

УДК 697.94

Обґрунтування поглибленого ексергоекономічного аналізу систем кондиціонування повітря

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. Системи кондиціонування повітря (СКП) є найбільш енергосмілими серед систем забезпечення мікроклімату приміщень. Вони споживають усі види енергії, що виробляють енергогенераційні компанії. На сьогодні не розроблено коректну гармонізовану методологію аналізу та оптимізації енергоспоживання систем кондиціонування повітря. Відносно невисокі значення термодинамічних потенціалів при перетворенні матеріальних та енергетичних потоків СКП спонукають до аналізу всіх складових ексергії вологого повітря систем. Цими складовими є термічна, механічна та хімічні концентраційні: вологісна й двоокису вуглецю. Аналіз зазначених складових показує їхню сумірність і потребує коректного врахування при проведенні ексергоекономічного аналізу. Результати поглибленого ексергоекономічного аналізу показують нові якості СКП та їхніх елементів у вигляді відносних та абсолютних характеристик енергоефективності. Ними варто користуватися при оптимізації систем за критеріями мінімізації енергоспоживання, при конструюванні енергоощадних схемних рішень СКП та для моніторингу при експлуатації.

Ключові слова: кондиціонування повітря, ексергетичний аналіз, вологе повітря, балансове ексергетичне рівняння, ексергетична ефективність, ексергетична потокова діаграма, ексергоекономічний аналіз, ексергетична вартість потоку

Постановка проблеми. Системи кондиціонування повітря (СКП) будівельних об'єктів споживають усі наявні види енергії, які генерують промислові й комунальні енергогенераційні підприємства. Енергоспоживання цими системами зазвичай не аналізують належним чином. У багатьох випадках упродовж життєвого циклу обладнання фіксують тільки загальні витрати на енергоносії та різні питомі показники енергоспоживання. У ринкових умовах зазначена ситуація не стимулює виконання аналізу енергоощадності СКП, який передувє відповідним заходам підвищення енергоефективності. Першочерговим кроком подолання енергетичної кризи в Україні в цілому та житлово-комунальному секторі зокрема є своєрідна "інвентаризація" енергоспоживання системами забезпечення мікроклімату будівельних об'єктів. Вона передбачає визначення рівня та відповідного класу енергоспоживання будівельними об'єктами із розробкою енергетичних сертифікатів [1]. Наступним кроком планується так звана енергомодернізація. Вона передбачає нескладні з інженерної точки зору рішення щодо теплоізоляції огорожень з метою зменшення тепловтрат. Крім того, передбачено модернізацію інженерних систем створення й підтримки мікроклімату будівель. Останні заходи потребують перш за все визначення показників ощадного енергоспоживання системами. Чинні національні нормативні документи України регламентують певні

конкретні вимоги до енергоефективності вказаних систем, але не дають коректних методологічних рекомендацій щодо оцінки показників енергоспоживання ними [2]. Норми регламентують, зокрема, оцінювати коефіцієнтом корисної дії прилади й системи для нагрівання, охолодження й зволоження повітря в будівлях. Окремі документи містять методичні рекомендації щодо оцінки енергетичної ефективності систем кондиціонування повітря, які на наш погляд не можуть забезпечити вимог вказаних будівельних норм [3]. Таким чином, виникає методологічна проблема коректної оцінки показників енергоощадності систем забезпечення мікроклімату. У даній роботі розроблено узагальнені науково-методологічні положення оцінки енергоефективності систем кондиціонування повітря будівельних об'єктів, яка базується на сучасній ексергоекономічній теорії [4].

Останні дослідження та публікації. Традиційний підхід при ексергетичному аналізі СКП оперує оцінкою ексергетичних потоків та значеннями повної деструкції ексергії повітря. Він не дозволяє коректно визначати ефективність більшості процесів при обробці повітря в СКП. Це пояснюється тим, що процеси тепловологісної обробки повітря в функціональних вузлах СКП не є кінцевими, тобто вихідні потоки ексергії не є "продуктом", як у класичному ексергетичному аналізі [4, 7]. Це положення було нами доведено в роботі [8] при

