

УДК 697.94.(075)

**Лабай Володимир Йосифович**

*Доктор технічних наук, професор,*

*Національний університет «Львівська політехніка», Львів*

**Гарасим Дмитро Ігорович**

*Аспірант,*

*Національний університет «Львівська політехніка», Львів*

**Генсецький Микола Петрович**

*Кандидат технічних наук, доцент,*

*Інститут інноваційної освіти*

*Київського національного університету будівництва і архітектури, Київ*

## ДОСЛІДЖЕННЯ ЕНЕРГОЗБЕРЕЖЕННЯ В СИСТЕМІ КОНДИЦІОНУВАННЯ ПОВІТРЯ ЧИСТОГО ПРИМІЩЕННЯ ЗА ЕКСЕРГОЕФЕКТИВНІСТЮ

***Анотація** У статті наведений аналіз ексергоефективності центральної прямотечійної системи кондиціювання повітря (СКП) чистого приміщення, отриманий на її інноваційній математичній дослідницькій моделі залежно від різних факторів, що впливають на її роботу, та запропоновані шляхи енергозбереження для цієї СКП. Встановлено, що найбільший вплив на ексергетичний ККД вибраної системи кондиціювання мають різниця температур між внутрішнім і припливним повітрям у приміщенні, температура внутрішнього повітря, залежна від температури зовнішнього повітря, та коефіцієнт трансформації  $EER$  прийнятої холодильної машини СКП.*

***Ключові слова:** системи кондиціювання повітря; чисті приміщення; ексергетичний баланс; ексергетична ефективність; енергозбереження*

### Вступ

В останні десятиріччя за кордоном з метою заощадження енергетичних ресурсів ведуться фундаментальні дослідження діяльності ряду галузей, виробництв і технологій із позицій ексергетичної методології [2-5]. Ця методологія була обґрунтована у роботах Р.К. Клаузіуса, Дж.В. Гіббса, Ж. Гюї, А. Стодоли, Я. Шаргута та Р. Петели. Величина, що визначає придатність до дії (працездатність) ресурсів речовини та енергії, була названа ексергією, а функції, що визначають її значення, – ексергетичними.

Ексергія не тільки кількісно характеризує енергію будь-якого виду, а й дозволяє оцінити її якісний стан. Вона визначає перетворюваність, придатність енергії для технічного використання в будь-яких заданих умовах.

Оскільки ексергія є єдиною мірою працездатності, придатності енергетичних ресурсів, її застосування дає змогу дати об'єктивну оцінку цих ресурсів будь-якого виду. Отже, ексергія є деякою універсальною мірою енергетичних ресурсів. А ексергетичний баланс, на підставі якого встановлюється масштаб використання

енергетичних ресурсів, вказує на можливість підвищення коефіцієнта корисної дії (ККД) процесу.

Нині вартісні оцінки не можуть служити єдиною мірою ефективності енергетичного обладнання, які переробляють енергоресурси. Ексергія є фізичним, а не економічним критерієм і визначає незалежність цього параметра від кон'юнктурних коливань цін. В той самий час вартісні показники не дозволяють здійснити довгострокове прогнозування. Визначати мінімум необхідно не за грошовими витратами, а витратами ексергії на одиницю виданої теплоти.

У сучасних технологіях, пов'язаних з перетворенням енергії, а саме у системах кондиціювання повітря, важливе місце займають обладнання і процеси, об'єктивна оцінка ступеня енергетичної досконалості яких може бути встановлена тільки на основі аналізу їх ексергоефективності.

Отже, зменшення затрат енергії, споживаної системами кондиціювання повітря, диктує необхідність їх оптимізації, що найповніше може бути досягнуто на основі ексергетичного аналізу, який враховує не тільки кількість, але й якість затраченої енергії [2-5].

