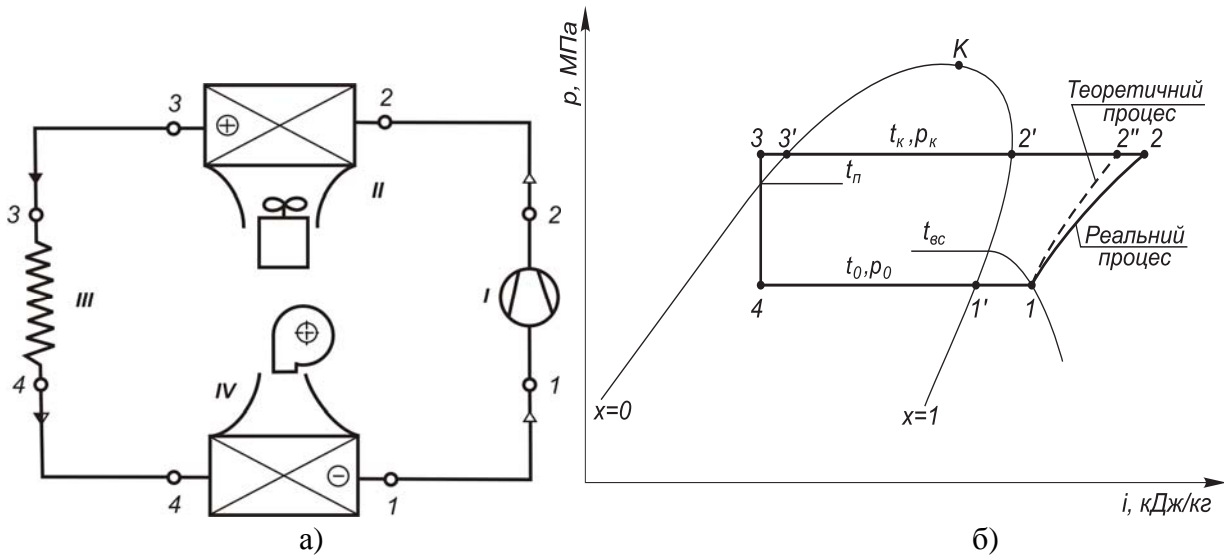


Рис. 1. Принципова схема холодильної машини (а)

та побудова процесів роботи на  $p, i$ -діаграмі (б):

I – компресор; II – конденсатор; III – капілярна трубка (дрозель); IV – випарник

Кінцева різниця температур у випарнику (внутрішнього повітря на виході з випарника і киплячого холодильного агента)  $\Delta t_{\text{вип}}$  впливає на значення температури випаровування рідкого холодильного агента  $t_{\text{вип}} = t_0$ , а кінцева різниця температур у конденсаторі (холодильного агента, який конденсується, і зовнішнього повітря на виході з конденсатора)  $\Delta t_k$  впливає на значення температури конденсації пари холодильного агента  $t_k$ , що своєю чергою визначають внутрішній температурний режим роботи холодильних машин split-кондиціонерів, які працюють на однокомпонентному холодильному агенті. У той самий час від внутрішнього температурного режиму роботи холодильних машин split-кондиціонерів залежать не тільки ексергетичний ККД холодильних машин, але й параметри роботи усіх їх елементів: компресора, конденсатора, дроселя (капілярної трубки) і випарника та адекватні втрати ексергії у них.

Для встановлення залежності втрат ексергії у компресорі, конденсаторі, дроселі і випарнику вибраного кондиціонера від кінцевих різниць температур у випарнику і конденсаторі, які суттєво впливають на його роботу, прийняли такі умови функціонування кондиціонера:

- кінцеву різницю температур у випарнику  $2 \leq \Delta t_{\text{вип}} \leq 4^\circ\text{C}$  (для стандартного процесу приймали  $\Delta t_{\text{вип}} = 2,8^\circ\text{C}$ );
- кінцеву різницю температур у конденсаторі  $3 \leq \Delta t_k \leq 5^\circ\text{C}$  (для стандартного процесу приймали  $\Delta t_k = 4,2^\circ\text{C}$ );
- стандартну температуру навколишнього середовища  $t_{H_1} = 35^\circ\text{C}$  (зовнішнього повітря);
- стандартну температуру внутрішнього (рециркуляційного) повітря відповідно до температури навколишнього середовища  $t_{C_1} = 27^\circ\text{C}$ ;

- різницю температур перегрівання у випарнику  $\Delta t_{\text{перегр}} = 10^{\circ}\text{C}$ ;
- різницю температур переохолодження у конденсаторі  $\Delta t_{\text{переох}} = 5^{\circ}\text{C}$ ;
- адіабатичний (індикаторний) ККД компресора  $\eta_i = 0,8$ ;
- електромеханічний ККД компресора  $\eta_{\text{ем}} = 0,9$ .
- холодильний агент – хладон-22 (R22).

