

---

---

## ВЕНТИЛЯЦІЯ ТА КОНДИЦІОНУВАННЯ ПОВІТРЯ

---

---

УДК 697.94

### Ексергетичні критерії при оцінці енергоощадності систем кондиціонування повітря будівель і споруд

О.В. Задоянний

к.т.н., доцент, Київський національний університет будівництва і архітектури, alvasil21@gmail.com

*Показано можливості оцінки енергоощадності системами кондиціонування повітря будівель і споруд за ексергетичними критеріями. Проаналізовано різні підходи в оцінці показників ексергетичної ефективності систем кондиціонування повітря, запропоновано оцінювати енергоощадність систем кондиціонування повітря за допомогою ексергетичних коефіцієнтів корисної дії «брутто» та «нетто». Пропонується враховувати корисний ефект від роботи систем кондиціонування повітря як різницю значень повної ексергії повітря в приміщенні, а витрачену ексергію – як сумарні витрати повної ексергії в системі. Ступінь енергоощадності систем пропонується визначати через відношення витраченої ексергії повітрям в обладнанні до підведеної ексергії з зовнішніх джерел, а відносну енергоощадність-через відношення втрат ексергії до її витрат і розрізняти відносні втрати на «нетто» та «брутто».*

*Ключові слова: ексергетична ефективність систем кондиціонування повітря; ексергетичний коефіцієнт корисної дії.*

**Постановка проблеми.** Надмірне споживання енергії системами кондиціонування повітря (СКП) будівель і споруд різного призначення в комплексі з іншими споживачами комунального та інших секторів народного господарства України призвело до негативних наслідків в економіці країни. Зменшення енергоспоживання вказаними системами призведе до значного скорочення витрат теплової та електричної енергії.

**Актуальність дослідження.** Визначення ступеню енергоощадності СКП є актуальним завданням, яке дає можливість оптимізації СКП за показниками енергоспоживання на всіх стадіях життєвого циклу обладнання від розробки конструкцій систем, при їх проектуванні та експлуатації. При виборі схемних рішень СКП та їх порівнянні між собою за ексергетичними критеріями з'являються можливості коректної чисельної оцінки різних за принципом дії окремих функціональних вузлів та агрегатів. Відкриваються також можливості модернізації та розробки нових енергоощадних схемних рішень СКП відповідно до конкретних внутрішніх та зовнішніх параметрів повітря.

На часі є оптимізація роботи систем не тільки за ексергетичними, а також і за ексергоекономічними критеріями при виборі, наприклад, варіантів енергопостачання систем.

**Вступ.** Ексергетичний аналіз СКП широко застосовується при оцінці їх термодинамічної ефективності [1,2]. Для чисельної ексергетичної оцінки використовують безрозмірний показник - ексергетичний коефіцієнт корисної дії (ЕККД), який повною мірою характеризує термодинамічну ефективність системи. Однак ЕККД не завжди достатньо повно оцінює енергоощадність СКП, яка є достатньо вагомим фактором при оцінці енергоспоживання систем. Оцінка за показником ЕККД без урахування ступеню енергоощадності СКП не дає вичерпну повноту аналізу, при цьому не завжди коректно формулюються кінцеві висновки [3]. Крім того при ексергетичному аналізі не завжди достатньо обґрунтовано вибирають структуру СКП, що так само негативно впливає як на оцінку ефективності так і на можливість порівняння з іншими СКП в цілому та з аналогічними за функціональним призначенням компонентами в системах [1], [3]. Вказане не дозволяє в повній мірі використовувати широкі можливості ексергетичного аналізу і обмежує його розвиток на шляху удосконалення в напрямку економічної складової аналізу – ексергоекономіки.

Оцінка СКП за безрозмірним показником ЕККД дає коректну чисельну інформацію щодо ефективності системи в цілому і в класичному вигляді його визначають як [1]

$$\eta_E = \frac{E_{кор}}{E_{витр}} \quad (1)$$

де  $E_{кор}$  та  $E_{витр}$  – відповідно корисний ефект та витрати в одиницях ексергії.

При визначенні корисного ефекту від роботи СКП  $E_{кор}$  різні автори користуються різними показниками. В роботі [1], наприклад, за корисний ефект приймають значення ексергії повітря на вході його в приміщення, що обслуговується, або на виході з кондиціонера. Там же пропонується приймати цю величину як ексергію потоку повітря на виході з системи. Це не зовсім коректно тому, що ексергія повітря на вході в приміщення, що обслуговується, не дає повної оцінки корисного ефекту від роботи СКП тому і не характеризує асиміляцію шкідливостей в приміщенні, яка і є корисним ефектом від роботи СКП згідно з її призначенням. Асиміляція шкідливостей характеризується різницею термодинамічних потенціалів повітря в приміщенні від припливного до видаляемого, а не тільки припливного.