## Описання об'єкту аналізу та його роботи

Для чистого приміщення нами застосовано центральну прямотечійну СКП, схематично зображену на рис. 1. У теплий період року (ТПР) повітря з навколишнього середовища через повітрязабірну шахту 6 забирається центральним кондиціонером, очищається у фільтрі зовнішнього повітря 7, далі проходить через повітрянагрівник I підігрівання 8, охолоджується та осушується за політропою розбризкуваною холодною водою з холодильної машини у камері зрошення 9, підігрівається у повітрянагрівнику II підігрівання 10 гарячою водою з котельної установки, а відтак вентиляторним агрегатом 12 подається у чисте приміщення через фільтр припливного повітря 11 у центральному кондиціонері, припливні повітропроводи 5 та фільтри припливного повітря 4 на вході у приміщення.

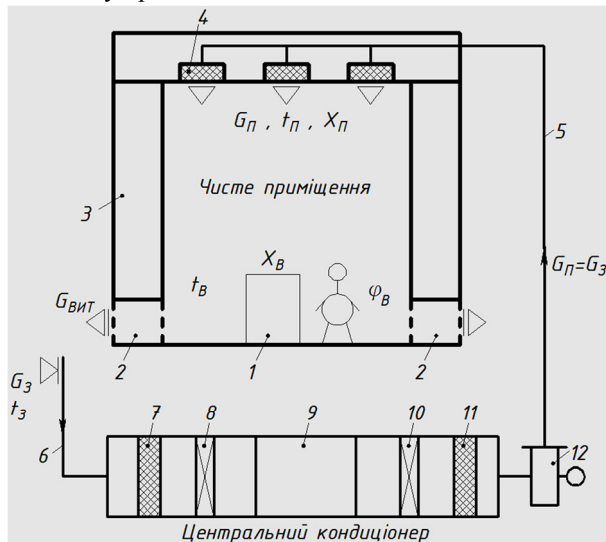


Рисунок 1 – Принципова схема центральної прямотечійної системи кондиціонування повітря чистого приміщення:

- 1 – технологічне обладнання, 2 – витяжні канали, 3 – шлюзові приміщення, 4 – фільтри припливного повітря у приміщення, 5 – припливний повітропровід, 6 – повітрязабірна шахта, 7 – фільтр зовнішнього повітря, 8 – повітрянагрівник I підігрівання, 9 – камера зрошення, 10 – повітрянагрівник II підігрівання, 11 – фільтр припливного повітря у кондиціонері, 12 – вентиляторний агрегат

Завданням даної роботи було провести дослідження ексергоефективності вибраної прямотечійної системи кондиціонування повітря чистого приміщення, отриманий на її інноваційній математичній дослідницькій моделі [5] залежно від різних факторів, що впливають на її роботу, та запропонувати шляхи енергозбереження для цієї СКП. В цій моделі складались матеріальний,

тепловий (енергетичний) та ексергетичний баланси даної системи, які враховували всі можливі варіанти її роботи в реальних умовах.

Для оцінки ексергоефективності вказаної СКП користувались поняттям ексергетичного ККД, який визначався як відношення приросту ексергії повітря у кондиціонованому приміщенні  $E_{\text{адо}}$  до ексергії приводу СКП  $E_{\text{адо}}$ , яка витрачалась на підтримання процесу [5]:

$$\eta_e = \frac{E_{\text{вих}}}{E_{\text{вх}}} \quad (1)$$

## Результати дослідницької роботи

Завдяки розрахунково-кількісним експериментам, проведеним на інноваційній математичній дослідницькій моделі вказаної центральної прямотечійної системи кондиціонування повітря чистого приміщення, отримані значення ексергетичного ККД  $\eta_a$  залежно від різниці температур між внутрішнім і припливним повітрям  $\Delta t_i$ , температури  $t_a$  внутрішнього повітря і коефіцієнта трансформації  $EER$  холодильної машини, та подані у вигляді відповідних залежностей ексергетичного ККД  $\eta_a$  (рис. 2, 3) і на цій основі зроблений аналіз. Разом з тим нами було встановлено незначний вплив на ексергетичний ККД  $\eta_a$  відносних вологостей зовнішнього  $\phi_c$ , внутрішнього  $\phi_a$  і припливного  $\phi_i$  повітря (максимально у межах 10%).

