
ВЕНТИЛЯЦІЯ ТА КОНДИЦІОНУВАННЯ ПОВІТРЯ

УДК 697.94

Види ексергії в системах кондиціонування повітря та їх визначення

О.В. Задоянний¹, Ю.М. Євдокименко²

¹к.т.н., доцент, Київський національний університет будівництва і архітектури, Україна, 03680 Повітрофлотський проспект, 31, ауд. 284, м. Київ., e-mail: Alvasil21@Gmail.com

²аспірант, Київський національний університет будівництва і архітектури, Україна, 03680 Повітрофлотський проспект, 31, ауд. 284, м. Київ, e-mail: bonnesante@mail.ru

Подано результати визначення та вираження основних матеріальних та фізичних потоків в системах кондиціонування повітря через одиниці ексергії. Наведено аналітичні залежності в зручній для інженерних розрахунків формі, які необхідні для проведення ексергетичного аналізу й подальшого визначення ексергетичної ефективності вказаних систем та її функціональних елементів. Подано також результати досліджень у вигляді аналітичних залежностей для визначення в одиницях ексергії надходжень в приміщення основних шкідливих речовин для оцінки ексергетичної ефективності повітрообміну в кондиціонованому приміщенні.

Ключові слова: системи кондиціонування повітря, види ексергії та ексергетичні потоки; розрахункові залежності для визначення ексергетичних потоків в системі та в кондиціонованому приміщенні.

Вступ. Для повного й поглибленого проведення ексергетичного аналізу необхідно всі фізичні величини, що входять в систему балансових рівнянь термодинамічних процесів, які здійснюються в обладнанні СКП та в кондиціонованому приміщенні, виразити через одиниці ексергії. Для потоку вологого повітря, яке є робочим тілом в СКП, існують відповідні аналітичні залежності [1] для визначення ексергії його складових - термічної, вологісної, механічної та хімічної концентраційної для двоокису вуглецю. За їх допомогою є можливим коректне чисельне визначення ексергетичної ефективності обробки повітря в елементах СКП та обмежено для системи в цілому. Крім вологого повітря в СКП присутні інші матеріальні, фізичні та хімічні потоки, без визначення яких через одиниці ексергії неможливо провести поглиблений ексергетичний аналіз системи. В даній роботі наведено результати аналітичних досліджень з визначення основних наявних ексергетичних потоків, які присутні в

СКП, для можливості проведення поглибленого ексергетичного аналізу роботи систем.

Постановка проблеми. Відомо, що для визначення показників енергоощадності технічних систем, до яких відносяться й СКП разом із кондиціонованим приміщенням, потрібен поглиблений ексергетичний аналіз [2], який базується на ретельному дослідженні всіх ексергетичних потоків системи. Нами було показано, що при розділенні термомеханічної ексергії на термічну та механічну при поглибленому ексергетичному аналізі СКП за допомогою ексергетичної потокової діаграми стає можливим коректний чисельний аналіз і відповідне зорове сприйняття деструкцій всіх наявних складових ексергії вологого повітря в елементах системи [3]. Такого самого аналізу потребує й приміщення, що обслуговується СКП, як основний елемент в структурі системи, де відбувається «корисна» деструкція складових ексергії вологого повітря. Крім аналізу робочого тіла – повітря, потрібен такий самий ретельний аналіз інших ексергетичних потоків СКП, до яких відносяться енергоносії, які забезпечують тепло- та холодопостачання та матеріальні й фізичні потоки в приміщенні. Ексергетичні потоки в СКП утворюються з матеріальних та енергетичних потоків. Ексергія матеріальних потоків – це ексергія повітря та її складових, ексергія теплоносіїв, холодоносіїв, парів води, концентраційних потоків води та газів в повітрі, зокрема двоокису вуглецю, а ексергія енергетичних (нематеріальних) потоків – це теплові потоки (конвективні та радіаційні) в приміщенні. Коректне визначення вказаних величин для проведення поглибленого ексергетичного аналізу уявляє собою інженерно-наукову задачу, без вирішення якої неможлива ексергетична оцінка енергоощадності СКП.