Отримані під час проведення аналізу результати наведені у таблиці (курсивом зазначені технічні характеристики кондиціонера для стандартних кінцевих різниць температур у випарнику і конденсаторі, а **жирно** – технічні характеристики кондиціонера для запропонованих кінцевих різниць температур у випарнику і конденсаторі) та зображені графічно на рис. 2, 3, 4 і 5.

Таблиця

**Результати досліджень втрат ексергії у компресорі, конденсаторі, дроселі і випарнику та ексергетичного ККД split-кондиціонера “Sanyo” стандартної холодопродуктивності 2020 Вт залежно від кінцевих різниць температур у випарнику і конденсаторі**

$\Delta t_{\text{вип}}$ , °C	$\Delta t_{\text{к}}$ , °C	$D_{\text{компр}}$ , %	$D_{\text{к}}$ , %	$D_{\text{др}}$ , %	$D_{\text{вип}}$ , %	$e_{\text{вх}} = l$ , кДж/кг	$e_{\text{вих}}$ , кДж/кг	$\eta_e$
2,0	4,2	24,2	32,9	7,3	9,9	27,9	7,18	0,258
2,5	4,2	24,2	32,4	7,2	11,0	28,4	7,18	0,252
3,0	4,2	24,1	31,9	7,1	12,2	29,0	7,17	0,247
3,5	4,2	24,1	31,5	6,9	13,2	29,5	7,16	0,243
4,0	4,2	24,0	31,1	6,8	14,3	30,1	7,15	0,238
2,8	3,0	24,4	30,3	7,4	11,7	27,7	7,24	0,262
2,8	3,5	24,3	31,1	7,3	11,7	28,1	7,21	0,256
2,8	4,0	24,2	31,8	7,2	11,7	28,6	7,18	0,251
2,8	4,5	24,1	32,6	7,1	11,7	29,0	7,15	0,246
2,8	5,0	23,9	33,3	7,0	11,7	29,5	7,13	0,242
2,8	4,2	24,1	32,1	7,1	11,7	28,8	7,17	0,249
<b>2,0</b>	<b>3,0</b>	<b>24,5</b>	<b>31,0</b>	<b>7,6</b>	<b>9,8</b>	<b>26,8</b>	<b>7,25</b>	<b>0,270</b>

У таблиці  $D_{\text{компр}}$ ,  $D_{\text{к}}$ ,  $D_{\text{др}}$ ,  $D_{\text{вип}}$  – відповідно, відносні втрати ексергії у компресорі, конденсаторі, дроселі і випарнику, %;  $e_{\text{вх}} = l$  – питомий потік вхідної ексергії, підведеної до електродвигуна компресора (питома робота компресора), кДж/кг;  $e_{\text{вих}}$  – потік питомої вихідної ексергії, відведеної від

випарника у вигляді ексергетичної холодопродуктивності, кДж/кг;  $\eta_e$  – ексергетичний ККД холодильної машини кондиціонера.

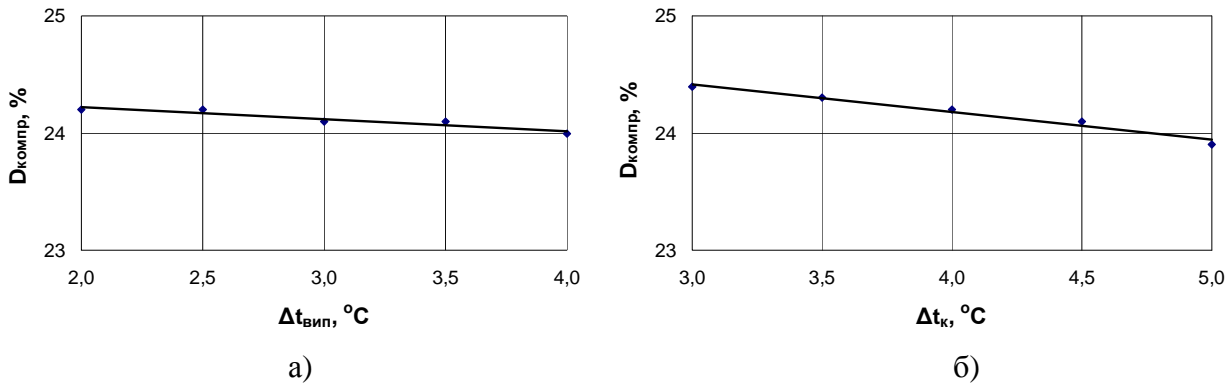


Рис. 2. Залежність відносних втрат ексергії у компресорі  $D_{\text{компр}}$  split-кондиціонера „Sanyo” стандартної холодопродуктивності 2020 Вт від кінцевих різниць температур у випарнику  $\Delta t_{\text{вип}}$  (а) і конденсаторі  $\Delta t_{\text{к}}$  (б)