порівняльному аналізі СКП. Крім того, усталене тлумачення поняття “деструкція” відповідає знищенню ексергії потоку. Однак, у більшості випадків процесів у СКП це поняття характеризує “корисний” ефект термодинамічних перетворень [8]. Відповідно до цього положення витікають особливості складання ексергетичних балансових рівнянь та відносного показника – ексергетичної ефективності – функціональних елементів, вузлів та системи в цілому. Окремі автори оцінюють загальну ексергетичну ефективність процесів у СКП і не надають уваги елементарним процесам (зволоженню, нагріванню, охолодженню), які характеризуються відповідними складовими ексергії повітря [9]. Подібний підхід унеможливує розширення предметності аналізу, яка в багатьох випадках відіграє ключову роль у висновках. Це положення повною мірою поширюється й на оцінку ексергетичної вартості процесів, визначення якої є заключним результатом ексергоекономічного аналізу [4] і є відправним показником як для інвестиційного проекту, так і для оцінки експлуатаційних витрат. Вищенаведене свідчить про відсутність гармонізованої методології оцінки показників енергоощадності СКП, яка має ґрунтуватися на поглибленому ексергоекономічному аналізі з урахуванням складових ексергетичних потоків систем.

Формулювання цілей статті. Ціллю статті є обґрунтування сутності, можливостей і переваг поглибленого ексергоекономічного аналізу в дослідженні систем кондиціонування повітря на прикладі різних схемних рішень та вихідних кліматичних даних. Сутність поглибленого ексергетичного аналізу обґрунтовується через урахування всіх складових ексергії вологого повітря при дослідженні систем. Переваги перед відомими методами дослідження та класичним ексергетичним методом виявляються в отриманні нових якостей – критеріїв ексергетичної ефективності з урахуванням складових ексергії повітря в СКП. До вказаних нових якостей додається економічна оцінка ексергетичних перетворень в СКП, що підтверджує коректність та новизну науково-методологічних положень поглибленого ексергоекономічного аналізу.

Основна частина. Ексергетичний аналіз є універсальним методом з огляду, перш за все, можливості досліджень відмінних за характером процесів. У системах кондиціонування повітря особливість ексергетичних потоків полягає в їхній сумірності. Їхні дослідження потребують особливого підходу, а саме, ураху-

вання всіх складових ексергетичних потоків не тільки повітря, що обробляється, а й потоків, які присутні в кондиціонованому приміщенні. До останніх відносять:

- конвективні:
 - теплові;
 - вологісні;
- променеві:
 - від сонячної радіації (прямі й відбиті);
 - від нагрітих поверхонь;
 - від радіаційних охолоджувачів і нагрівачів.

Вони мають відмінну особливість – порівняно невеликі значення потенціалів. Особливість енергетичних потоків живлення кондиціонера, окрім електричних, полягає в різному агрегатному стані робочих тіл, від якого прямо залежать фізичні ефекти при обробці повітря. Це рідинні тепло- та холодоносії (холодоагенти). Вони можуть змінювати фізичний стан при обробці повітря та теплохолодоносія (холодоагенту) в тепломасообмінних апаратах і повітроводах. Ексергетичні потенціали вказаних потоків мають відносно невеликі значення [10] порівняно з потоками в енергетичних системах. Це потребує більш ретельного аналізу складових ексергетичних потоків.

Дослідження систем кондиціонування повітря проводять в основному із використанням ексергетичних функцій вологого повітря та потоку рідини як базових [7, 10]. Результати аналізу загалом дають коректні результати. Однак на наш погляд в окремих випадках їм бракує більш ретельної оцінки окремих вузлів та процесів. Наприклад, у роботі [11] за результатами аналізу СКП показано значення відносної ексергетичної ефективності для другого підігріву (Re-heating) менше нуля, що суперечить поняттю “коефіцієнт корисної дії” та унеможливує порівняння систем за показниками енергоощадності.

Аналіз результатів розрахунку складових ексергії вологого повітря, які мають місце в СКП, показує, що варто брати до уваги всі наявні складові: термічну, механічну та хімічну, яка представлена концентраційними вологісною та двоокису вуглецю [8]. Їхні значення показують достатню для урахування відмінність однієї від іншої.