Актуальність дослідження. Ексергетичний аналіз технічних систем на сьогодні є єдиним універсальним методологічним інструментом з визначення термодинамічної ефективності технічних об'єктів [1]. Оцінка за показниками ексергетичної ефективності, зокрема за ексергетичним коефіцієнтом корисної дії (ЕККД) різних за призначенням та принципом дії технологічних процесів набуває все більшої популярності завдяки коректності результатів й однозначності висновків. Нормативні документи України з питань енергозбереження в будівлях і спорудах в якості технічних принципів енергозбереження вимагають оцінювати ефективність технічних засобів та обладнання для нагрівання, охолодження та зволоження повітря показником коефіцієнта корисної дії [4]. Але в науковому та інженерному середовищі, в практиці проектування та експлуатації СКП відсутня узагальнена методологія оцінки із застосуванням ексергетичного аналізу ефективності роботи вказаних систем в повному об'ємі, включаючи повітрообмін в приміщеннях. В окремих публікаціях дають ексергетичну оцінку повітрообміну в приміщенні як корисну деструкцію ексергії повітря без його належної термодинамічної оцінки з урахуванням чинників, які впливають на повітрообмін [5]. Системи кондиціонування повітря потребують більш детального поглибленого ексергетичного аналізу з урахуванням всіх складових ексергії не тільки повітря,

як робочого тіла, але й всіх матеріальних та енергетичних потоків, які враховують при їх проектуванні та дослідженнях - теплонадлишків, вологонадлишків та надходжень окису вуглецю.

Зв'язок праці із важливими науковими та практичними завданнями. Національна програма енергозбереження в Україні передбачає значне скорочення споживання енергоресурсів в усіх секторах економіки країни [6]. Системи кондиціонування повітря забезпечують нагрівання, охолодження та зволоження внутрішнього середовища в приміщеннях різного призначення. В структурі енергоспоживання громадськими будівлями за даними [7] на зазначені функції планується зменшення енергії приблизно на порядок і доведення її до рівня розвинутих країн [8]. Нераціональне енергоспоживання вказаними системами гальмують розвиток в різних секторах економіки, переробній та харчовій промисловостях, соціальному секторі. Дана робота виконується відповідно до законодавчих актів: Постанови Верховної Ради України №75/94-ВР від 1.07.94 р., що затвердила "Закон України про енергозбереження", Постанови Кабінету Міністрів України №148 від 5.02.97 р. "Про комплексну державну програму енергозбереження України".

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Найбільш повний ексергетичний аналіз центральних СКП було проведено ще в 90-ті роки [1]. Ці доробки дали певний поштовх подальшим дослідженням, які із загостренням енергетичної кризи вийшли на більш досконалий рівень. Наприклад в роботі італійських дослідників [9] проведено ексергетичний аналіз найбільш поширених схемних рішень СКП в Італії, в результаті якого визначено втрати ексергії в процесі послідовної обробки повітря в системі. Корисні результати ексергетичного аналізу СКП публікують також китайські дослідники, які більш поглиблено аналізують складові ексергії вологого повітря [10] з виділенням вологісної складової й її ретельним аналізом. Вітчизняні доробки представлені в роботах вчених львівської політехніки [5], [11], які подають результати досліджень ексергетичної ефективності нових схемних рішень СКП за усталеними апробованими методиками. У вказаних роботах автори використовують алгоритми ексергетичного аналізу, зокрема коректно оцінюють основні ексергетичні потоки – холодоносії, теплоносії, вологе повітря тощо і в результаті отримують значення ексергетичної ефективності певної конструкції СКП, яка приймається як єдина чисельна оцінка термодинамічної ефективності системи.

Виділення невирішених раніше частин загальної проблеми. СКП як термодинамічну систему варто розглядати за структурою, яка запропонована нами в роботі [12] й побудована за принципом функціональної єдності та зв'язку складових елементів. Вона крім основного потоку робочого тіла має вхідні та вихідні ексергетичні потоки, які впливають на деструкцію основного. До них відносяться потоки теплоносіїв, холодоносіїв та електричної енергії. Крім того до основного структурного елемента СКП – приміщення підводять різні ексергетичні потоки, які формують його мікроклімат. Це основні потоки, які беруть до уваги при розрахунку повітрообміну, - тепло- та вологонадлишки з

різних джерел та двоокис вуглецю. Існуючі інженерні методики не мають інструменту розрахунків СКП із застосуванням ексергетичного аналізу за браком вираження вказаних потоків в одиницях ексергії. В наведених вище роботах при дослідженні ексергетичної ефективності СКП не приймається до уваги приміщення, що обслуговується й не оцінюється його повітрообмін. В роботі [5], наприклад, при визначенні ексергетичного коефіцієнту корисної дії СКП чистого приміщення враховується загальна деструкція ексергії повітря в приміщенні без виділення вологісної та термічної складових й не визначається ефективність повітрообміну. Для більш детального аналізу ексергетичну оцінку варто робити й для вказаних складових ексергії, що дасть можливість аналізувати параметри повітря в приміщенні, їх вплив на ефективність повітрообміну й загальну ефективність СКП.

Новизна. Новизна наведеного доробку полягає в визначенні всіх необхідних фізичних величин, які характеризують термодинамічні процеси в СКП та в приміщенні, що обслуговується, через одиниці ексергії. Крім вже відомих залежностей [1], [5], [9], [10], [11] для ексергій складових вологого повітря та окремих теплових потоків до них належать радіаційні та конвективні теплові потоки теплонадходжень в приміщення від різних джерел, потоки вологи, що випаровується в приміщенні, тепло- та холодоносії, потоки двоокису вуглецю концентраційні в вентиляційному повітрі та від метаболізму із диханням людини, які подано в даній роботі.

