

В. Й. Лабай, В. Ю. Ярослав, О. М. Довбуш
Національний університет "Львівська політехніка",
кафедра теплогазопостачання і вентиляції

ЕКСЕРГЕТИЧНА ЕФЕКТИВНІСТЬ SPLIT-КОНДИЦІОНЕРІВ ФІРМИ "DAIKIN"

© Лабай В. Й., Ярослав В. Ю., Довбуш О. М., 2018

Використано авторську інноваційну математичну модель ексергетичного методу аналізу роботи одноступеневих хладонових холодильних машин з холодильним агентом R410A, які використовують у split-кондиціонерах фірми „Daikin” моделі серії ATXN-MB, з метою комп’ютерного оцінювання їх енергетичної ефективності на основі ексергетичного ККД залежно від різних факторів, що впливають на їх роботу. Визначено ексергетичний ККД та втрати ексергії у окремих елементах split-кондиціонерів зі стандартною холодопродуктивністю 2050, 2560, 3410, 5480, 6230 Вт фірми „Daikin” за стандартних зовнішніх температурних умов. Встановлено, що зі зростанням холодопродуктивності split-кондиціонера його ексергетичний ККД зменшується від 23,1 до 19,4 %. За втратами ексергії, встановленими у всіх елементах холодильних машин split-кондиціонерів, визначають, які елементи split-кондиціонера треба вдосконалювати для зменшення втрат ексергії в них і загального підвищення ексергетичного ККД.

Ключові слова: холодильні машини, split-кондиціонери, ексергетична ефективність.

V. Labay, V. Yaroslav, O. Dovbush
Lviv Polytechnic National University
Department of Heat, Gas Supply and Ventilation

EXERGETIC EFFICIENCY SPLIT-CONDITIONERS OF "DAIKIN" FIRM

© Labay V., Yaroslav V., Dovbush O., 2018

In the modern air-conditioning systems with air split-conditioners, equipments, refrigeration agents and processes are occupied the important place, the objective assessment of the degree of its energy perfection which could be defined only on the basis of their exergy analysis. The purpose of the work is to establish exergetic efficiency and losses of exergy in separate elements of the refrigeration machines of the split-conditioners of "Daikin" firm of different cooling capacity.

The author's innovative mathematical model for the exergetic method for analyzing the work of one-stage refrigeration machines with refrigeration agent R410A, which are used in air split-conditioners of "Daikin" firm model series ATXN-MB, for the purpose of computer evaluation their energy efficiency through exergetic output-input ratio (OIR) depending on the various factors influencing their work, was used in this article. The exergetic OIR of air split-conditioners was determined from its exergy balance for 1 kg/s of the cost of the circulating working refrigerant. The exergetic OIR and losses of exergy in separate elements of the air split-conditioners with standard cooling capacity 2050, 2560, 3410, 5480, 6230 W of "Daikin" firm at standard external temperature conditions are determined. It has been established that with increasing of air split-conditioner cooling capacity the exergetic OIR decreases from 23,1 % to 19,4 %, which is by 16,0 %, what is negative. The losses of exergy in all elements of

refrigeration machines of the air split-conditioners are installed, which indicates that elements of the air split-conditioner need to be improved to reduce losses of exergy in them, and the overall increasing in the exergetic OIR.

Key words: refrigeration machines, air split-conditioners, exergetic efficiency.

Постанова проблеми. У сучасних системах кондиціювання повітря, пов'язаних з трансформацією теплоти, до яких належать split-кондиціонери, важливе підвищення їх енергоефективності, а цього можна досягти з використанням інновацій термодинаміки, а саме ексергетичного аналізу [1].

В останні роки застосовують ексергетичний метод аналізу технічних систем, який враховує цінність теплової енергії залежно від її потенціалу (температури) [1–3]. Цей метод засновано і розвинено у роботах Р. Клаузіуса, Дж. Гіббса, Ж. Гюї, А. Стодоли, Я. Шаргута, А. Андрющенко, Д. Гохштейна, В. Бродяньського та ін.

Його основна ідея полягає в тому, що поряд з фундаментальним поняттям енергії додатково введено поняття ексергії, в якому враховано той факт, що енергія залежно від зовнішніх умов може мати різну вартість для практичного використання.