Вказане вище говорить про необхідність перегляду підходу до складання балансових рівнянь з урахуванням знаку деструкції потоків складових. Відповідно до рівнянь ексергетичних балансів та функціонального призначення об’єкта дослідження визначають “корисні” й “витратні” складові. При цьому “корисні”

складові вибирають відповідно до нового завдання аналізу – нової якості відповідної складової, – наприклад, парціальної ексергетичної ефективності. На відміну від класичного визначення корисного ефекту при поглибленому аналізі його визначають через абсолютне значення деструкції потоків складових [8, 12].

Прикладом характерного об'єкта з отриманням нових результатів при поглибленому аналізі є поверхневий охолоджувач або камера зрошування, де мають місце ефекти охолодження й осушення повітря одночасно. Визначення їхньої ефективності було проведено за трьома корисними ефектами – охолодження, осушення та двох разом [12]. Це надає змогу більш детально аналізувати, порівнювати й оцінювати кожен з ефектів.

Корисним інструментом поглибленого ексергетичного аналізу є діаграма ексергетичних потоків (рис. 1). З неї видно як змінюються потенціали складових ексергії вологого повітря в СКП при послідовній його обробці. Характерною є ділянка 3-6, де в поверхневому повітроохолоджувачі здійснюється конденсаційне осушення повітря і спостерігається деструкція вологісної, термічної, механічної та повної ексергії повітря. Аналіз деструкцій ексергії вказаного вузла наведений в роботі [12] аргументовано доводить нераціональність процесів обробки – криві ексергетичних потоків повітря характеризуються “піками” й “провалами” в процесах обробки, що підтверджує їхню високу енергомісткість.

З діаграми видно, що некоректно брати до

оцінки ексергетичної ефективності значення деструкції повної ексергії. Наприклад, при порівнянні деструкції складових ексергії з повною ексергією видно, що значення останньої не варто використовувати для аналізу. Вони не показують функціональних деструкцій складових. Наприклад, на ділянці 3-4, де здійснюється сухе охолодження повітря, деструкція “корисної” термічної складової становить 0,5 кДж/кг, а повної – “витратної” – за абсолютним значенням 0,12 кДж/кг, що в понад чотири рази менше.

Відповідне відношення (ексергетична ефективність) “корисної” до “витратної” складових буде набагато більше одиниці, що є нонсенсом.

Як видно з діаграми, величини деструкцій складових ексергії повітря мають різні знаки, що говорить про її векторний характер і підтверджує аналогічне положення з аналізу хімічних процесів [13]. Корисність цієї особливості при поглибленому ексергетичному аналізі СКП стосовно термічної складової нами була доведена в роботі [15]. Це дозволяє визначити вид повітрообміну за знаком деструкції та степінь енергоефективності – за величиною деструкції.

Відносне зіставлення “корисної” ексергії повітря до “витратної” варто характеризувати як ефективність “нетто”. Її доцільно використовувати в СКП при попередньому аналізі енергоефективності процесів обробки повітря, наприклад, на стадії проектування.

