

УДК 697.94

Дослідження функції термічної складової ексергетичного потоку вологого повітря в кондиціонованому приміщенні

О. В. Задоянний¹

¹к.т.н., доц. Київський національний університет будівництва і архітектури, м. Київ, Україна, zadoiannyi.ov@knuba.edu.ua.
ORCID: 0000-0001-6781-9756

Анотація. Поглиблений ексергетичний аналіз процесів у системах кондиціонування повітря дозволяє коректно оцінити втрати та деструкцію кожної складової ексергетичного потоку вологого повітря. Дослідження поведінки функції термічної складової ексергетичного потоку доцільно проводити окремо від інших складових з метою отримання її вагомості в загальних ексергетичних втратах та характеру поведінки в межах вентилязованого приміщення. Диференціювання термічної складової ексергетичної функції по аргументу, температурі приміщення, дає величину швидкості генерації ентропії повітряного потоку, яка є характерним й коректним показником енергоощадності відповідного схемного рішення повітрообміну. Інтегрування цієї функції дає величину деструкції потоку термічної складової ексергії вентиляційного повітря. Вона показує чисельне значення деструкції в приміщенні в межах значень припливної температури та викидної, а знак вказує на напрям деструкції відносно референтної (зовнішньої розрахункової) температури. Порівняння основних вентиляційних процесів та схемних рішень розподілення повітря в приміщенні за величиною деструкції дає коректну й однозначну оцінку їх енергоощадності. Величина деструкції термічної складової потоку ексергії вентиляційного повітря є характерною для визначення ексергетичної ефективності повітрообміну.

Ключові слова: ексергетичний потік вентиляційного повітря, аналіз функція термічної складової

Вступ. Ексергетичний аналіз систем та елементів створення мікроклімату в приміщеннях дає можливість отримати коректні чисельні показники ефективності енергоспоживання на основі оцінки термодинамічної незворотності процесів нагрівання, охолодження, осушення й зволоження повітря. Вказані системи домінують у споживанні всіх видів енергії в громадських та житлових будівлях. Державні норми регламентують оцінювати ефективність їхнього енергоспоживання через коефіцієнт корисної дії [1], аналогом якого є ексергетична ефективність або ексергетичний коефіцієнт корисної дії [2].

Актуальність дослідження. Сутність проблеми, що досліджується, полягає у відсутності в Україні гармонізованого методологічного забезпечення з оцінки показників енергоощадності вказаного обладнання. На сьогодні тільки починає впроваджуватись енергетична сертифікація (паспортизація) будівель, яка за призначенням передбачає оцінку енергетичної ефективності будівлі в цілому за показником питомого річного енергоспоживання [3], що є позитивним, але не враховує ефективність споживання енергії як будинком, так і окремими його відповідними системами, їх елементами і приладами.

Традиційні системи кондиціонування повітря (СКП) мають низький ексергетичний коефіцієнт корисної дії (ЕККД) – 1 % [4] і

споживають найбільшу частку всіх видів енергії в будівлях [5]. У зазначеній роботі [4] ексергетичний аналіз проведено за класичною методологією, яка не дозволяє повною мірою оцінити й скоригувати процес в бік підвищення ефективності споживання енергії. Технології опалення, вентиляції та кондиціонування повітря є прикладними, тому їх потрібно досліджувати поглиблено з урахуванням їх притаманних особливостей [6]. Було показано, що завдяки поглибленому ексергетичному аналізу можна визначити й обрахувати деструкцію кожної складової ексергії повітря в елементах систем кондиціонування повітря і в приміщенні тощо [7]. Існує багато схемних рішень розподілу повітря в приміщеннях, кожне з яких має свої незаперечні переваги за різними показниками, крім енерговитрат, у розумінні ефективного використання енергії потоку повітря відповідно до призначення. У даній роботі зроблена спроба дослідження цього питання шляхом аналізу ексергетичної функції потоку вологого повітря при повітрообміні в приміщенні.