Методологічне значення. Визначення матеріальних та фізичних потоків, які мають місце в обладнанні СКП та в кондиціонованому приміщенні у вигляді ексергетичних потоків та їх зручний для інженерного користування вид, забезпечує можливість поглибленого ексергетичного аналізу в усіх елементах та вузлах системи, коректне складання ексергетичних балансів, чисельне визначення ЕККД окремих функціональних елементів та системи в цілому, а також ексергетичну оцінку повітрообміну в приміщенні по основних шкідливостях громадських будівель – надлишковій теплоті, вологі й двоокису вуглецю. Таким чином забезпечується методологічна можливість здійснення поглибленого ексергетичного аналізу СКП й на його основі їх коректна порівняльна оцінка за показниками ексергетичної ефективності [12], що все разом призводить до заощадження енергії в даних системах.

Основний матеріал. Ексергетичний аналіз СКП передбачає складання балансу матеріальних, енергетичних та ексергетичних потоків, які в процесі обробки повітря піддаються деструкції, або втраті. Відомо, що деструкція ексергії в свою чергу може бути корисною, або витратною і характеризується зміною термодинамічних потенціалів робочого тіла [1]. В першому випадку вказана зміна в межах функціонального елементу системи відповідає корисному ефекту, а в другому – супроводжує корисний ефект, або втрачається. В загальному вигляді ексергетичний баланс СКП можна записати

$$\sum E^{in} - \sum E^{out} = \sum E^D, \quad (1)$$

де E^{in} , E^{out} , E^D - сумарні ексергетичні потоки, відповідно - вхідний, вихідний та втрати, або деструкція ексергії.

За класифікацією [13], що наведена на рис.1, в затемнених елементах структурної схеми представлені види та відповідні складові ексергії, які мають місце в СКП.

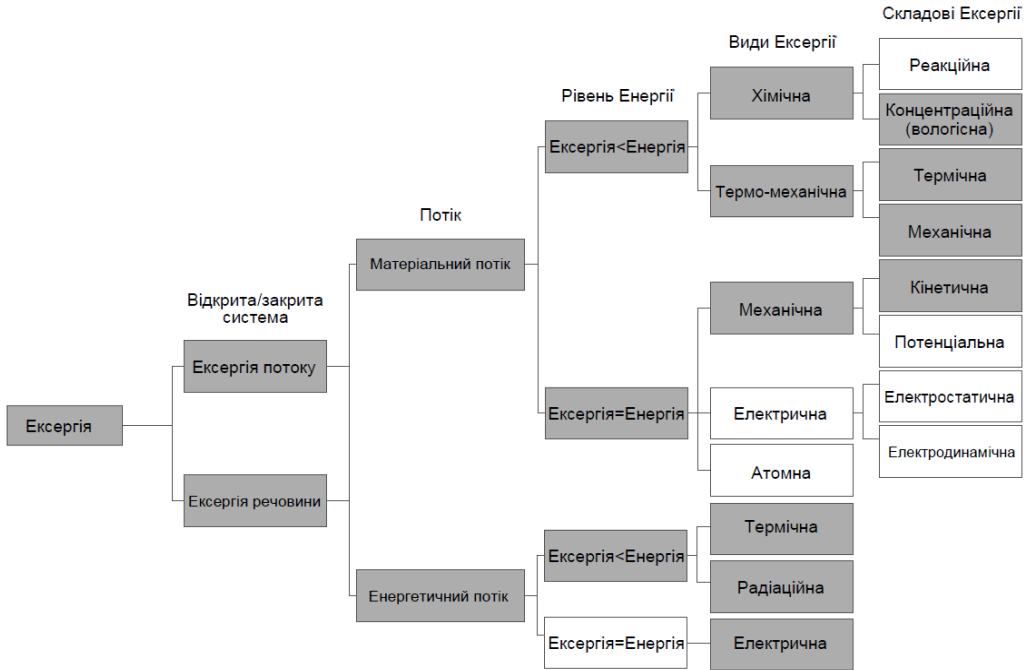


Рис. 1.Класифікація видів ексергії [13]

Ексергія потоку – це, перш за все, – повітря, як робоче тіло, яке в свою чергу поділяється на два види: хімічний та фізичний (термомеханічний). Перший – це концентрація вологи (або вологовміст) та двоокису вуглецю, як основні чинники, по яких розраховують повітрообмін в громадських будівлях. В термомеханічній ексергії, як показано в [3], для СКП варто виділити й розглядати окремо термічну та механічну складові тому, що їх величини мають значення одного порядку. В потоці повітря термічна ексергія залежить в основному від температури, а механічна – від повного тиску повітря. Кінетична складова ексергії може також розглядатись в окремих випадках для повітря, але його величина незначна в порівнянні з іншими видами і складає, наприклад, для швидкості руху повітря в межах 2...5 м/с - 1...6 Дж/кг повітря. Для матеріальних потоків тепло- та холодоносіїв мають місце ці ж самі види ексергії.