Результати дослідницької роботи кінцево було вирішено подати у вигляді такої узагальненої степеневі залежності:

$$\eta_a = \tilde{N} \cdot (\Delta t_i / t_a)^\alpha \cdot EER^\beta \quad (2)$$

Показники степеня  $\alpha$  і  $\beta$  у рівнянні (2) отримані з результатів досліджень, поданих нами на рис. 2 і 3.

Тоді залежність ексергетичного ККД  $\eta_a$  центральної прямотечійної системи кондиціонування повітря чистого приміщення від відношення різниці температур між внутрішнім і припливним повітрям до температури внутрішнього повітря  $\Delta t_i / t_a$  можна подати такою степеневою залежністю:

$$\eta_e = 52,6 \cdot (\Delta t_i / t_a)^{1,94} \quad (3)$$

Максимальна похибка розрахунків за формулою (3) становить 3,9%.

Отже, на основі залежності (рис. 2, формула (3)) знайдено значення показника степеня  $\alpha$ , який для нашого випадку становить 1,94.

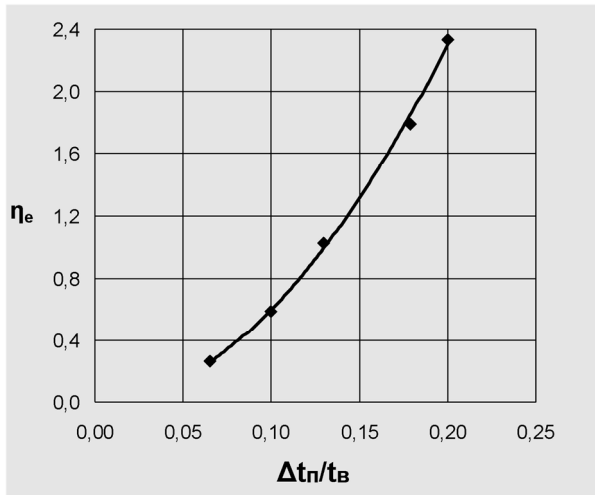


Рисунок 2 – Залежність ексергетичного ККД  $\eta_a$  центральної прямотечійної системи кондиціонування повітря чистого приміщення від відношення різниці температур між внутрішнім і припливним повітрям  $\Delta t_i$  до температури  $t_a$  внутрішнього повітря  $\Delta t_i / t_a$  і умов проведення досліджень:  
 $G_i = 10000$  кг/год;  $\Delta t_i = 1,5-6,0^\circ\text{C}$ ;  $t_a = 23-30^\circ\text{C}$ ;  
 $EER = 2,8$ ;  $t_c = 26-42^\circ\text{C}$ ;  
 $\varphi_a = 50\%$ ;  $\varphi_c = 27-44\%$ ;  $\varphi_i = 69-54\%$

Отже, на основі залежності (рис. 2, формула (3)) знайдено значення показника степеня  $\alpha$ , який для нашого випадку становить 1,94.

Аналізуючи отримані дані досліджень на рис. 2, можна дійти таких висновків. Загальне зростання відношення різниці температур між внутрішнім і припливним повітрям до температури внутрішнього повітря  $\Delta t_i / t_a$  від 0,07 до 0,20, тобто в 2,86 рази, призводить до значного зростання значення ексергетичного ККД  $\eta_a$  від 0,26 до 2,33, тобто в 8,96 рази або на 796%. Варто також зауважити (рис. 2), що найбільше зростання ексергетичного ККД відбувається за різниці температур між внутрішнім і припливним повітрям  $\Delta t_i = 6,0^\circ\text{C}$ . Тому з метою енергозбереження вибрану систему кондиціонування повітря потрібно використовувати за вищої різниці температур між внутрішнім і припливним повітрям, а саме, наприклад  $\Delta t_i = 6,0^\circ\text{C}$  (за будь-якої температури внутрішнього повітря), що дасть можливість отримати найвищий ексергетичний ККД  $\eta_a$ , а значить отримати енергоощадний варіант використання цієї системи кондиціонування повітря.