Останні дослідження та публікації. У роботах щодо дослідження систем кондиціонування повітря з використанням ексергетичного аналізу подано в основному показники ефективності в цілому певного схемного рішення системи без урахування окремих функціональних елементів та складових ексергії повітря [8]. У роботі [4], наприклад, розрахунки ексергети-

чної ефективності центральних систем кондиціонування повітря проведено для різних схемних рішень з використанням методології, яка притаманна енергетичним установкам і не враховує складових ексергії повітря. Було показано, що врахування всіх складових при поглибленому ексергетичному аналізі систем кондиціонування повітря дає певні переваги – дозволяє виявити й обчислити деструкції та ЕККД систем кондиціонування повітря та її елементів за кожним з них [7]. Це стосується й приміщення, що обслуговується системою, як складовою функціонального елемента системи. Повітрообмін у приміщенні – термодинамічний процес, у якому відбувається тепло- та масообмін, у результаті чого змінюються термодинамічні потенціали робочого тіла – повітря. На процес повітрообміну в приміщенні впливають багато чинників, кожен з яких для певного виду процесу може бути домінуючим. Види ексергії, які мають місце у вентильованому приміщенні, різноманітні: термічна, радіаційна, хімічна, термічна від конвекційних джерел тощо [8]. За результатами обчислення значень ексергетичних потоків у приміщенні можна зробити висновки, що при розрахунку повітрообміну з мінімальними витратами енергії потрібно враховувати кожну із складових ексергії вентиляційного потоку. Деструкція термічної складової вентиляційного повітря має місце у всіх вентиляційних процесах, що говорить про її домінуючу вагомість при аналізі. У зв'язку з цим існує невирішена задача визначення особливостей її поведінки у вентиляційному процесі.

Формулювання цілей статті. Результатом досліджень систем кондиціонування повітря методами ексергетичного аналізу є визначення перш за все відносної й абсолютної ексергетичної ефективності процесів, абсолютних і відносних значень деструкції ексергії в елементах і системі в цілому. В останніх роботах до вказаного додають такий показник як швидкість генерації ентропії певного процесу, елемента, системи тощо [9]. Цей показник відповідно до теорії мінімізації генерації ентропії Адріана Бежана [10] є суттєвим, і його потрібно розглядати разом із вищезазначеними. метою даної роботи є дослідження термічної складової ексергії вентиляційного повітря в приміщенні з визначенням й аналізом вказаних показників. Результати досліджень наведено для основних вентиляційних процесів для тепло- й холодного розрахункових періодів року.

Основна частина. Вентиляційне повітря в приміщенні змінює свій термодинамічний по-

тенціал відповідно до процесів, основними з яких та характерними для аналізу є асиміляція тепло- й вологонадлишків у теплий та холодний розрахункові періоди та повітряне опалення. Ексергетична функція термічної складової потоку повітря має вигляд [2]

$$E_{a,h}^{int} = G_a^{int} \left[T_a^{ext} (c_{p,d,a} + d_a^{int} c_{p,w,v}) \times \left(\frac{T_a^{int}}{T_a^{ext}} - 1 - \ln \left(\frac{T_a^{int}}{T_a^{ext}} \right) \right) \right], \text{кДж/с.} \quad (1)$$

де G_a^{int} – масовий потік вентиляційного повітря, кг/с; T_a^{ext} – зовнішня розрахункова температура повітря, К; $c_{p,d,a}$ – ізобарна теплоємність сухого повітря, кДж/(кг·К); d_a^{int} – вологовміст внутрішнього повітря, кг/кг; $c_{p,w,v}$ – ізобарна теплоємність парів води, кДж/(кг·К); T_a^{int} – плинне значення температури потоку вентиляційного повітря, К.

За припущення, що $c_{p,d,a} + d_a^{int} c_{p,w,v}$ – це теплоємність вологого повітря $c_{p,a,m}^{int}$, кДж/(кг·К), і є сталою величиною в межах зміни параметрів повітря в приміщенні, диференціал функції $E_{a,h}^{int}$, кДж/с, за внутрішньою температурою T_a^{int} , К, становитиме

$$\begin{aligned} (E_{a,h}^{int})' &= \frac{\partial E_{a,h}^{int}}{\partial T_a^{int}} = \\ &= \frac{\partial \left(G_a^{int} \left[T_a^{ext} c_{p,a,m}^{int} \left(\frac{T_a^{int}}{T_a^{ext}} - 1 - \ln \left(\frac{T_a^{int}}{T_a^{ext}} \right) \right) \right] \right)}{\partial T_a^{int}} = \\ &= G_a^{int} c_{p,a,m}^{int} \left(1 - \frac{T_a^{ext}}{T_a^{int}} \right), \text{кДж/(с·К)}. \end{aligned} \quad (2)$$

де T_0 – температура навколишнього середовища, К; T_1 і T_2 – значення температур, при яких відбувається теплообмін ($T_1 > T_2$), К.