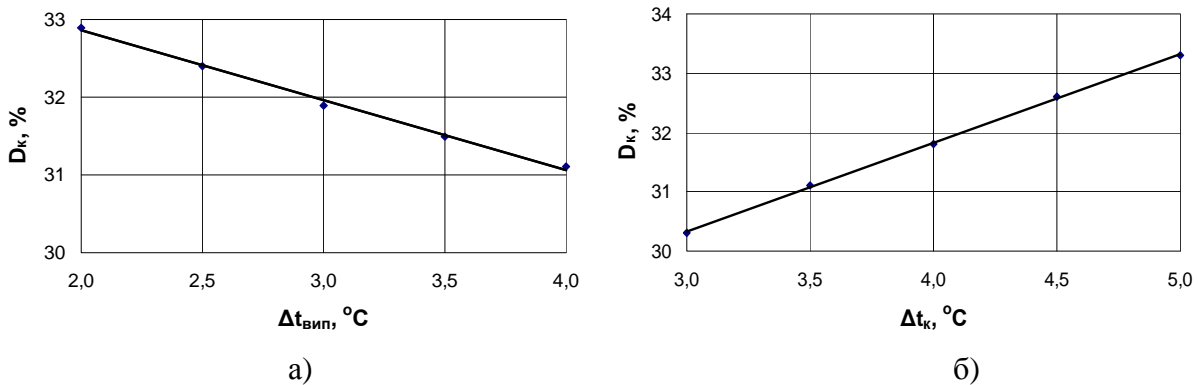


Рис. 3. Залежність відносних втрат ексергії у конденсаторі  $D_{\text{к}}$  split-кондиціонера „Sanyo” стандартної холодопродуктивності 2020 Вт від кінцевих різниць температур у випарнику  $\Delta t_{\text{вип}}$  (а) і конденсаторі  $\Delta t_{\text{к}}$  (б)

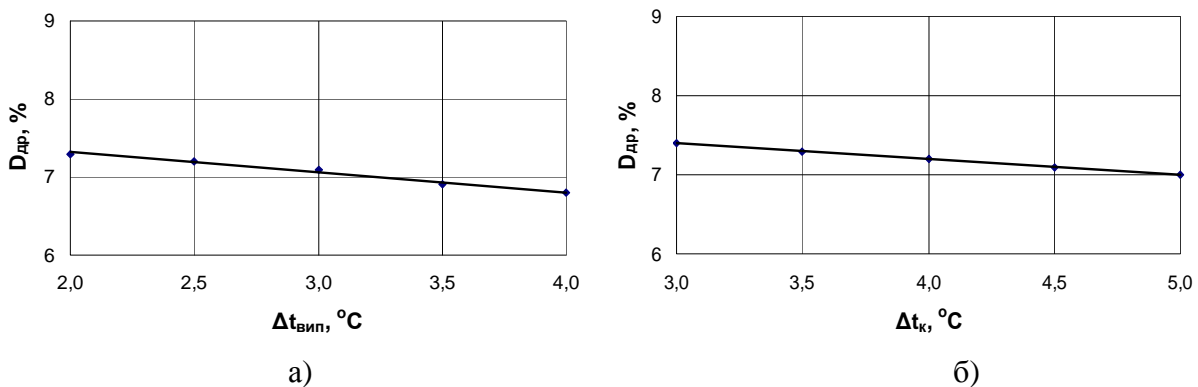


Рис. 4. Залежність відносних втрат ексергії у дроселі  $D_{\text{др}}$  split-кондиціонера „Sanyo” стандартної холодопродуктивності 2020 Вт від кінцевих різниць температур у випарнику  $\Delta t_{\text{вип}}$  (а) і конденсаторі  $\Delta t_{\text{к}}$  (б)