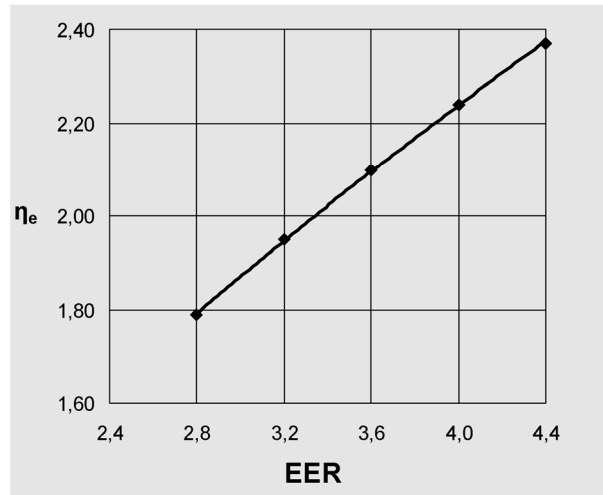


Рисунок 3 – Залежність ексергетичного ККД  $\eta_a$  центральної прямотечійної системи кондиціонування повітря чистого приміщення від коефіцієнта трансформації  $EER$  холодильної машини і умов проведення досліджень:  
 $G_i = 10000$  кг/год;  $\Delta t_i = 5,0^\circ\text{C}$ ;  $t_a = 28^\circ\text{C}$ ;  
 $\Delta t_i / t_a = 0,18$ ;  $t_c = 38^\circ\text{C}$ ;  
 $\varphi_a = 50\%$ ;  $\varphi_c = 30\%$ ;  $\varphi_i = 66\%$

Тоді залежність ексергетичного ККД  $\eta_a$  центральної прямотечійної системи кондиціонування повітря чистого приміщення від коефіцієнта трансформації  $EER$  холодильної машини можна подати такою степеневою залежністю:

$$\eta_e = 0,945 \cdot EER^{0,62} \quad (4)$$

Максимальна похибка розрахунків за формулою (4) становить 0,4%.

Отже, на основі залежності (рис. 3, формула (4)) знайдено значення показника степеня  $\beta$ , який для нашого випадку становить 0,62.

Аналізуючи отримані дані досліджень на рис. 3, можна дійти таких висновків. Загальне зростання відношення коефіцієнта трансформації  $EER$  холодильної машини від 2,8 до 4,4, тобто в 1,57 рази, призводить до зростання значення ексергетичного ККД  $\eta_a$  від 1,79 до 2,37, тобто в 1,32 рази або на 32%. Варто також зауважити (рис. 3), що найбільше зростання ексергетичного ККД відбувається за коефіцієнта трансформації холодильної машини  $EER = 4,4$ . Тому з метою енергозбереження вибрану систему кондиціонування повітря бажано використовувати за вищою коефіцієнта трансформації холодильної машини, а саме, наприклад  $EER = 4,4$ , що дасть можливість отримати вищий ексергетичний ККД  $\eta_a$ , а значить отримати енергоощадний варіант використання цієї системи кондиціонування повітря.

Остаточно визначаємо, що коефіцієнт  $C = 27,1$ , та отримуємо узагальнену степеневу залежність для вибраної центральної прямотечійної системи кондиціонування повітря чистого приміщення:

$$\eta_e = 27,1 \cdot (\Delta t_{\text{п}} / t_{\text{в}})^{1,94} \cdot EER^{0,62}. \quad (5)$$

Максимальна похибка розрахунків за формулою (5) становить 4,4%.