Отримана функція за розмірністю є швидкістю генерації ентропії [9], віднесена до температури потоку повітря і характеризує внутрішні втрати від незворотності вентиляційного процесу, які викликані дисипацією енергії повітряного потоку. Функція не має локальних екстремумів, змінює знак залежно від співвідношення температур T_a^{ext}/T_a^{int} . Вона дорівнює

нулю при $T_a^{ext}/T_a^{int}=1$, що в практиці кондиціонування зустрічається в обмежених випадках. При асиміляції теплоти в холодний розрахунковий період року $T_a^{ext}/T_a^{int}<1$, а в теплий $T_a^{ext}/T_a^{int}>1$. При $T_a^{ext}/T_a^{int}<1$ значення функції $(E_{a,h}^{int})'$ буде завжди додатним, а при

$$\int_{T_a^{in}}^{T_a^{\ell}} (E_{a,h}^{int})' dT_a^{int} = T_{a,h}^{int} -$$

навпаки, від'ємним. Від'ємне значення спостерігається при зменшенні ексергетичного потенціалу в процесі повітрообміну. Так, при повітрообміні в теплий розрахунковий період (рис. 1, промінь 1-2) повітря з температурою припливу $t_{in.s}$ (т. 1 процесу) змінюється до температури викидного повітря $t_{l.s}$ (т. 2 процесу). Співвідношення температур – $t_{ext.s} > t_{l.s} > t_{in.s}$.

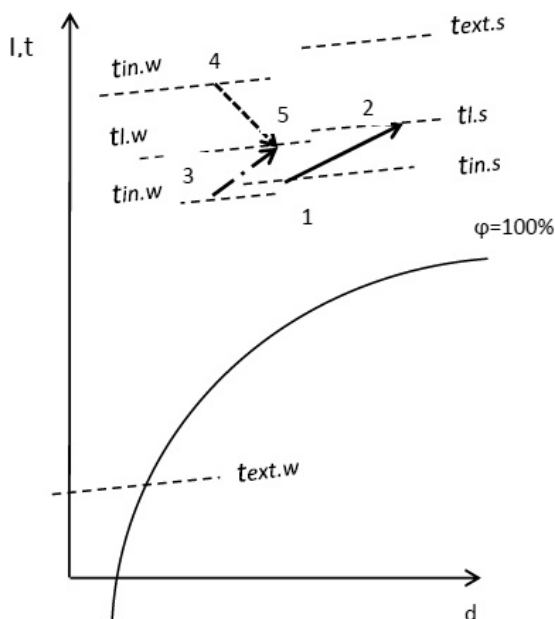


Рис. 1. I-d-діаграма із зображенням основних процесів повітрообміну в приміщенні. Індеси: in – припливне; ext – зовнішнє; l – витяжне; s – теплий період; w – холодний період; t – температура; 1-2; 3-5; 4-5 – процеси.

Термічна складова ексергії повітря зменшується і, відповідно, зменшується його ексергетичний потенціал, що обумовлює знак “мінус” деструкції ексергетичного потоку відповідного вентиляційного процесу.

У випадку повітряного опалення для холодного розрахункового періоду (промінь 4-5) при співвідношенні температур $t_{in.w} > t_{l.w} > t_{ext.w}$ ексергетичний потік спрямований в бік зовнішньої температури, що обумовлює зменшення його ексергетичного потенціалу і характеризує-

ться від'ємним значенням функції (2). Позитивне значення функції (2) спостерігається у вентиляційному процесі при асиміляції надлишків теплоти й вологи в холодний розрахунковий період (промінь 3-5). При співвідношенні температур $t_{l.w} > t_{in.w} > t_{ext.w}$ ексергетичний потенціал термічної складової збільшується, що підтверджується знаком “плюс” результату.

