УДК 697.94.(075)

В.Й. Лабай, *д.т.н., професор,*
Національний університет "Львівська політехніка"

ВПЛИВ РІЗНИЦЬ ТЕМПЕРАТУР ПЕРЕГРІВАННЯ У ВИПАРНИКУ І ПЕРЕОХОЛОДЖЕННЯ У КОНДЕНСАТОРІ НА ВТРАТИ ЕКСЕРГІЇ В ЕЛЕМЕНТАХ ХОЛОДИЛЬНИХ МАШИН SPLIT-КОНДИЦІОНЕРІВ

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 обгрунтувати 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 різниць температур перегрівання у випарнику і переохолодження у 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 різниць температур перегрівання у випарнику і переохолодження у конденсаторі;

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

Це і було завданням досліджень.

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

$$E_{\text{вх}} = E_{\text{вих}} + \Sigma D \text{, \%,} \tag{1}$$

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, %; ΣD – загальні втрати потоку ексергії у всіх апаратах холодильної машини кондиціонера, %.

Виходячи з цього, *ексергетичний ККД* η_e визначали так:

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

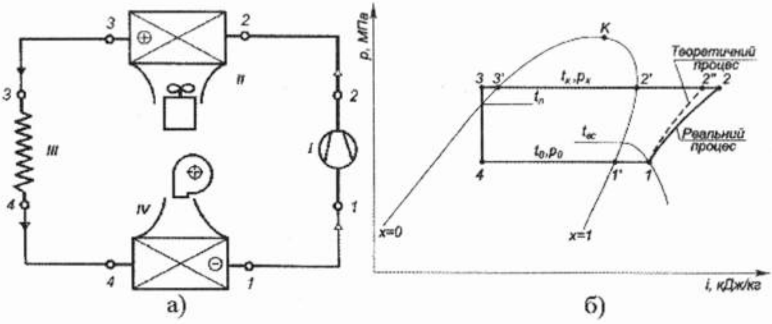


Рис. 1. Принципова схема холодильної машини (а) та побудова процесів роботи на p,i-діаграмі (б):
I – компресор; II – конденсатор; III – капілярна трубка (дросель); IV – випарник

Технічні характеристики вибраного для досліджень split-кондиціонера “Sanyo” за стандартних зовнішніх температурних умов t_{H_1}

$= +35°C$ і $t_{C_1} = +27°C$: холодопродуктивність $Q_{x}^{ст} = = 2020$ Вт, споживана потужність $N_{сп}^{ст} = 610$ Вт, кількість конденсату $W_{конд}^{ст} = 0,9$ л/год, витрати повітря на випарнику $L_{вип}^{ст} = 450$ м^3/год і конденсаторі $L_{к}^{ст} = 1360$ м^3/год кондиціонера і, відповідно, ексергетичний ККД $\eta_e = 0,249$, холодильний агент хладон-22 (R22).

Різниця температур перегрівання пари холодильного агента у випарнику (всмоктування перегрітої пари холодильного агента у компресор і киплячого холодильного агента) $\Delta t_{перегр}$ впливає на значення температури всмоктування перегрітої пари холодильного агента у компресор $t_{вс}$, а *різниця температур переохолодження рідкого холодильного агента у конденсаторі* (конденсації пари холодильного агента і переохолодження рідкого холодильного агента у конденсаторі) $\Delta t_{переох}$ впливає на значення температури переохолодження рідкого холодильного агента у конденсаторі $t_{п}$, що своєю чергою є додатковими температурами *внутрішнього температурного режиму роботи* холодильних машин split-кондиціонерів, які працюють на однокомпонентному холодильному агенті. У той самий час від цих температур внутрішнього температурного режиму роботи холодильних машин split-кондиціонерів залежить 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 різниць температур перегрівання у випарнику і переохолодження у конденсаторі, які суттєво впливають на його роботу, дослідження проводили за таких умов функціонування кондиціонера:

- різниці температур перегрівання у випарнику $5 \leq \Delta t_{перегр} \leq 15°C$ (для стандартного процесу приймали $\Delta t_{перегр} = 10°C$);
- різниці температур переохолодження у конденсаторі $3 \leq \Delta t_{переох} \leq 5°C$ (для стандартного процесу приймали $\Delta t_{переох} = 5°C$);
- стандартної температури навколишнього середовища $t_{H_1} = 35°C$ (зовнішнього повітря);
- стандартної температури внутрішнього (рециркуляційного) повітря відповідно до температури навколишнього середовища $t_{C_1} = 27°C$;
- кінцевої різниці температур у випарнику $\Delta t_{вип} = 2,8°C$;
- кінцевої різниці температур у конденсаторі $\Delta t_{к} = 4,2°C$;

– адіабатичного (індикаторного) ККД компресора $\eta_i = 0{,}8$;

– електромеханічного ККД компресора $\eta_{ем} = 0{,}9$.