### Висновки

Отримано узагальнену степеневу залежність ексергетичного ККД  $\eta_a$  центральної прямотечійної системи кондиціонування повітря чистого приміщення від відношення різниці температур між внутрішнім і припливним повітрям до температури

внутрішнього повітря  $\Delta t_i / t_a$  та коефіцієнта трансформації  $EER$  холодильної машини. Показано, що з метою енергозбереження вибрану систему кондиціонування повітря бажано використовувати за вищої різниці температур між внутрішнім і припливним повітрям, а саме, наприклад  $\Delta t_i = 6,0^\circ\text{C}$  (за будь-якої температури внутрішнього повітря), та за вищого коефіцієнта трансформації холодильної машини, а саме, наприклад  $EER = 4,4$ , що дасть можливість отримати найвищий ексергетичний ККД  $\eta_a$ , а значить отримати енергоощадний варіант використання цієї системи кондиціонування повітря.

### Література

1. Федотов А.Е. Чистые помещения. Второе изд., перераб. и доп. – М.: АСИНКОМ, 2003. – 576 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. Бродянский В.М. Эксергетический метод термодинамического анализа / В.М. Бродянский. – М.: Энергия, 1973. – 296 с.
5. Лабай В.Й. Влияние коэффициента трансформации холодильной машины на эксергетичный ККД системы кондиционирования воздуха чистого помещения / В.Й. Лабай, Д.І. Гарасим // Научно-технический журнал «Холодильная техника и технология», т. 51, вып. 2. – Одеса: ОНАХТ, 2015. – С. 18–24.

Стаття надійшла в редколегію 06.04.17

#### Лабай Владимир Иосифович

Доктор технических наук, профессор,

Национальный университет «Львовская политехника», Львов

#### Гарасим Дмитрий Игоревич

Аспирант,

Национальный университет «Львовская политехника», Львов

#### Генсецкий Николай Петрович

Кандидат технических наук, доцент,

Институт инновационного образования

Киевского национального университета строительства и архитектуры, Киев

### ИССЛЕДОВАНИЕ ЭНЕРГОСБЕРЕЖЕНИЯ В СИСТЕМЕ КОНДИЦИОНИРОВАНИЯ ВОЗДУХА ЧИСТОГО ПОМЕЩЕНИЯ ПО ЭКСЕРГООЭФФЕКТИВНОСТИ

**Аннотация.** В статье приведенный анализ эксергоэффективности центральной прямоточной системы кондиционирования воздуха (СКВ) чистого помещения, полученный на ее инновационной математической исследовательской модели в зависимости от разных факторов, какие влияют на ее работу, и предложены пути энергосбережения для этой СКВ. Определено, что наибольшее влияние на эксергетический КПД избранной системы кондиционирования имеют разность температур между внутренним и приточным воздухом, температура внутреннего воздуха, зависящая от температуры наружного воздуха, и коэффициент трансформации  $EER$  принятой холодильной машины СКВ.

**Ключевые слова:** системы кондиционирования воздуха; чистые помещения; эксергетический баланс; эксергетическая эффективность; энергосбережение

**Labay Volodymyr**

*Doctor of Engineering Sciences, Professor  
National University "L'viv Polytechnic", L'viv*

**Harasym Dmytro**

*Postgraduate  
National University "L'viv Polytechnic", L'viv*

**Hensetskyi Mykola**

*Candidate of Engineering Sciences, Docent  
Institute of Innovation Education  
Kyiv National University of Construction and Architecture (KNUCA), Kiev*

**INVESTIGATIONS OF ENERGY SAVING IN AIR CONDITIONING SYSTEM  
OF CLEANROOM FOR EXERGY EFFECTIVENESS**

**Abstract.** *Analysis of exergy effectiveness of central straight flow air conditioning system (ACS) for cleanroom which was obtained on its innovative mathematical research model depending on different factors that have influence on its work was presented in this article, and ways of energy saving for this ACS was proposed. It was found that the biggest impact on exergy output-input ratio of its air conditioning system have the temperature difference between inside and supplied air in a room, temperature of inside air which is depends on temperature of outside air, and coefficient of transformation EER of chosen refrigeration machine of air conditioning system.*

**Keywords:** *air conditioning systems, cleanrooms, exergy balance, exergy effectiveness, energy saving*