Матеріальні потоки вологи у вигляді пари та двоокису вуглецю, які виділяються в приміщенні враховуються при відповідній температурі джерела надходження й відповідному агрегатному стані.

Розрахункові залежності для визначення ексергії варто подавати по складових.

Складові ексергії припливного повітря, кДж/с, можна визначити за залежностями: термічна

$$E_{a,h}^{in} = G_a^{in} \left[T_a^{ext} (c_{p,d,a} + d_a^{in} c_{p,w,v}) \left(\frac{T_a^{in}}{T_a^{ext}} - 1 - \ell n \frac{T_a^{in}}{T_a^{ext}} \right) \right]; \quad (2)$$

механічна

$$E_{a,m}^{in} = G_a^{in} \left[\left(T_a^{ext} R_v (0,622 + d_a^{in}) \ell n \frac{P_a^{in}}{P_a^{ext}} \right) \right]; \quad (3)$$

вологісна (хімічна концентраційна)

$$E_{a,ch,cn,w}^{in} = G_a^{in} \left[T_a^{ext} R_v \left((0,622 + d_a^{in}) \ell n \frac{0,622 + d_a^{ext}}{0,622 + d_a^{in}} + d_a^{in} \ell n \frac{d_a^{in}}{d_a^{ext}} \right) \right], \quad (4)$$

де G - масові витрати повітря, кг/с; T - абсолютна температура, К; c_p - масова ізобарна теплоємність, кДж/кг°К; d - вологовміст, кг/кг; P - абсолютний тиск, кПа; R_v - газова стала водяної пари, кДж/кг°К; індекси: a - повітря; h - теплота; in - припливне; ext - зовнішнє; p - ізобарна; d - сухе; w - вологе; v - пара; cn - концентраційна; ch - хімічна.

Складові ексергії повітря, яке видаляється, такі ж самі, але позначаються верхнім індексом out .

Схематичне зображення ексергетичних потоків у приміщенні, яке обслуговується СКП, варто подати у вигляді, що наведений на рис.2.

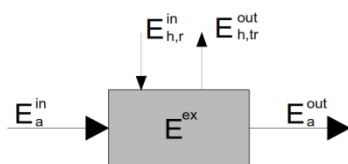


Рис. 2.Схема ексергетичних потоків приміщення, яке обслуговується СКП

Рівняння ексергетичного балансу (1) відповідно до наведеної схеми з урахуванням надходжень в робочу зону шкідливих речовин (E^{ex} - ексергія надходжень) та тепловтрат ($E_{h,tr}^{out}$ - ексергія тепловтрат) буде мати вигляд:

$$\text{для теплого періоду року за умови } \frac{E_{h,tr}^{out}}{E_a^{in}} < 1$$

$$E^{in} - E^{ex} - E^{out} - E^d = 0; \quad (5)$$

для холодного періоду року за умови $\frac{E^{out}}{E^{in}} > 1$

$$E^{in} + E^{ex} - E_{h,trs}^{out} - E^{out} - E^d = 0; \quad (6)$$

Складова E^{ex} уявляє собою ексергію наявних розрахункових надлишкових шкідливих речовин, які надходять в робочу зону приміщення, а саме: всі види теплоти, вологи й двоокису вуглецю.

Ексергетичний потік, що на схемі рис.2, є радіаційної складовою теплонадходжень від сонячної радіації в теплий період року.

Складові ексергії E^{ex} визначають окремо, виходячи з вихідних розрахункових даних щодо розрахунку повітрообміну СКП [14]. Ексергія E^{ex} є сумою основних складових ексергетичних потоків - надлишків теплоти, вологи та двоокису вуглецю

$$E^{ex} = E_h^{ex} + E_w^{ex} + E_{co_2}^{ex}. \quad (7)$$

Ексергія потоку теплоти E_h^{ex} в рівнянні (7), яка надходить в робочу зону, складається з радіаційної $\sum E_{h,r}^{ex}$, конвективної $\sum E_{h,cv}^{ex}$, термічної ексергії з водяними парами (прихована теплота) $\sum E_{h,w}^{ex}$ та трансмісійної, яка враховується як тепловтрати в холодний період року $E_{h,trs}^{ex}$. Відповідно до періодів року складові ексергії потоків теплоти E_h^{ex} , яка надходить до робочої зони, будуть:

для теплого періоду року

$$E_h^{ex} = \sum E_{h,r}^{ex} + \sum E_{h,cv}^{ex} + \sum E_{h,w}^{ex}; \quad (8)$$

для холодного періоду року

$$E_h^{ex} = \sum E_{h,r}^{ex} + \sum E_{h,cv}^{ex} + \sum E_{h,w}^{ex} - E_{h,trs}^{out}. \quad (9)$$

Радіаційна складова ексергії теплоти $\sum E_{h,r}^{ex}$ обчислюється для кожного i -го джерела за формулою [13], кДж/с

$$\sum_i E_{h,r}^{in} = \sum_i q_{r,s}^i \left(\frac{T_s^i - T_a^{ext}}{T_s^i} \right), \quad (10)$$

де T_s^i та T_a^{ext} відповідно абсолютна температура джерела надходження радіаційної теплоти та зовнішня абсолютна температура, °К, $q_{r,s}^i$ - тепловий потік від i -го джерела, кДж/с.

Ексергія конвективної складової теплонадходжень $\sum E_{h,cv}^{ex}$ для кожного i -го джерела обчислюється аналогічно до [1], [15], кДж/с:
у разі $T_s^i \geq T_a^{ext}$

$$\sum_i E_{h,cv}^{ex} = \sum_i q_{cv,s}^i \left(1 - \frac{T_a^{ext}}{T_s^i}\right), \quad (11)$$

у разі $T_s^i \leq T_a^{ext}$

$$\sum_i E_{h,cv}^{ex} = \sum_i q_{cv,s}^i \left(\frac{T_a^{ext}}{T_s^i} - 1\right). \quad (12)$$

де $q_{cv,s}^i$ – тепловий конвективний потік від i -го джерела, кДж/с.

Ексергію трансмісійної теплоти тепловтрат $E_{h,trs}^{ex}$ обчислюють аналогічно до [15], кДж/с

$$E_{h,trs}^{out} = Q_{trs}^{out} \left(1 - \frac{T_a^{ext}}{T_a^{wz}}\right), \quad (13)$$

де Q_{trs}^{out} – трансмісійні тепловтрати приміщення, кДж/с, T_a^{wz} – абсолютна температура робочої зони, К.

Теплову складову ексергії, що надходить із парами води, варто обчислювати за наступною формулою для ексергії пари води.

Ексергія потоку вологи, яка присутня в приміщенні у стані пари води і надходить з i різних джерел, містить ексергію, яка асоціюється із тепловою $\sum E_{h,w,v}^{ex,i}$ та з вологою у стані пари $\sum E_{w,v}^{ex,i}$, які визначаються, відповідно, із залежностей [1], кДж/с

$$\sum E_{h,w,v}^{ex,i} = \sum m_{w,v}^{ex,i} \times T_a^{ext} \left[c_{p,v} \left(\frac{T_{v,sat}^{ex,i}}{T_a^{ext}} - 1 - \ln \frac{T_{v,sat}^{ex,i}}{T_a^{ext}} \right) + r_w \left(\frac{1}{T_{v,sat}^{ex,i}} - \frac{1}{T_a^{ext}} \right) + R_v \ln \frac{p_{v,sat}^{ex,i}}{p_{v,sat}^{ext}} \right], \quad (14)$$

де r_w – питома теплота фазового переходу, кДж/кг; $m_{w,v}^{ex,i}$ – масові витрати парів води від i -го джерела, кг/с; індекс sat – насичення.

$$\sum E_{w,v}^{ex,i} = \sum m_{w,v}^{ex,i} \times T_a^{ext} \times R_v \ln \frac{1}{\varphi_a^{ext}}, \quad (15)$$

де φ_a^{ext} – відносна волога повітря в частках одиниці.

Розрахунок ексергії двоокису вуглецю, яку слід враховувати при ексергетичному аналізі E_{ch,co_2}^{in} , варто проводити окремо для потоку ексергії в суміші припливного E_{a,ch,cn,co_2}^{in} та витяжного E_{a,ch,cn,co_2}^{out} повітря та окремо, що надходить від людей за рахунок метаболізму E_{met,ch,cn,co_2}^{ex} .

Ексергія потоку двоокису вуглецю в суміші припливного повітря визначається за модифікованою формулою, кДж/с [16], [17]

$$E_{a,ch,cn,co_2}^{in} = G_a^{in} \left(\frac{RT_a^{in} \times x_{a,\mu,co_2}^{in} \times \ln \left(\frac{x_{a,\mu,co_2}^{in}}{x_{\mu,co_2}^0} \right)}{\mu_{co_2}} \times c_{m,co_2}^{in} \right). \quad (16)$$

Така сама величина E_{a,ch,cn,co_2}^{out} та величини в формулі (15), але в суміші викидного повітря позначаються індексом *out*.