Під час вивчення процесів перетворення енергії в холодильній машині необхідно оцінювати термодинамічну ефективність процесів загалом та їх частин, а також джерел втрат у них загальним термодинамічним методом аналізу – ексергетичним [1].

Аналіз останніх досліджень та публікацій. Найдетальніше ексергетичний метод аналізу одноступеневих холодильних машин наведено 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 висвітлено у [2, 3, 9–11].

Автори удосконалили відомий ексергетичний метод аналізу для оцінювання роботи одноступеневих хладонових холодильних машин (без ефективного охолодження компресора) [1], який пристосовано для split-кондиціонерів і докладно описано у роботах [4–6]. У цій методиці використана принципова схема холодильної машини наведено на рис. 1, *а* і відповідна побудова процесів її роботи на *p,i*-діаграмі – на рис. 1, *б* та холодильний агент хладон-410А (R410А).

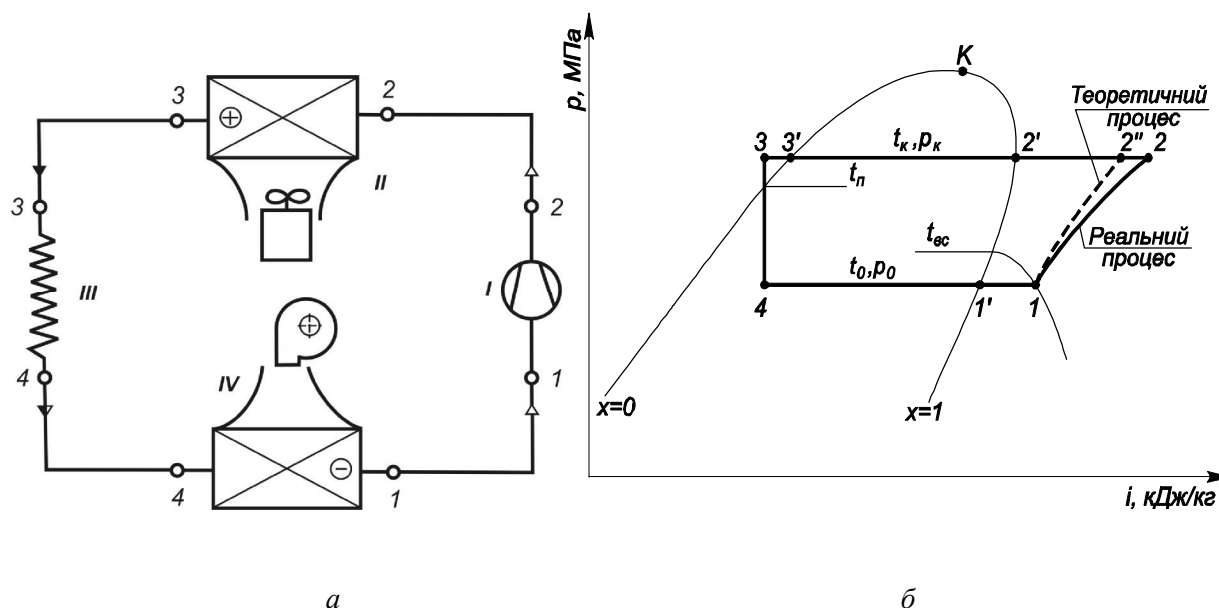


Рис. 1. Принципова схема холодильної машини (а) та побудова процесів роботи на p, i -діаграмі (б):
I – компресор; II – конденсатор; III – капілярна трубка (дрозель); IV – випарник

Мета роботи – встановлення ексергетичного ККД та втрат ексергії в окремих елементах холодильних машин split-кондиціонерів фірми “Daikin” різної холодопродуктивності. Для цього потрібно виявити:

- ексергетичний ККД split-кондиціонерів фірми “Daikin” різної холодопродуктивності за стандартних зовнішніх температурних умов експлуатації та витрат повітря на випарнику і конденсаторі, встановлені фірмою;
- втрати ексергії в окремих елементах split-кондиціонерів фірми “Daikin” різної холодопродуктивності за стандартних зовнішніх температурних умов експлуатації та витрат повітря на випарнику і конденсаторі, встановлені фірмою.