Інтегрування виразу (2) в межах значень температури припливного T_a^{in} та витяжного T_a^{ℓ} повітря дає залежність для кількісної оцінки деструкції термічної складової ексергетичного потоку повітря у вентиляційному процесі в приміщенні

$$\int_{T_a^{in}}^{T_a^{\ell}} (E_{a,h}^{int})' dT_a^{int} = T_{a,h}^{int} = G_a^{int} c_{p,a,m} \left(T_a^{int} - \frac{ext}{a} \ln T_a^{int} \right) \Big|_{T_a^{in}}^{T_a^{\ell}}. \quad (3)$$

За отриманою залежністю можна обраховувати приріст “+”, або втрату “-” термічної складової ексергії, тобто – деструкцію, $D_{a,h}^{int}$, яка зазвичай визначається з ексергетичного балансу [9].

Результати обчислень (табл. 1) для процесів, що на рис. 1, наведені в питомих та абсолютних одиницях. Розрахунки проведено для конкретних розрахункових умов систем кондиціонування повітря приміщення громадського харчування в Києві при значенні повітряного потоку $G_a^{int}=5,17$ кг/с.

Результати розрахунків показують суттєву відмінність чисельних значень та знаку для різних вентиляційних процесів, що свідчить про їхню інформативність, і є коректною енергетичною характеристикою. Від'ємне значення величини деструкції характеризує напрямок ексергетичного потоку повітря – деструкція на зменшення, – а позитивне, навпаки, на збільшення ексергетичного потенціалу.

Величина деструкції термічної складової ексергії вентиляційного потоку в межах приміщення, яка визначається як різниця значень ексергії припливного й витяжного повітря $\Delta E_{a,h}^{in-\ell} = |E_{a,h}^{in} - E_{a,h}^{\ell}|$ та за формулою (3), є важливим показником енерговитрат повітрообмінних процесів. Вона коректна й однозначно характеризує енерговитрати при повітрообміні відповідного потоку вентиляційного повітря. Крім того, вона є складовою ексергетичного балансового рівняння [2]. Важливо, що цією характеристикою зручно користуватися при порівнянні різних схемних рішень повітророз-

поділення. Останнє положення витікає із залежності ексергетичної функції від співвідношення температур, К, припливного $T_{a,h}^{in}$ та витяжного $T_{a,h}^{\ell}$ повітря.

Висновки. Результатом даного доробку є отримання важливих характеристик перетворення термічної складової ексергетичної функції вентиляційного повітря в процесі повітрообміну в приміщенні. Отримана залежність (2) дозволяє визначити швидкість генерації ентропії повітряного потоку, що є корисним для дослідницької та інженерної практики при енергетичній оцінці й порівнянні вентиляційних процесів. Інтегрування диференціалу ексергетичної

функції за температурою внутрішнього повітря вздовж струмини (3) дає можливість отримати коректні кількісні значення деструкції термічної складової в процесі повітрообміну, яка є основним ексергетичним показником процесу. Крім того, в результатах дослідження отримано можливість аналітично визначати напрямок ексергетичного потоку повітря завдяки його знаку.

Перспективи подальших досліджень. У подальшому планується провести подібні дослідження хімічної складової ексергетичного потоку повітря, яка для вентиляційного повітря представлена концентраціями парів вологи та двоокису вуглецю.

Таблиця

Відповідні результати обчислень для процесів, що на рис. 1 в питомих та абсолютних одиницях

Розрахунковий період року та вентиляційний процес	Температура повітря, К			Деструкція термічної складової ексергії потоку повітря у вентиляційному процесі	
	зовнішнього, T_a^{ext}	припливного, T_a^{in}	викидного, T_a^{ℓ}	питоме значення повітряного потоку, кДж/кг	ексергетичного потоку, кДж/с
Теплий період, асиміляція теплоти й вологи ($\epsilon=3,94$ кДж/г.в.)	303	291	297	- 0,183	-0,947
Холодний період, асиміляція теплоти й вологи ($\epsilon=2,88$ кДж/г.в.)	251	293	299	0,842	4,356
Холодний період, повітряне опалення з асиміляцією вологи ($\epsilon=1,1$ кДж/г.в.)	251	297	291	- 0,877	-4,536