Ексергія двоокису вуглецю, що надходить від людей за рахунок метаболізму E_{met,ch,cn,co_2}^{ex} визначається за модифікованою формулою [17], кДж/с

$$E_{met,ch,cn,co_2}^{ex} = m_{met,co_2}^{ex} \times \left(\frac{RT_a^{ext} \times x_{met,\mu,co_2}^{ex} \times \ln \left(\frac{x_{met,\mu,co_2}^{ex}}{x_{\mu,co_2}^0} \right)}{\mu_{co_2}} \right), \quad (17)$$

де m_{met,co_2}^{ex} – надходження двоокису вуглецю в робочу зону за рахунок метаболізму, кг/с; x_{a,μ,co_2}^{in} – мольна фракція двоокису вуглецю в припливному повітрі в частках одиниці; c_{m,co_2}^{in} – масова концентрація двоокису вуглецю в повітрі, кг/кг; x_{met,μ,co_2}^{ex} – мольна фракція двоокису вуглецю в повітрі, що надходить від метаболізму в частках одиниці (при $T_{a,met}^{ex} = T_a^{wz}$ °К та $P_a^{ex} = P_a^{wz}$ Па) ; x_{μ,co_2}^0 – мольна фракція двоокису вуглецю в референтному середовищі ($T=298$ °К та $P=101325$ Па) в частках одиниці; μ_{co_2} – мольна маса двоокису вуглецю, кг/моль; R – універсальна газова стала, кДж/(моль К).

Ексергетичні потоки в СКП, які асоціюються із потоками теплоти, «холоду», води та пари для зволоження повітря й електричної енергії і які живлять відповідні елементи системи, визначають наступним чином.

Потік фізичної ексергії гарячої води, кДж/с

$$\begin{aligned} E_{hta,w,l,ph} &= g_{hta,w,l,m} \times \\ &\times \left[c_{p,ts,w,l} \left\{ (T_{hta,w,l} - T_a^{ext}) - T_a^{ext} \ln \left(\frac{T_{hta,w,l}}{T_a^{ext}} \right) \right\} + v_{hta,w,s} (P_{hta,w,l} - P_a^{ext}) \right], \end{aligned} \quad (18)$$

де $g_{hta,w,l,m}$ – масові витрати рідинного теплоносія, кг/с; $c_{p,hta,w,l}$ – теплоємність рідинного теплоносія, кДж/(кг К); $T_{hta,w,l}$ та T_a^{ext} – абсолютна температура, відповідно, теплоносія та зовнішнього повітря, °К; $v_{hta,w,s}$ – питомий об'єм рідинного теплоносія, м³/кг; $P_{hta,w,l}$ та P_a^{ext} – тиск, відповідно, рідинного теплоносія та зовнішнього повітря, кПа. Визначення ексергії холодоносія-води здійснюють за цією ж залежністю, позначаючи індексом *cl* замість *hta*.

У випадку, коли випарник холодильної машини встановлюють безпосередньо в обладнанні кондиціонера, або в повітропроводах СКП,

підведену до випарника ексергію потоку холодоагента у стані насиченої пари визначають із залежності [17], кДж/с

$$E_{cl,r,v,sat,ph} = g_{cl,r,m} \left[c_{p,r,sat,v} \left\{ (T_{cl,r,sat,v} - T_a^{ext}) - T_a^{ext} \ln \left(\frac{T_{cl,r,sat,v}}{T_a^{ext}} \right) \right\} + v_{cl,r,sat,v} (P_{cl,r,sat,v} - P_a^{ext}) \right], \quad (19)$$

а у стані рідини за аналогічної формулою

$$E_{cl,r,l,ph} = g_{cl,r,m} \left[c_{p,r,l} \left\{ (T_{cl,r,l} - T_a^{ext}) - T_a^{ext} \ln \left(\frac{T_{cl,r,l}}{T_a^{ext}} \right) \right\} + v_{cl,r,l} (P_{cl,r,l} - P_a^{ext}) \right]. \quad (20)$$

При підрахунках за формулами (19) та (20) слід враховувати відповідні до фізичного стану холодоагента величини питомої теплоємності ($c_{p,r,sat,v} \neq c_{p,r,l}$) та питомого об'єму ($v_{cl,r,sat,v} \neq v_{cl,r,l}$) які суттєво відрізняються.