Описання інноваційної дослідницької моделі. Потрібні дослідження здійснювали за допомогою розробленої авторами комп’ютерної програми енергетичного та ексергетичного аналізу холодильних машин split-кондиціонерів, у якій використано технічні характеристики split-кондиціонерів “Daikin” за стандартних зовнішніх температурних умов $t_{H_1}^{ст} = 35\text{ }^{\circ}\text{C}$ і $t_{C_1}^{ст} = 27\text{ }^{\circ}\text{C}$: стандартні холодопродуктивності $Q_x^{ст}$, Вт, споживані потужності $N_{сп}^{ст}$, Вт, кількості конденсату на випарнику $W_{конд}^{ст}$, л/год, холодильний агент хладон-410A (R410A) та встановлені фірмою “Daikin” витрати повітря на випарнику (максимальні) $L_{вип}^{ст}$, м³/год, і конденсаторі $L_k^{ст}$, м³/год, кондиціонера.

Для встановлення ексергетичного ККД та втрат ексергії для вибраних кондиціонерів за стандартних зовнішніх температурних умов експлуатації та витрат повітря на випарнику і конденсаторі прийняли такі вихідні дані:

- кінцеву різницю температур у випарнику $\Delta t_{вип} = 2,8\text{ }^{\circ}\text{C}$;
- кінцеву різницю температур у конденсаторі $\Delta t_k = 4,2\text{ }^{\circ}\text{C}$;
- різницю температур перегрівання у випарнику $\Delta t_{перегр} = 10\text{ }^{\circ}\text{C}$;
- різницю температур переохолодження у конденсаторі $\Delta t_{переох} = 5\text{ }^{\circ}\text{C}$;
- адіабатичний (індикаторний) ККД компресора $\eta_i = 0,8$;
- електромеханічний ККД компресора $h_{ем} = 0,9$.

Ексергетичний ККД h_e одноступеневої парокомпресорної хладонової холодильної машини split-кондиціонерів визначали за її ексергетичним балансом для 1 кг/с витрати циркулюючого робочого холодильного агента, який має вигляд:

$$e_{вх} = e_{вих} + \Sigma d, \text{ кДж/кг}, \quad (1)$$

де $e_{вх} = l = e_{вх}^{компр}$ – вхідний питомий потік ексергії у компресор кондиціонера (питома робота компресора), кДж/кг; $e_{вих} = e_{вих}^{пов}$ – вихідний питомий потік ексергії з випарника кондиціонера, або ексергетична питома холодопродуктивність кондиціонера, кДж/кг; Σd – загальні питомі втрати потоку ексергії у всіх апаратах холодильної машини кондиціонера, кДж/кг.

Отже, ексергетичний ККД h_e визначали так:

$$h_e = \frac{e_{вих}}{e_{вх}} \cdot 100 = \left(1 - \frac{\Sigma d}{e_{вх}}\right) \cdot 100, \%. \quad (2)$$

Втрати ексергії у компресорі та окремих елементах холодильної машини кондиціонера знаходили за формулами

$$d_{компр} = e_{вх} + e_{поч} - e_{кін}, \text{ кДж/кг}; \quad (3)$$

$$d = e_{поч} - e_{кін}, \text{ кДж/кг} \quad (4)$$

або у відсотках від ексергії $e_{\text{вх}}$, яка входить до холодильної машини кондиціонера:

$$D_{\text{компр}} = \frac{e_{\text{вх}} + e_{\text{поч}} - e_{\text{кін}}}{e_{\text{вх}}} \cdot 100, \% \quad (5)$$

$$D = \frac{e_{\text{поч}} - e_{\text{кін}}}{e_{\text{вх}}} \cdot 100, \% \quad (6)$$

де $e_{\text{поч}}$ і $e_{\text{кін}}$ – відповідно, питома ексергія на вході і виході з окремого елемента холодильної машини кондиціонера, кДж/кг.