В цій же роботі автори неоднозначно трактують визначення ЕККД і самокритично застерігають визначати його як відношення двох ексергетичних потоків – на виході та на вході з системи. Крім того в понятті система міститься обладнання центральної СКП, яке слугує тільки для підготовки повітря перед подачею його в приміщення і не враховується обладнання системи після приміщення, яке суттєво додає в загальне енергоспоживання. В результатах визначення ЕККД автори при порівнянні трьох різних за схемними рішеннями СКП отримують певні корисні результати, але з суттєвими розбіжностями

значень ЕККД і лише за умов однакових параметрів припливного повітря. Перелічені недоліки обмежують можливості ексергетичного аналізу СКП і не дають однозначної оцінки ексергетичної ефективності системи.

В роботах [4, 5] при визначенні ЕККД СКП автори так само формулюють корисний ефект від її роботи по різному - як кількість ексергії, що відводиться від повітря, яке обробляється в кондиціонері, або як потік ексергії, що виходить з кондиціонера. Таке подання корисного ефекту не враховує так само як і в вищенаведеній роботі ексергетичну оцінку комфортних умов в приміщеннях.

В роботі [6] на прикладі транспортного кондиціонера автори формулюють корисний ефект від його роботи, як кількість ексергії, що відводиться від повітря, яке обробляється в кондиціонері, тобто так само без урахування корисного ефекту від асиміляції шкідливостей.

В роботі [4] автори розраховують значення ексергетичного ККД спліт-систем кондиціонера Sanyo, користуючись розробленою ними поліноміальною залежністю, не розкриваючи суті поняття корисний ефект.

В роботі [7] дається порівняльний аналіз трьох різних схемних рішень СКП на співставленні ЕККД, який розраховують відносно обладнання СКП без урахування корисного ефекту від створення комфортних умов в приміщенні, що обслуговується, а тільки враховують залишкову ексергію повітря, що надходить в приміщення, яку приймають за корисну.

В останніх дослідженнях [8] автори визначають корисний ефект від роботи прямоотечійної СКП в чистому приміщенні як зменшення ексергії кондиціонованого повітря і визначають ЕККД за залежністю (1). Витрачену ексергію подано як суму витрат ексергії, що підводиться із зовнішніх джерел: електричну та теплову. Такий підхід до визначення ЕККД в СКП нам вбачається найбільш коректним з оглянутих, але він має певні обмеження.

Для більш коректної оцінки ЕККД СКП потрібне чітке виділення структури СКП з відповідними елементами та зв'язками між ними. Структура СКП повинна відповідати умовам, які закладено в класифікації технічних систем [1]. СКП будівель і споруд доцільно віднести до таких, які одночасно належать до першої і другої груп, тобто корисні ефекти виражені як в перетворенні речовини – потоку повітря в процесі обробки, так і в передачі цієї речовини від однієї підсистеми до іншої. Крім того в формуванні структури СКП потрібно забезпечити принцип функціональної єдності та зв'язку елементів системи. На рис.1. подано структуру СКП, побудовану за вказаними принципами. Система включає основні функціональні вузли: підготовки повітря 1,3 і споживання повітря 2 – приміщення, яке обслуговується СКП. Вузли підготовки повітря поділено на 1, який розташований перед приміщенням по ходу повітря і який слугує власно для підготовки повітря перед подачею в приміщення та 3, який відводить повітря від приміщення.

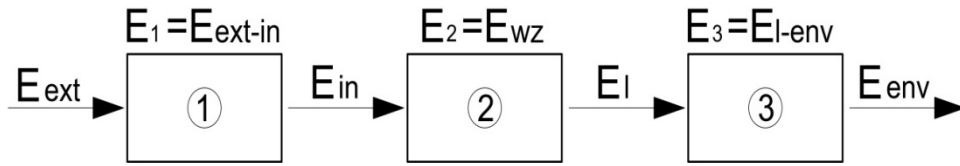


Рис.1. Структура СКП.

Відповідно до структури рівняння (1) в загальному вигляді можна записати

$$\eta_E = \frac{E_{кор}}{E_{вип}} = \frac{E_2}{E_1 + E_3} = \frac{E_{wz}}{E_{ext-in} + E_{l-env}} \quad (2)$$

де  $E_{wz}$ ,  $E_{ext-in}$  та  $E_{l-env}$  – відповідно корисна ексергія повітря та витрачена перед подачею в приміщення та після видалення з приміщення в СКП.

Корисну ексергію  $E_{wz}$  в приміщенні можна чітко визначити та підрахувати. Вона є різницею значень повної ексергії потоку вологого повітря від повітророзподільника до витяжної решітки

$$E_{wz} = \Delta E_{l-in} = E_l - E_{in} \quad (3)$$

Такої самої думки і автори роботи [8].