Ексергетичний потік електричної енергії для живлення відповідних споживачів (електрокалорифер, вентилятор та інш.) відповідно до властивостей ексергії [1] дорівнює електричній енергії, кВт(кДж/с).

$$E_{el} = N_{el}. \quad (21)$$

В таблиці наведено результати розрахунків вказаних вище величин, які було використано при оцінці ексергетичної ефективності кондиціонування повітря в приміщенні громадського харчування в Києві. Розрахунки наведено для теплого періоду року при розрахункових умовах: температура зовнішнього повітря - 28,7 °С; ентальпія зовнішнього повітря - 56,1 кДж/кг; температура припливного повітря - 18 °С; ентальпія припливного повітря - 32,9 кДж/кг; температура внутрішнього повітря - 24 °С; ентальпія внутрішнього повітря - 43,8 кДж/кг; витрата повітря - 4,79 кг/с; питомі тепловиділення - 0,21 кВт/ м².

Висновки. В роботі визначено основні ексергетичні потоки, які мають місце в СКП. Їх подано у вигляді аналітичних залежностей у зручному для інженерних розрахунків вигляді. Вони призначені для коректного визначення ексергетичного потоку вологого повітря із складовими – термічної, механічної, концентраційних вологісної та двоокису вуглецю, а також ексергетичних потоків конвективної та радіаційної теплоти, потоку пари води та двоокису вуглецю, які мають місце в СКП та в кондиціонованому приміщенні. Подані аналітичні залежності є готовим методичним матеріалом для проведення розрахунків ексергетичних потоків при проектуванні, дослідженні та експлуатації СКП, на основі яких стає можливим визначення ексергетичної ефективності СКП, її окремих елементів, ефективності повітрообміну в приміщенні, теплота холодопостачання систем, електропостачання тощо. Подано приклад із результатами розрахунків ексергетичних потоків за вказаними залежностями для СКП підприємства громадського харчування в Києві для теплого періоду року.

Таблиця

Результати розрахунку ексергетичних потоків

Ексергетичний потік	Позначення	Розрахункова залежність	Значення ексергії, кДж/с
Термічна складова ексергії припливного повітря	$E_{a,h}^{in}$	(2)	0,945
Механічна складова ексергії припливного повітря	$E_{a,m}^{in}$	(3)	0,042
Вологісна складова ексергії припливного повітря	$E_{a,ch,cn,w}^{in}$	(4)	0,864
Термічна складова ексергії витяжного повітря	$E_{a,h}^{out}$	(2)	0,180
Механічна складова ексергії витяжного повітря	$E_{a,m}^{out}$	(3)	0,042
Вологісна складова ексергії витяжного повітря	$E_{a,ch,cn,w}^{out}$	(4)	0,301
Ексергія потоку теплоти в приміщення	E_h^{ex}	(8)	1,909
Ексергія потоку вологи в приміщення	E_w^{ex}	(15)	1,114
Ексергія потоку двоокису вуглецю в суміші припливного повітря	E_{a,ch,cn,co_2}^{in}	(16)	3,767
Ексергія потоку двоокису вуглецю в суміші викидного повітря	E_{a,ch,cn,co_2}^{out}	(16)	3,845
Ексергія двоокису вуглецю, що надходить від людей за рахунок етаболізму	E_{met,ch,cn,co_2}^{ex}	(17)	0,339
Ексергетичний потік теплоносія - гарячої води для підігріву повітря	$E_{hta,w,l,ph}$	(18)	91,36
Ексергетичний потік холодоагенту у стані насиченої пари*	$E_{cl,r,sat,l,ph}$	(19)	1,21
Ексергетичний потік холодоагенту у стані рідини*	$E_{cl,r,l,ph}$	(20)	1,59
Ексергетичний потік електричної енергії, споживаної вентилятором	E_{el}	(21)	4,97

*У контурі холодильної машини

Перспективи використання результатів. Аналітичні залежності, подані вище, є закінченим методичним матеріалом для використання в інженерно-науковій практиці з метою оцінки енергоощадності СКП за показниками ексергетичної ефективності. Це дає можливість коректно визначати й оцінювати ексергетичну ефективність як елементів СКП, так і повітрообміну в приміщенні, що відповідає умовам та принципу поглибленого ексергетичного аналізу. Крім того стає можливим проводити коректне порівняння за ексергетичними критеріями енергоощадності схемних рішень та режимів роботи СКП, формувати енергоефективні алгоритми автоматизованого управління. В

цілому подані аналітичні залежності є корисним методичним матеріалом для впровадження в інженерну практику з метою скорочення енергоспоживання системами кондиціонування повітря будівель і споруд.