Значення ексергії холодильного агента в характерних точках процесу визначали за формулою:

$$e = i - i_{\text{н.с}} - T_{\text{н.с}}(s - s_{\text{н.с}}), \text{ кДж/кг}, \quad (7)$$

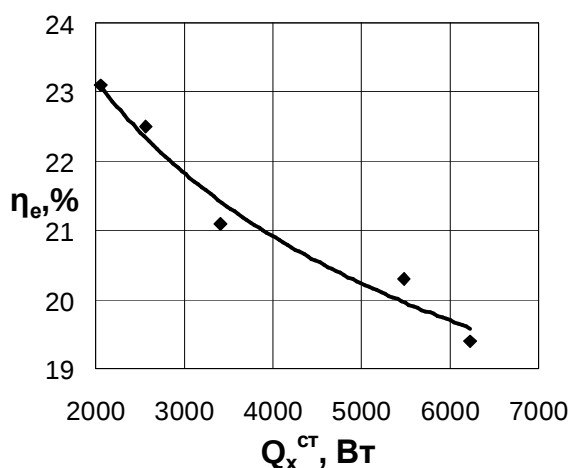
де i – значення питомої ентальпії холодильного агента в характерних точках процесу, кДж/кг; $i_{\text{н.с}}$ – значення питомої ентальпії холодильного агента в стані $T_{\text{н.с}}$, $P_{\text{н.с}}$ (температура і тиск навколишнього середовища), який знаходиться в рівновазі з навколишнім середовищем, кДж/кг; s та $s_{\text{н.с}}$ – відповідні значення питомої ентропії холодильного агента, кДж/(кг·К), які визначаються за термодинамічними діаграмами або таблицями [7, 8].

Результати дослідницької роботи. Отримані під час проведення аналізу результати наведено у таблиці та на рис. 2.

**Результати досліджень ексергетичного ККД та втрат ексергії
для split-кондиціонерів фірми “Daikin” стандартної холодопродуктивності**

$Q_{\text{х}}^{\text{ст}}$, Вт	$N_{\text{сп}}^{\text{ст}}$, Вт	$L_{\text{вип}}^{\text{ст}}$, м ³ /год	$D_{\text{компр}}$, %	$D_{\text{к}}$, %	$D_{\text{др}}$, %	$D_{\text{вип}}$, %	$h_{\text{е}}$, %
2050	800	587	26,9	25,5	14,0	10,5	23,1
2560	800	587	26,9	24,7	12,7	13,3	22,5
3410	1060	608	26,9	24,5	11,3	16,2	21,1
5480	1560	710	26,9	23,5	10,0	19,3	20,3
6230	1990	755	26,9	24,0	9,6	20,1	19,4

У таблиці $D_{\text{компр}}$, $D_{\text{к}}$, $D_{\text{др}}$, $D_{\text{вип}} = D_{\text{вип}}^{\text{н.т}}$ – відносні втрати ексергії, відповідно, у компресорі, конденсаторі, дроселі і випарнику на незворотний теплообмін холодильної машини split-кондиціонера, %.



*Рис. 2. Залежність ексергетичного ККД
split-кондиціонерів “Daikin” від їх стандартної
холодопродуктивності*

Залежність ексергетичного ККД split-кондиціонерів “Daikin” від їх стандартної холодопродуктивності апроксимована формулою:

$$h_e = 71,4 \cdot (Q_x^{ст})^{-0,148}. \quad (8)$$

За результатами розрахунку будували ексергетичні діаграми потоків Грассмана холодильних машин split-кондиціонерів (рис. 3).