– холодильного агента – хладон-22 (R22).

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

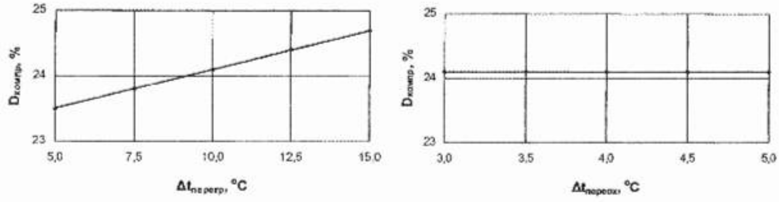
Таблиця

Результати досліджень втрат ексергії у компресорі, конденсаторі, дроселі і випарнику та ексергетичного ККД split-кондиціонера "Sanyo" стандартної холодопродуктивності 2020 Вт залежно від різниць температур перегрівання у випарнику і переохолодження у конденсаторі

$\Delta t_{перегр}$, °С	$\Delta t_{переох}$, °С	$D_{компр}$, %	$D_{к}$, %	$D_{др}$, %	$D_{вип}$, %	$e_{вх} = l$, $\frac{кДж}{кг}$	$e_{вих}$, $\frac{кДж}{кг}$	η_e
5,0	5	23,5	30,3	7,2	14,1	28,2	7,0	0,248
7,5	5	23,8	31,2	7,2	12,9	28,5	7,09	0,249
10,0	*5*	*24,1*	*32,1*	*7,1*	*11,7*	*28,8*	*7,17*	*0,249*
12,5	5	24,4	33,0	7,1	10,5	29,0	7,26	0,250
15,0	**5**	**24,7**	**33,8**	**7,0**	**9,4**	**29,3**	**7,34**	**0,251**
10	3,0	24,1	31,8	7,2	12,4	28,8	7,06	0,245
10	3,5	24,1	31,9	7,2	12,2	28,8	7,09	0,246
10	4,0	24,1	31,9	7,1	12,1	28,8	7,11	0,247
10	4,5	24,1	32,0	7,1	11,9	28,8	7,14	0,248
10	*5,0*	*24,1*	*32,1*	*7,1*	*11,7*	*28,8*	*7,17*	*0,249*

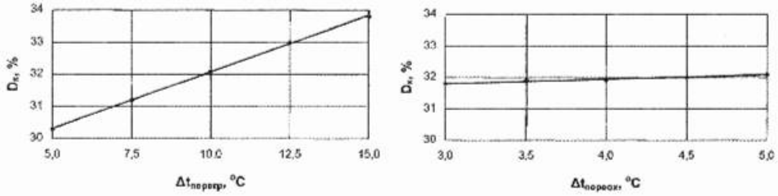
У таблиці $D_{компр}$, $D_{к}$, $D_{др}$, $D_{вип}$ – відповідно, відносні втрати ексергії у компресорі, конденсаторі, дроселі і випарнику, %; $e_{вх} = l$ – питомий потік вхідної ексергії, підведеної до електродвигуна компресора (питома робота компресора), кДж/кг; $e_{вих}$ – потік питомої вихідної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

холодопродуктивності, кДж/кг; η_e – ексергетичний ККД холодильної машини кондиціонера.



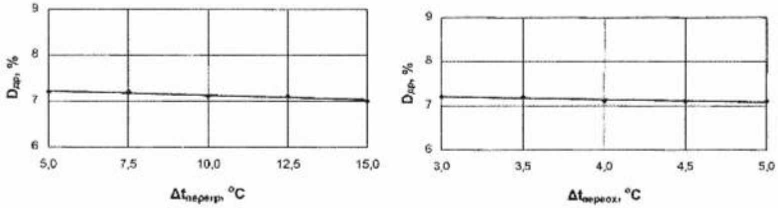
а) б)

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



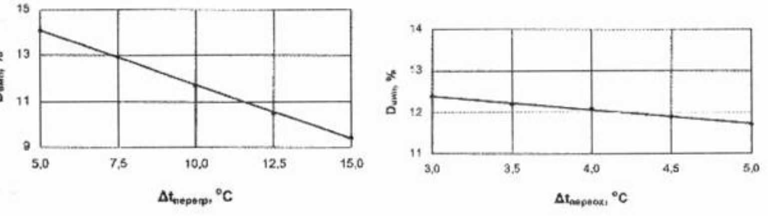
а) б)

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



а) б)

Рис. 4. Залежність втрат ексергії у дроселі $D_{\text{др}}$ split-кондиціонера „Sanyo" стандартної холодопродуктивності 2020 Вт. від різниць температур перегрівання у випарнику $\Delta t_{\text{перегр}}$ (а) і переохолодження у конденсаторі $\Delta t_{\text{переох}}$ (б)