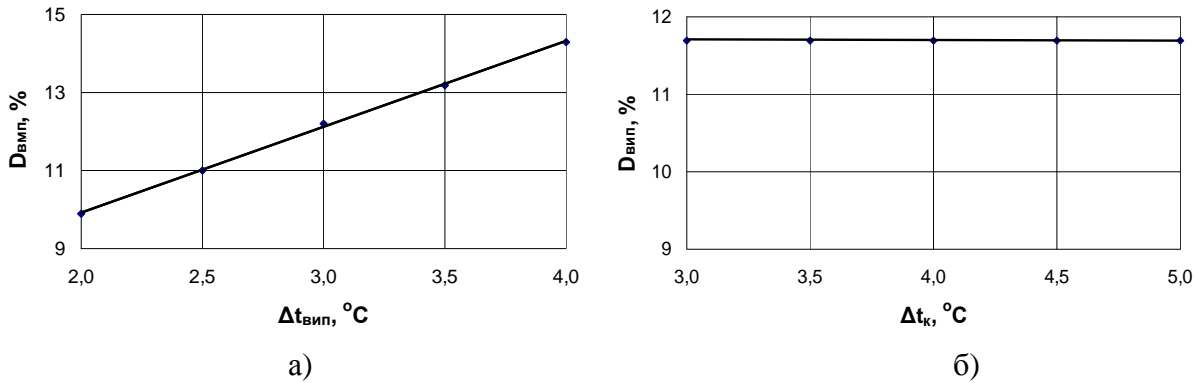


Рис. 5. Залежність відносних втрат ексергії у випарнику  $D_{\text{вип}}$  split-кондиціонера „Sanyo” стандартної холодопродуктивності 2020 Вт від кінцевих різниць температур у випарнику  $\Delta t_{\text{вип}}$  (а) і конденсаторі  $\Delta t_{\text{к}}$  (б)

Залежності відносних втрат ексергії вибраного кондиціонера від кінцевих різниць температур у випарнику  $2 \leq \Delta t_{\text{вип}} \leq 4^\circ\text{C}$  та конденсаторі  $3 \leq \Delta t_{\text{к}} \leq 5^\circ\text{C}$  апроксимовані формулами:

– для компресора

$$D_{\text{компр}} = 25,4 - 0,1 \cdot \Delta t_{\text{вип}} - 0,25 \cdot \Delta t_{\text{к}}, \% ; \quad (3)$$

– для конденсатора

$$D_{\text{к}} = 28,2 - 0,9 \cdot \Delta t_{\text{вип}} + 1,5 \cdot \Delta t_{\text{к}}, \% ; \quad (4)$$

– для дроселя

$$D_{\text{др}} = 8,67 - 0,25 \cdot \Delta t_{\text{вип}} - 0,2 \cdot \Delta t_{\text{к}}, \% ; \quad (5)$$

– для випарника

$$D_{\text{вип}} = 5,5 + 2,2 \cdot \Delta t_{\text{вип}}, \% . \quad (6)$$

Максимальна похибка розрахунків за формулою (3) становить 0,5%, за формулою (4) – 0,5%, за формулою (5) – 0,7% і за формулою (6) – 0,8%.

**Висновки.** Аналізуючи отримані дані досліджень у таблиці та на рис. 2, 3, 4 і 5, можна дійти таких висновків. Зростання кінцевої різниці температур у випарнику холодильної машини вибраного кондиціонера  $\Delta t_{\text{вип}}$  від 2 до  $4^\circ\text{C}$ , тобто в 2 рази, призводить до незначного зменшення відносних втрат ексергії у компресорі  $D_{\text{компр}}$  від 24,2 до 24,0%, тобто в 1,0083 рази, у конденсаторі  $D_{\text{к}}$  – від 32,9 до 31,1%, тобто в 1,058 рази, у дроселі  $D_{\text{др}}$  – від 7,3 до 6,8%, тобто в 1,074 рази, і у випарнику до значного зростання  $D_{\text{вип}}$  – від 9,9 до 14,3%, тобто в 1,444 рази, за зменшення ексергетичного ККД  $\eta_e$  від 0,258 до 0,238, тобто в 1,084 рази, а зростання кінцевої різниці температур у конденсаторі холодильної