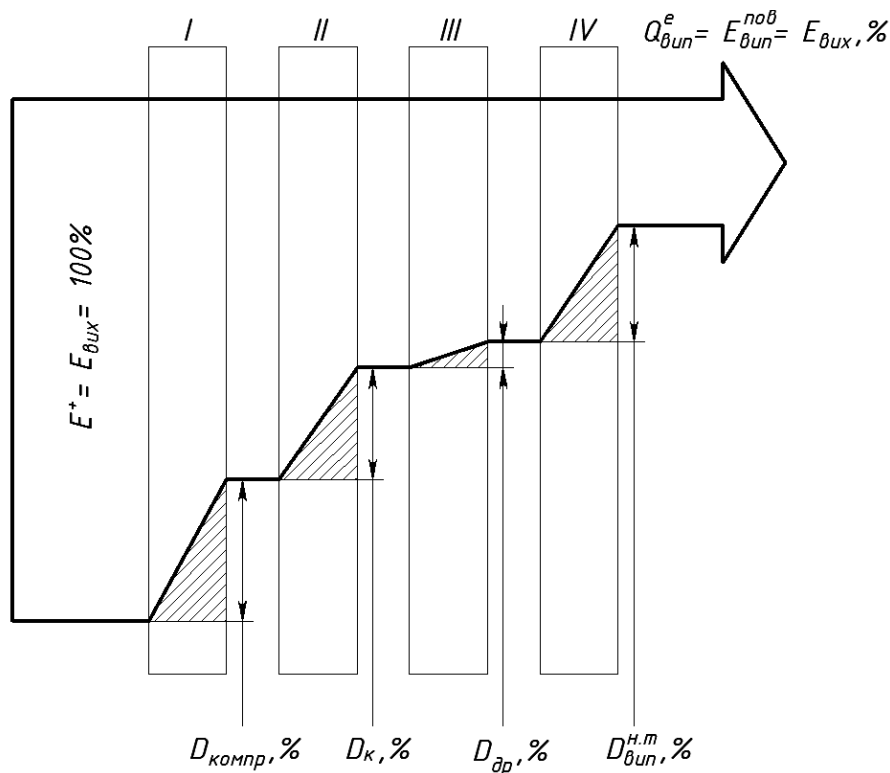


Рис. 3. Ексергетична діаграма потоків Грассмана холодильної машини split-кондиціонера: I – компресор; II – конденсатор; III – капілярна трубка (дросель); IV – випарник

Висновки. Аналізуючи отримані дані у таблиці та на рис. 2, можна дійти таких висновків. За зростання холодопродуктивності split-кондиціонерів фірми “Daikin” від 2050 до 6230 Вт їх ексергетичний ККД зменшується від 23,1 до 19,4 %, тобто на 16,0 %, що є достатньо значним. На наш погляд це недопустимо. Тому за проектування холодильних машин split-кондиціонерів різної холодопродуктивності треба прагнути до досягнення однакового найвищого ексергетичного ККД та однакового розподілення втрат ексергії в елементах холодильних машин split-кондиціонерів. А це можна досягнути, наприклад, приведенням до однакового внутрішнього температурного режиму холодильних машин split-кондиціонерів різної холодопродуктивності, як показано у нашій роботі [4].

1. Соколов Е. Я. Энергетические основы трансформации тепла и процессов охлаждения / 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. Бродянский В. М. Эксергетический метод термодинамического анализа / В. М. Бродянский. – М.: Энергия, 1973. – 296 с. 4. Лабай В. Й. Приведення роботи холодильних машин split-кондиціонерів до однакового внутрішнього температурного режиму / В. Й. Лабай, Й. С. Мисак // Науково-технічний журнал “Холодильна техніка і технологія”. – Одеса: ОДАХ, 2010. – № 4 (126). – С. 19–22. 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. 6. Лабай В. Й. Ексергетична ефективність заміни холодильного агента R410A на R32 у split-кондиціонері / В. Й. Лабай, О. М. Довбуш, В. Ю. Ярослав, О. В. Омельчук // Науково-технічний журнал “Холодильна техніка і технологія”, Т. 53, вип. 6. – Одеса: ОНАХТ, 2017. – С. 6–10. 7. Jakobsen A., Rassmussen B.-D., Skovrup M.-J., Andersen S.-E. CoolPack – a collection of simulation tools for refrigeration – Tutorial – Version 1.46. – Department of Energy Engineering Technical University of Denmark, 2001. 8. Daikin Catalog Split 2017. 9. Возняк О. Т. Планування експерименту та оптимізація вирішень у вентиляційній техніці: Монографія / О. Т. Возняк. – Львів: НУ “ЛП”, 2010. – 220 с. 10. Возняк О. Т. Вплив параметрів внутрішнього мікроклімату приміщення на теплообмін людини // О. Т. Возняк. – Вісник Нац. ун-ту “Львівська політехніка” “Теорія і практика будівництва”. – 2010. – № 662. – С.84–88. 11. Voznyak O. Relationship between a Person Heat Exchange and Indoor Climate / O. Voznyak, K. Myroniuk, O. Dovbush // 36. “Selected scientific Papers” 10th Rzeszow-Lviv-Kosice Conference 2005 Supplementary Issue. Technical University of Kosice. – С. 148–152.