а) *б)*

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

Залежності відносних втрат ексергії вибраного кондиціонера від різниць температур перегрівання у випарнику $5 \leq \Delta t_{\text{перегр}} \leq 15$°C та переохолодження у конденсаторі $3 \leq \Delta t_{\text{переох}} \leq 5$°C апроксимовані формулами:

– для компресора

$$D_{\text{компр}} = 22{,}9 + 0{,}12 \cdot \Delta t_{\text{перегр}}, \%; \quad (3)$$

– для конденсатора

$$D_{\text{к}} = 27{,}9 + 0{,}35 \cdot \Delta t_{\text{перегр}} + 0{,}14 \cdot \Delta t_{\text{переох}}, \%; \quad (4)$$

– для дроселя

$$D_{\text{др}} = 7{,}6 - 0{,}02 \cdot \Delta t_{\text{перегр}} - 0{,}06 \cdot \Delta t_{\text{переох}}, \%; \quad (5)$$

– для випарника

$$D_{\text{вип}} = 18{,}1 - 0{,}47 \cdot \Delta t_{\text{перегр}} - 0{,}34 \cdot \Delta t_{\text{переох}}, \%. \quad (6)$$

Максимальна похибка розрахунків за формулою (3) становить 0%, за формулою (4) – 0,4%, за формулою (5) – 1,5% і за формулою (6) – 1,0%.

Висновки.

Аналізуючи отримані дані досліджень у таблиці та на рис. 2, 3, 4 і 5, можна дійти таких висновків. Зростання різниці температур перегрівання у випарнику холодильної машини вибраного кондиціонера

$\Delta t_{перегр}$ від 5 до 15°C, тобто в 3 рази, призводить до незначного зростання відносних втрат ексергії у компресорі $D_{компр}$ від 23,5 до 24,7%, тобто в 1,051 рази, у конденсаторі до зростання $D_{к}$ – від 30,3 до 33,8%, тобто в 1,116 рази, у дроселі до незначного зменшення $D_{др}$ – від 7,2 до 7,0%, тобто в 1,029 рази, і у випарнику до значного зменшення $D_{вип}$ – від 14,1 до 9,4%, тобто в 1,50 рази, за незначного зростання ексергетичного ККД η_e від 0,248 до 0,251, тобто в 1,012 рази або на 1,2%, а зростання різниці температур переохолодження у конденсаторі холодильної машини вибраного кондиціонера $\Delta t_{переох}$ від 3 до 5°C, тобто в 1,67 рази, – до сталого значення відносних втрат ексергії у компресорі $D_{компр}$ = 24,1%, у конденсаторі до незначного зростання $D_{к}$ – від 31,8 до 32,1%, тобто в 1,0094 рази, у дроселі до незначного зменшення $D_{др}$ – від 7,2 до 7,1%, тобто в 1,014 рази, і до незначного зменшення у випарнику $D_{вип}$ від 12,4 до 11,7%, тобто в 1,060 рази, за незначного зростання ексергетичного ККД η_e від 0,245 до 0,249, тобто в 1,016 рази або на 1,6%. Варто зауважити, що відносні втрати ексергії у компресорі $D_{компр}$ не залежать від різниці температур переохолодження у конденсаторі холодильної машини вибраного кондиціонера $\Delta t_{переох}$ (рис. 2, *б* та формула (3)). Отже, найкраще застосовувати найвищі різниці температур перегрівання та переохолодження, тобто у випарнику 15°C, а у конденсаторі 5°C. Застосування запропонованої різниці температур перегрівання у випарнику 15°C замість стандартної 10°C, призведе до зростання ексергетичного ККД η_e від 0,249 до 0,251, тобто на 0,8%, що є достатньо незначним.

Отже, ексергетичний аналіз роботи холодильної машини split-кондиціонера за стандартних зовнішніх температурних умов і різних різниць температур перегрівання у випарнику і переохолодження у конденсаторі кондиціонера показав, що вищі значення ексергетичного ККД в неї є за найвищих різниць температур перегрівання у випарнику і переохолодження у 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 перегрівання у випарнику $\Delta t_{перегр}$ = 15°C та переохолодження у конденсаторі – $\Delta t_{переох}$ = 5°C та, відповідно, за незначно нарощеної відносної втрати ексергії у компресорі $D_{компр}$ = 24,7%, незначно нарощеної – у конденсаторі $D_{к}$ = 33,8%, незначно зменшеної – у дроселі

$D_{\text{др}}$ = 7,0% і незначно зменшеної – у випарнику $D_{\text{вип}}$ = 9,4% для холодильної машини вибраного split-кондиціонера "Sanyo". Вочевидь, що завдяки цьому ексергетичний ККД зросте на 0,8%, що є суттєвим, але незначним.

Список літератури:

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. Верхивкер, 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.

Надійшла до редакції 12.10.2012р.