Література

1. Эксергетические расчеты технических систем: Справ.пособие / Бродянский В.М., Верхивкер Г.П., Карчев Я.Я. и др.: 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. Морозюк Т.В., Тсатсаронис Дж. Углубленный эксергетический анализ - современная потребность оптимизации энергопреобразующих систем// Промышленная теплотехника. – 2005 . – Т.27, №2.- С.88-92.
3. Задоянний О.В., Євдокименко Ю.М. Діаграма потоків ексергії вологого повітря для систем кондиціонування повітря; Вентиляція, освітлення та теплогазопостачання: науково-технічний збірник. – Вип.18/відповідальний редактор Е.С.Малкін. – К.: КНУБА,2015 – 148 с.
4. Державні будівельні норми України. Система забезпечення надійності та безпеки будівельних об'єктів. Основні вимоги до будівель і споруд. Економія енергії. ДБН В.1.2-11-2008; Київ, Мінрегіонбуд України, 2008.
5. В.Й. Лабай, Д.І. Гарасим. Діаграма Грассмана в ексергетичному аналізі систем кондиціонування повітря чистих приміщень; Холодильна техніка та технологія: наук.-техн. журн. №5 (151);. – О.: Одес. держ. акад. холоду, 2014 р.
6. Закон України «Про енергозбереження»; Відомості Верховної Ради України (ВВР), 1994, N 30, ст.283.
7. Фаренюк Г.Г. Розвиток національної законодавчої та нормативної бази як основа забезпечення енергоефективності будівель. <http://iccua.org/wp-content/uploads/2015/03/Rozvitok-natsionalnoyi-zakonodavchoyi-ta-normativnoyi-bazi.pdf> (дата звернення 23.05.2016 р.).
8. Energy-Efficient Ventilation of Large Enclosures; Case Study Report; Energy Conservation in Buildings and Community Systems; Annex 26: мережевий журнал,1994. URL: <http://www.lowex.net> (дата звернення 10.03.2013).
9. Luigi Marletta. Air Conditioning Systems from a 2-nd 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).
10. Rang Tu, Xiao-Hua Liu, Yi Jiang. Lowering the regeneration temperature of a rotary wheel dehumidification system using exergy analysis. Journal of Clean Energy Technologies 2015 с. 161-164.
11. В.М.Желих, Х.Р. Лесик, Б.І.Пізняк. Дослідження ексергетичної ефективності низькотемпературних сонячних колекторів; Науково-технічний збірник “Сучасні технології, матеріали і конструкції в будівництві”, Міністерство освіти і науки України, Вінницький національний технічний університет, Том 14, №1 (2013) с.135-141.
12. Задоянний О.В., Ексергетичні критерії при оцінці енергоощадності систем кондиціонування повітря будівель і споруд; Науково-технічний збірник

- «Вентиляція, освітлення та теплогазопостачання.- Вип.17 /відповідальний редактор Е.С.Малкін.- К.: КНУБА.
13. Danahe Marmolejo Correa. Analysis and Design of LowTemperature Processes with Focus on LNG: Developing new Thermodynamics based Tools and introducing Exergy in Design Methodologies. Thesis for: PhD, Advisor: Truls Gundersen. Trondheim, November 2013 Norwegian University of Science and Technology Faculty of Engineering Science and Technology Department of Energy and Process Engineering. <https://www.researchgate.net/publication/> [22.05. 2016].
 14. ДБН В.2.5-67:2013. Державні будівельні норми України. Опалення, вентиляція та кондиціонування. Міністерство регіонального розвитку, будівництва та житлово-комунального господарства України. 2013. 147 с.
 15. Exergy balance and exergy efficiency. G.Tsatsaronis, F.Cziesla. <http://www.colss.net/sample-chapters/c08/c3-19-01-02.pdf> (дата звернення 05.06.2015).
 16. Silvio de Oliveira Jr. Exergy. Production, Cost and Renewability. Springer, 2013.
 17. N.Sato. Chemical Energy and Exergy: An introduction to Chemical Thermodynamics for Engineers. Elsevier Science & Technology Books. 2003.

Виды эксергии в системах кондиционирования воздуха и их определение

А.В. Задоянный, Ю.Н. Евдокименко

Представлены результаты определения основных материальных и физических потоков в системах кондиционирования воздуха и выражения их в единицах эксергии. Приведены аналитические зависимости в удобной для инженерных расчетов форме, которые необходимы для проведения эксергетического анализа и последующего расчета эксергетической эффективности указанных систем и их функциональных элементов. Приведены также результаты исследований в виде аналитических зависимостей для определения в единицах эксергии поступлений в помещение основных вредных веществ для оценки эксергетической эффективности воздухообмена в кондиционируемом помещении.

Types of Exergy in air conditioning systems and their definition

O. Zadoiannyi, Yu. Yevdokimenko

The results of the determination of the basic material and physical flows in air conditioning systems and their expressions in terms of exergy are given. The analytical dependence in a convenient form for engineering calculations, which are necessary use for exergy analysis and subsequent calculation of the exergy efficiency of these systems and their functional elements also given. Also presented the results of research in the form of analytical dependences for determination of Exergy in revenue terms in the basic premise of hazardous substances to assess the exergy efficiency of air conditioned space.

Надійшла до редакції 25.05.2016 р.