References

1. Sokolov E. Ya. Energeticheskie osnovy transformatsii tepla i protsessov okhlazhdeniia [Energy bases for heat transformation and cooling processes] (1981) / E. Ya. Sokolov, V. M. Brodianskii. – Moskva: Energoizdat. – 320 (in Russian). 2. Shargut Ya. Eksergiia [Exergy] (1968) / Ya. Shargut, R. Petela. – Moskva: Energiia. – 280 (in Russian). 3. Brodianskii V. M. Eksergeticheskii metod termodinamicheskogo analiza [Exergy method of thermodynamic analysis] (1973) / V. M. Brodianskii. – Moskva: Energiia. – 296 (in Russian). 4. Labai V. Yo. Pryvedennia roboty kholodylnykh mashyn split-kondytsioneriv do odnakovogo vnutrishniogo temperaturnogo rezhymu [Bringing the work of the refrigeration machines of the air split-conditioners to the same internal temperature regime] (2010) / V. Yo. Labai, Yo. S. Mysak // Naukovo-tekhnichnyi zhurnal “Kholodylna tekhnika i tekhnologiiia” – Odesa: ODAKH. – No. 4 (126). – S. 19–22 (in Ukrainian). 5. Labai V. Yo. Termodynamichni osnovy znakhodzhennia eksergetychnjgo KKD kholodylnykh mashyn split-kondytsioneriv [Thermodynamic basis for finding exergetic OIR of air split-conditioners] (2010) / V. Yo. Labai, Yo. S. Mysak // Naukovo-tekhnichnyi zhurnal “Kholodylna tekhnika i tekhnologiiia” – Odesa: ODAKH. – No. 5 (127). – S. 15–19 (in Ukrainian). 6. Labai V. Yo. Eksergetychna efektyvnist zaminy kholodylnogo agenta R410A na R32 u split-kondytsioneri [Exergetic Efficiency of the Replacement Refrigeration Agent Against R410A to R32 in the Air Split-conditioner] (2017) / V. Yo. Labai, O. M. Dovbush, V. Yu. Yaroslav, O. V. Omelchuk // Naukovo-tekhnichnyi zhurnal “Kholodylna tekhnika i tekhnologiiia”, t. 53, vyp. 6. – Odesa: ONAHT. – S. 6–10 (in Ukrainian). 7. Jakobsen A., Rassmussen B.-D., Skovrup M.-J., Andersen S.-E. CoolPack – a collection of simulation tools for refrigeration – Tutorial – Version 1.46. – Department of Energy Engineering Technical University of Denmark, 2001. 8. Daikin Catalog Split 2017 (in Russian). 9. Vozniak O. T. Planuvannia eksperymentu ta optymizatsiia vyrishen u ventyliatsiinii technitsi: Monografiia [Experiment planning and optimization of solutions in ventilation engineering] (2010) / O. T. Vozniak. – Lviv: NU “LP”. – 220 s. (in Ukrainian). 10. Vozniak O. T. Vplyv parametriv vnutrishnogo mikroklimatu prymishchennia na teploobmin liudyny [Influence of indoor microclimate parameters on human heat exchange] (2010) // O. T. Vozniak. – Visnyk NU “LP” “Teoriia i praktyka budivnytstva”. – No. 662. – S.84–88 (in Ukrainian). 11. Voznyak O. Relationship between a Person Heat Exchange and Indoor Climate / O. Voznyak, K. Myroniuk, O. Dovbush // 36. “Selected scientific Papers” 10th Rzeszow-Lviv-Kosice Conference 2005 Supplementary Issue. Technical University of Kosice. – S. 148–152.