У загальному вигляді ексергетична ефективність “нетто” буде мати вигляд

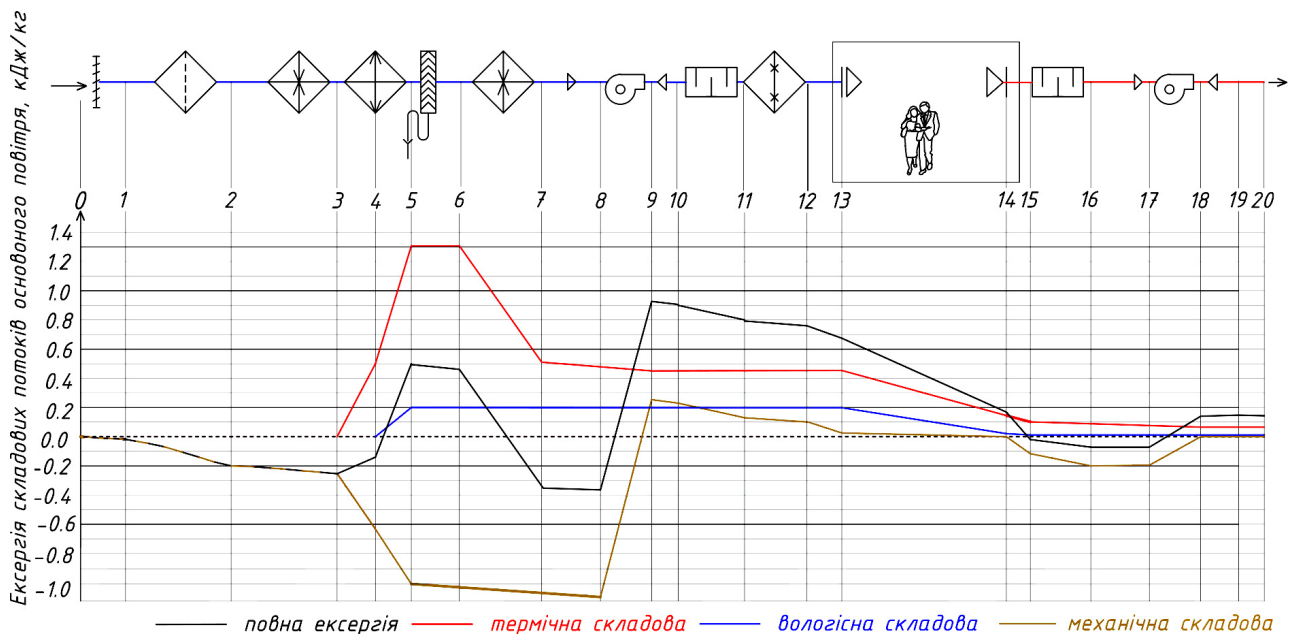


Рис. 1. Діаграма ексергетичних потоків основного повітря в центральній СКП для теплового розрахункового періоду 0 ... 20 – ділянки системи

$$\eta_{ex}^{net} = \frac{\sum_i |\Delta Ex_i|}{\sum_j |\Delta Ex_j|}, \quad (1)$$

де ΔEx_i – “корисні” та ΔEx_j – “витратні” складові ексергетичного потоку, кДж/кг, основного повітря, що обробляється в елементах СКП.

У формулі (1) беруть до уваги ексергію основного потоку повітря і не враховують ексергію від підведених потоків (рециркуляційне повітря, теплоносій, холодоносій, електроенергія тощо) [14].

З діаграми (рис. 1) видно, як розподіляються складові ексергетичних потоків повітря в приміщенні (ділянка 13-14). Характерним для цієї ділянки є те, що всі ексергетичні потенціали мають позитивний знак як на початку, так і в кінці процесу повітрообміну.

Найбільший потенціал як на вході “in” (т. 13) так і на виході “l” (т. 14) має повна ексергія повітря, найменший – механічна, оскільки всі складові мають позитивний знак, а повна ексергія є сумою всіх складових. Для цього випадку при підрахунку ефективності “нетто” за “витратну” можна брати деструкцію повної ексергії $\Delta Ex_{повн}$, а за “корисну” – обрану складову. Тоді формула (1) набуде вигляду:

$$\eta_{ex}^{net} = \frac{\Delta Ex_i^{in-l}}{\Delta Ex_{повн}}. \quad (2)$$

Цим рівнянням варто користуватися при визначенні парціальної ексергетичної ефективності “нетто” стосовно обраної складової i .

Величина в чисельнику рівняння (2) фактично є енергетичним показником асиміляційної здатності вентиляційного повітря. Вона показує скільки витрачено ексергії повітрям на здійснення процесу повітрообміну – асиміляцію надлишків шкідливих потоків. Результати дослідження термічної складової ексергетичної функції повітря при асиміляції надлишків теплоти в приміщенні наведено в роботі [15], де аргументовано доведено вищенаведене положення.

Для кондиціонування повітря громадських та адміністративних будівель як “корисні” може бути прийнято термічну, вологісну складові та двоокису вуглецю.

Як видно з діаграми та відповідно до попередніх міркувань, характерною особливістю підрахунку ексергетичної ефективності є те, що значення деструкції як “корисних” ΔEx_i , так і “витратних” ΔEx_j потоків основного

повітря підсумовують за абсолютними величинами. Ця особливість характерна, наприклад, для поверхневого охолоджувача, де здійснюється одночасно охолодження й осушення повітря. Ексергія потоку основного повітря в цьому вузлі набуває від’ємного значення, а деструкція збільшує її [12]. Таке само спостерігається, наприклад, на ділянці 6-7 (другий підігрів).