машини вибраного кондиціонера  $\Delta t_k$  від 3 до 5°C, тобто на 1,67 рази, – до незначного зменшення відносних втрат ексергії у компресорі  $D_{\text{компр}}$  від 24,4 до 23,9%, тобто в 1,021 рази, у конденсаторі до незначного зростання  $D_k$  – від 30,3 до 33,3%, тобто в 1,099 рази, у дроселі до незначного зменшення  $D_{\text{др}}$  – від 7,4 до 7,0%, тобто в 1,057 рази, і до сталого значення у випарнику  $D_{\text{вип}} = 11,7\%$  за зменшення ексергетичного ККД  $\eta_e$  від 0,262 до 0,242, тобто в 1,083 рази. Варто зауважити, що відносні втрати ексергії у випарнику  $D_{\text{вип}}$  не залежать від кінцевої різниці температур у конденсаторі холодильної машини вибраного кондиціонера  $\Delta t_k$  (рис. 5, б та формула (6)). Значить найкраще застосовувати найнижчі кінцеві різниці температур, тобто у випарнику 2°C, а у конденсаторі 3°C. Застосування запропонованих кінцевих різниць температур у випарнику і конденсаторі замість стандартних, відповідно 2,8°C і 4,2°C, призведе до зростання ексергетичного ККД  $\eta_e$  від 0,249 до 0,270, тобто на 8,4%, що є достатньо значним.

Отже, ексергетичний аналіз роботи холодильної машини split-кондиціонера за стандартних зовнішніх температурних умов і різних кінцевих різниць температур у випарнику і конденсаторі кондиціонера показав, що вищі значення ексергетичного ККД в неї є за найнижчих кінцевих різниць температур у випарнику і конденсаторі. Тому з точки зору ексергетичного аналізу застосовувати вибраний split-кондиціонер стандартної холодопродуктивності 2020 Вт для забезпечення мікроклімату в приміщенні ощадніше з вищим ексергетичним ККД за стандартних зовнішніх температурних умов і запропонованих кінцевих різниць температур у випарнику  $\Delta t_{\text{вип}} = 2^\circ\text{C}$  та у конденсаторі –  $\Delta t_k = 3^\circ\text{C}$  та, відповідно, за незначно нарощеної відносної втрати ексергії у компресорі  $D_{\text{компр}} = 24,5\%$ , незначно зменшеної – у конденсаторі  $D_k = 31,0\%$ , незначно нарощеної – у дроселі  $D_{\text{др}} = 7,6\%$  і незначно зменшеної – у випарнику  $D_{\text{вип}} = 9,8\%$  для холодильної машини вибраного split-кондиціонера “Sanyo”. Вочевидь, що завдяки цьому ексергетичний ККД зросте на 8,4%, що є суттєвим.

### Література

1. Соколов Е.Я. Энергетические основы трансформации тепла и процессов охлаждения: учеб. пособие для вузов.- 2-е изд., перераб. / Е.Я. Соколов, В.М. Бродянский. – М.: Энергоиздат, 1981. – 320 с.
2. Шаргут Я. Эксергия / Я. Шаргут, Р. Петела. – М.: Энергия, 1968. – 280 с.
3. Эксергетические расчеты технических систем: справ. пособие / [В.М. Бродянский, Г.П. Верховикер, Я.Я. Карчев и др.]; под ред. А.А. Долинского, В.М. Бродянского; Ин-т технической теплофизики АН УССР. – Киев: Наук. думка, 1991. – 360 с.

4. *Лабай В.Й.* Ексергетичний аналіз місцевих автономних кондиціонерів / В.Й. Лабай, О.В. Омельчук // Науковий вісник: зб. наук.-техн. праць. – Львів: НЛТУ України, 2005. – Вип. 15.3. – С. 262–266.

5. *Лабай В.Й.* Термодинамічні основи знаходження ексергетичного ККД холодильних машин split-кондиціонерів / В.Й. Лабай, Й.С. Мисак // Науково-технічний журнал «Холодильна техніка і технологія». – Одеса: ОДАХ, 2010. – № 5 (127). – С. 15–19.

#### **Аннотация**

Использован разработанный эксергетический метод анализа работы одноступенчатых хладоновых холодильных машин split-кондиционеров. Установлена зависимость потерь эксергии в компрессоре, конденсаторе, дросселе и испарителе split-кондиционера фирмы „Sanyo” холодопроизводительностью 2020 Вт от конечной разности температур в испарителе и конденсаторе.

Список лит.: 5 названий.

Ключевые слова: эксергия, баланс, потери, кондиционер.

#### **Annotation**

The elaborating method of the exergetic analysis of air split-conditioners one-step Freon refrigeration machines was used in this article. The dependence of exergy losses in compressor, condenser, drosseller and evaporator for the air split-conditioner of firm “Sanyo” with cooling capacity 2020 W from final difference of temperature in evaporator and condenser was defined.

List lit.: 5 name.

Keywords: exergy, balance, losses, air conditioner.