Витрачена ексергія в вузлі 1  $E_l$  являє собою суму витрат ексергії на обробку повітря в кожному елементі СКП перед подачею в приміщення. Відповідно до ексергетичної теорії [2], враховуючи втрати від незворотності процесів в елементах СКП, можна записати

$$E_l = E_{ext-in} = E^T_{ext-in} - E^D_{ext-in} \quad (4)$$

де  $E^T_{ext-in}$  – підведена до вузла 1 ексергія від зовнішніх джерел,  $E^D_{ext-in}$  - втрати ексергії в вузлі 1.

Так само через підведену ексергію та втрати можна визначити витрачену ексергію в вузлі 3

$$E_3 = E_{l-env} = E^T_{l-env} - E^D_{l-env} \quad (5)$$

де  $E^T_{l-env}$  – підведена до вузла 3 ексергія від зовнішніх джерел,  $E^D_{l-env}$  - втрати ексергії в вузлі 3.

Враховуючи наведені залежності (3),(4),(5), формулу (2) можна переписати

$$\eta_E^{net} = \frac{\Delta E_{l-in}}{(E^T_{ext-in} - E^D_{ext-in}) + (E^T_{l-env} - E^D_{l-env})} \quad (6)$$

Отримана залежність (6) цілком коректна для визначення ЕККД СКП, включає корисну ексергію, що в чисельнику та використану, що в знаменнику. Нею можна користуватись для аналізу ексергетичної ефективності процесів обробки повітря, але без урахування втрат підведеної ексергії. Витрати ексергії будуть відображати тільки внутрішні термодинамічні перетворення повітря в СКП, тобто зміну стану ексергії «нетто». Втрати ексергії  $E^D$  в даному випадку враховуються в цілому без поділення на «зовнішні» та «внутрішні».

Ексергетична ефективність СКП з урахуванням тільки підведеної ексергії від зовнішніх джерел в поточних позначеннях буде мати вигляд

$$\eta_E^{brt} = \frac{\Delta E_{wz}}{E_{ext-in}^T + E_{l-env}^T} \quad (7)$$

і буде характеризувати ЕККД СКП «брутто», тобто без урахування втрат в системі підведеної зовні ексєргії.

Ступінь енергоощадності СКП в цілому доцільно визначати через відношення витраченої ексєргії повітрям в обладнанні СКП до підведеної ексєргії з зовнішніх джерел

$$\eta_{es} = \frac{E_{ext-in} + E_{l-env}}{E_{ext-in}^T + E_{l-env}^T} \quad (8)$$

В ідеальному випадку, коли втрат підведеної ексєргії в обладнанні СКП не буде, ступінь енергоощадності буде дорівнювати одиниці  $\eta_{es}=1$ , а в усіх інших реальних випадках  $\eta_{es} < 1$ .

Абсолютне значення втрат повної ексєргії в СКП можна визначити із залежності

$$E^D = (E_{ext-in}^T + E_{l-env}^T) - (E_{ext-in} + E_{l-env}) = (E_{ext-in}^T - E_{ext-in}) + (E_{l-env}^T - E_{l-env}) \quad (9)$$

Оцінити енергоощадність СКП можна також відносною втратою ексєргії «нетто», яка дорівнює відношенню втрат повної ексєргії повітря до її витрат в системі

$$\Delta D^{net} = \frac{E^D}{E_{ext-in} + E_{l-env}} \quad (10)$$

і відносну втрату ексєргії «брутто», де втрати віднесено до підведеної до системи ексєргії

$$\Delta D^{brt} = \frac{E^D}{E_{ext-in}^T + E_{l-env}^T} \quad (11)$$

Втрати ексєргії в СКП, як відомо, поділяються на «внутрішні» та «зовнішні» [1,2]

$$E^D = E_{in}^D + E_{ext}^D \quad (12)$$

Для їх чисельної оцінки та аналізу можна користуватись загальним підходом, який наведено в [1,2], але з корегуванням відповідно до структури СКП.

Частка «внутрішніх втрат» (відносної деструкції) характеризує відносну недосконалість процесів в СКП з точки зору енергоощадності

$$\Delta D_{in} = \frac{E_{in}^D}{E_{ext-in} + E_{l-env}} \quad (13)$$

**Висновки.** Для можливості повноцінного ексєргетичного аналізу структуру СКП варто формувати за принципом поділу функціональних вузлів на такі, що підготовлюють повітря для споживання, та на такі, що його споживають. Функціональна єдність вузлів СКП повинна базуватись на послідовності обробки повітря як робочого тіла. Корисний ефект від роботи СКП варто оцінювати по різниці значень повної ексєргії припливного та видаляемого повітря. Термодинамічну досконалість СКП доцільно оцінювати ексєргетичним коефіцієнтом корисної дії та його модифікаціями «нетто» та «брутто». Оцінкою енергоощадності СКП можуть бути ступінь

енергоощадності, відносні втрати ексергії та відносне значення деструкції ексергії повітря.