Література

- ДБН В.1.2-11-2008. Система забезпечення надійності та безпеки будівельних об'єктів. Основні вимоги до будівель і споруд економія енергії. – Чинні від 01.10.2008. – Київ: Мінбуд України, 17 с.
- Эксергетические расчеты технических систем: Справ. пособие / Бродянский В. М., Верховкер Г. П., Карчев Я. Я. и др. – Киев: Наукова думка, 1991. – 360 с.
- ДСТУ-Н Б А.2.2-13:2015. Енергетична ефективність будівель. Настанова з проведення енергетичної оцінки будівель. – Чинні від 01.01.2016. – Київ: Мінрегіон України, 29 с.
- Luigi Marletta. Air Conditioning Systems from a 2-nd Law Perspective / Luigi Marletta // Entropy: мережевий журн. 2010. URL: <http://www.mdpi.com/journal/entropy>. p=860
- Вишневикий Е. П. Энергосбережение при проектировании систем микроклимата зданий / Е. П. Вишневикий // СОК. – 2010. – № 1.
- Морозюк Т. В. Новый этап в развитии эксергетического анализа / Т. В. Морозюк // Холодильна техніка та технологія. – 2014. – № 4. – С. 13-17.
- Задояний О. В. Діаграма потоків ексергії вологого повітря для систем кондиціонування повітря/ Задояний О. В., Євдокименко Ю. М. // «Вентиляція, освітлення та теплогазопостачання»: наук.-техн. зб. / Київський національний університет будівництва і архітектури. – 2015. – Вип. 18. – с. 3-15.

8. Задоянний О. В. Види ексергії в системах кондиціонування повітря та їх визначення / Задоянний О. В. Євдокименко Ю. М. // «Вентиляція, освітлення та теплогазопостачання»: наук.-техн.зб./ Київський національний університет будівництва і архітектури. – 2016. – вип.19. – с.3-15.
9. Thermodynamic performance assessment of a novel air cooling cycle: Maisotsenko cycle / H. Caliskan, A. Hepbasli, I. Dincer, V. Maisotsenko // International journal of refrigeration XXX. – 2011. – no. 1. – с. 1-11.
10. Bejan A. Advanced Engineering Thermodynamics / A. Bejan. – New York: John Wiley & Sons, 2016. – 792 p.

References

1. Systema zabezpechennia nadiinosti ta bezpeky budivelnykh ob'ektiv. Osnovni vymohy do budivel i sporud ekonomii enerhii. DBN V.1.2-11-2008, Ukrarkhbudinform, 2008.
2. Brodyanskiy V. M., Verhivker G. P., Karchev Ya. Ya. i dr. Eksergeticheskie raschety tekhnicheskikh sistem. Naukova dumka, 1991.
3. Enerhetychna efektyvnist budivel. Nastanova z provedennia enerhetychnoi otsinky budivel. DSTU-N B A.2.2-13:2015, Ukrarkhbudinform, 2015.
4. Luigi Marletta. "Air Conditioning Systems from a 2-nd Law Perspective." *Entropy: merezhevyi zhurn.* 2010. URL: <http://www.mdpi.com/journal/entropy>. p=860
5. Vishnevskiy E. P. "Energoberezhenie pri proektirovanii sistem mikroklimata zdaniy." *SOK*, no. 1, 2010.
6. Moroziuk T. V. "Novyi etap v razvitii eksergeticheskogo analiza." *Holodilna tekhnika ta tehnologiya*, no. 4, 2014.
7. Zadoiannyi O. V., Yevdokymenko Yu. M. "Diahrama potokiv ekserhii volohoho povitria dlia system kondytsionuvannia povitria." *Ventyliatsiia, osvittennia ta teplohapostachannia: Naukovo-tekhnichnyi zbirnyk*, Iss. 18, Kyiv National University of Construction and Architecture, 2015, pp. 3-15.
8. Zadoiannyi O. V., Yevdokymenko Yu. M. "Vydy ekserhii v systemakh kondytsionuvannia povitria ta yikh vyznachennia." *Ventyliatsiia, osvittennia ta teplohapostachannia: Naukovo-tekhnichnyi zbirnyk*, Iss. 19, Kyiv National University of Construction and Architecture, 2016, pp. 3-15.
9. H. Caliskan, A. Hepbasli, I. Dincer, V. Maisotsenko. "Thermodynamic performance assessment of a novel air cooling cycle: Maisotsenko cycle." *International journal of refrigeration XXX*, no. 1, 2011.
10. Bejan A. *Advanced Engineering Thermodynamics*. John Wiley & Sons, 2016.