Наведені залежності ексергетичних критеріїв для СКП будівель і споруд є коректними для визначення енергоощадності систем.

### Література

1. *Бродянский В.М.*, Верховкер Г.П., Карчев Я.Я. и др. Эксергетические расчеты технических систем: Справ.пособие /: Под ред. Долинского А.А., Бродянского В.М. АН УССР. Ин-т технической теплофизики.- Киев: Наук. Думка, 1991.- 360 с. – ISBN 5-12-0011397-X;
2. *Бродянский В.М.*, Фратшер В., Михалек К. Эксергетический метод и его приложения. Под ред. В.М.Бродянского.- М.: Энергоатомиздат, 1988.-288 с.-ISBN 5-283-00152-0;
3. *Тсатсаронис, Джордж.* Взаимодействие термодинамики и экономики для минимизации стоимости энергопреобразующей системы.-Одесса: Студия «Негоциант»,2002.-с.152;
4. *Лабай В.Й.* Вибір енергоощадних умов експлуатації діючих холодильних машин split-кондиціонерів / В.Й. Лабай, Й.С. Мисак // Теорія і практика будівництва : [збірник наукових праць] / відповідальний редактор З. Я. Бліхарський. - Л. : Видавництво Національного університету "Львівська політехніка", 2011. - 271 с. : іл. - (Вісник / Національного університету "Львівська політехніка" ; № 697). - С.153-156;
5. *Вычужанин В.В.* Эксергетический метод анализа эффективности комплекса система комфортного кондиционирования воздуха//Сантехніка, опалювання, кондиціонування: мережевий журн. 2005. URL: <http://www.c-o-k.com.ua/content/view/72/> ( дата звернення 15.11.2012);
6. *Набиулин Ф.А.*, Квят И.Д.. Анализ термодинамической эффективности кондиционеров воздуха. Ежемесячный теоретический и научно-практический журнал «Холодильная техника», М.: ВО «Агропромиздат», №7, 1989 г., 63 с.;
7. *Luigi Marletta.* Air Conditioning Systems from a 2nd Law Perspective // Entropy: мережевий журн. 2010. URL: [http:// www.mdpi.com/journal/entropy](http://www.mdpi.com/journal/entropy). p=860 ( дата звернення 12.12.2011);
8. *Лабай В.Й.*, Гарасим Д.І. Стан і перспективи підвищення енергоефективності систем кондиціонування повітря чистих приміщень. Науково-технічний збірник «Енергоефективність в будівництві та архітектурі». Випуск 6. Відповідальний редактор П.М.Куліков.- КНУБА, 2014 р.-364 с.

## Эксергетические критерии при оценке энергосбережения систем кондиционирования воздуха зданий и сооружений

А.В. Задоянный

*Показаны возможности оценки энергосбережения системами кондиционирования воздуха зданий и сооружений с использованием эксергетических критериев. Проанализированы различные подходы в оценке показателей эксергетической эффективности систем кондиционирования воздуха, предложено оценивать энергоэффективность систем кондиционирования воздуха с помощью эксергетических коэффициентов полезного*

действия «брутто» и «нетто». Предложено учитывать полезный эффект от работы систем кондиционирования воздуха как разность значений полной эксергии воздуха в помещении, а затраченную эксергию – как суммарные затраты полной эксергии в системе. Степень энергосбережения систем предлагается определять как отношение затраченной эксергии воздухом в оборудовании к подведенной эксергии из внешних источников, а относительное энергосбережение - как отношение потерь эксергии к ее расходу и различать относительные потери «нетто» и «брутто».

*Ключевые слова:* эксергетическая эффективность систем кондиционирования воздуха; эксергетический коэффициент полезного действия.

## **Exergetic criteria in assessing energy saving air-conditioning systems of buildings and structures**

O. Zadoyanny

*The possibilities of evaluation of energy saving air-conditioning systems of buildings and structures on Exergy criteria presented. Analyzed different approaches to assessing the performance of exergetic efficiency of air conditioning systems, proposed to estimate the energy efficiency of air conditioning systems using exergetic efficiencies "gross" and "net." Encouraged to consider the beneficial effect of air conditioning systems work as the difference values of the total exergy of the air, and spent exergy - as the total cost of full exergy in the system. Degree of energy saving systems is proposed to determine the ratio of exergy consumed in the air to let down Exergy equipment from external sources, and the relative efficiency - the ratio of exergy losses in its costs and differentiate the relative losses on a "net" and "gross".*

*Keywords:* exergy efficiency of air conditioning systems; exergy efficiency.

Надійшла до редакції 27.05.2014 р.