УДК 697.94

Исследование функции термической составляющей эксергетического потока влажного воздуха в кондиционируемом помещении

О.В. Задоянний¹

¹к.т.н., доц. Киевский национальный университет строительства и архитектуры, zadoiannyi.ov@knuba.edu.ua.
ORCID: 0000-0001-6781-9756

Аннотация. Углубленный эксергетический анализ процессов в системах кондиционирования воздуха позволяет корректно оценить потери и деструкцию каждой составляющей эксергетического потока влажного воздуха. Исследование поведения функции термической составляющей эксергетического потока целесообразно проводить отдельно от других составляющих с целью получения её весомости в общих эксергетических потерях и характера поведения в пределах вентилируемого помещения. Дифференцирование термической составляющей эксергетической функции по аргументу – температуре помещения – даёт величину скорости генерации энтропии воздушного потока, которая является характерным и корректным показателем энергосбережения соответствующего схемного решения воздухообмена. Интегрирование этой функции даёт величину деструкции потока термической составляющей эксергии вентиляционного воздуха. Эта величина показывает численное значение деструкции в помещении в пределах значений приточной и вытяжной температур, а знак указывает на направление деструкции относительно референтной (внешней расчётной) температуры. Сравнение основных вентиляционных процессов и схемных решений распределения воздуха в помещении по величине деструкции даёт корректную и однозначную оценку их энергосбережения. Величина деструкции термической составляющей потока эксергии вентиляционного воздуха есть характерной для определения эксергетической эффективности воздухообмена.

Ключевые слова: эксергетический поток вентиляционного воздуха, анализ функции термической составляющей

UDC 697.94

Investigation of The Function of the Thermal Component of the Exergy Flow of Moist Air in an Air-Conditioned Room

O. Zadoiannyi¹

¹PhD, associate professor. National University of Construction and Architecture, Kyiv, Ukraine. zadoiannyi.ov@knuba.edu.ua.
ORCID: 0000-0001-6781-9756

Abstract. The exergy analysis of the systems and elements of microclimate creation in the premises enables to obtain correct numerical indices of energy efficiency on the basis of evaluation of the thermodynamic irreversibility of the processes of heating, cooling, drainage and humidification of air. These systems dominate the consumption of all types of energy in public and residential buildings. An in-depth exergy analysis of processes in air-conditioning systems allows us to correctly evaluate the loss and destruction of each component of the exergy flow of moist air. The study of the behavior of the function of the thermal component of the exergent flow should be carried out separately from other components in order to obtain its weight in the general exergent losses and the nature of behavior within the ventilated space. Differentiation of the thermal component of the exergent function by the argument – the room temperature – gives the magnitude of the rate of entropy generation of air flow, which is a characteristic and correct indicator of energy efficiency of the corresponding scheme of air exchange. Integration of this function gives the magnitude of the destruction of the flow of the thermal component of the exergy of the ventilation air. It shows the numerical value of the destruction in the room within the limits of the fuel temperature and the discharge, and the sign indicates the direction of destruction relative to the reference (external) temperature. Comparison of the basic ventilation processes and the circuit-based solutions of air distribution in the room by the magnitude of the destruction gives a correct and unambiguous estimate of their energy efficiency. The magnitude of the destruction of the thermal component of the exergy flow of ventilation air is characteristic of determining the exergic efficiency of air exchange.

Keywords: exergy flow of ventilation air, analysis of the function of the thermal component.

Надійшла до редакції / Received 18.06.2018