Деструкція ексергетичного потоку холодоносія, що підводиться до поверхневого охолоджувача, також може бути від’ємною завдяки збільшенню температури та зменшенню тиску після охолоджувача [8].

Характерним випадком наявності ексергетичних потенціалів повітря різних знаків у одному функціональному вузлі є вентилятор СКП. На ділянках 8-9 та 17-18 спостерігається перехід кривої механічної складової ексергії з від’ємного потенціалу на додатний.

Крива механічної складової ексергії повітря на діаграмі за характером зміни ідентична епюрі повного тиску нагнітача в мережі. Спостерігається деструкція тільки механічної складової, якщо нехтувати незначною деструкцією термічної за рахунок збільшення температури повітря, якщо це має місце.

За “корисну” беруть різницю ексергетичних потенціалів на вході й на виході повітря вентилятора, а за “витратну” – енергію на валу привода Ex_{dr} , кДж/кг, яка відповідно до властивості електричної енергії дорівнює ексергії [7]. Для визначення ексергетичної ефективності вентилятора варто використовувати залежність

$$\eta_{ex}^{fan} = \frac{\Delta Ex^{out-in}}{Ex_{dr}}. \quad (3)$$

Однією з переважних властивостей ексергетичного методу є адитивність фізичних величин, якими характеризується об’єкт досліджень, що при поглибленому аналізі дало можливість отримати й оцінити нові якості. При повітрообміні відбувається процес турбулентного переносу різних за природою, фізичним станом та параметрами потоків теплоти, вологого повітря та домішок хімічних речовин. Ці потоки в інженерній практиці усталено визначають через різні розмірності, зручні для інженерних розрахунків – концентрацію (масову та об’ємну), тепловий потік, температурний напір, потужність тощо.

Визначення вказаних потоків через одиниці ексергії відкрило нові можливості дослідже-

ння енергоощадності схемних рішень розподілу повітря, які представлено новими якісними характеристиками повітрообміну. Так, наприклад, за результатами досліджень поведінки функції термічної складової ексергетичного потоку вологого повітря в межах кондиціонованого приміщення отримано коректні чисельні результати з оцінкою деструкції в процесі повітрообміну. Це дало можливість аналітично визначати за значенням та знаком деструкції види повітрообміну та ступінь енергоефективності [15].

Те саме стосується хімічних складових – вологісної концентраційної та двоокису вуглецю. Ці нові якості – величина та знак деструкції ексергії – надають можливість коректно розраховувати й визначати енергоощадні схеми організації повітрообміну.

Ексергетичний аналіз СКП передбачає припущення, що деструкція основного потоку повітря в СКП можлива тільки за рахунок незворотності. Це означає, що ентропія в її класичному розумінні як розсіювання теплоти в навколишнє середовище відсутня [7]. Такий висновок витікає з того, що обладнання СКП зазвичай добре теплоізольоване, а перепад температури є незначним. Тоді теплообміном між повітрям всередині обладнання та навколишнім середовищем можна нехтувати.

За відносним показником ексергетичної ефективності “брутто” варто оцінювати показники енергоощадності СКП при виборі варіантів енергопостачання. Оцінюють деструкцію всіх “вторинних” (витратних) потоків та їхніх складових, які впливають на основний – повітря, що обробляється в СКП. Інженерні залежності, зручні для визначення цих потоків, наведено в роботі [10].

У роботі [8] наведено результати поглибленого ексергетичного аналізу з оцінкою деструкції потоків рециркуляційного повітря, холодоносія, теплоносія, променевих потоків та електричної енергії при порівнянні двох варіантів місцевих пристроїв СКП. Характерним прикладом у вказаних результатах аналізу є обґрунтування вибору “корисного” ефекту, як складеного з величин деструкції ексергії вентиляційного повітря та променевого потоку радіаційної панелі, оскільки ці потоки формують комфортні умови в приміщенні. За результатами аналізу радіаційну панель визначено більш ефективною за фанкойл у теплий період та приблизно однакової ефективності – у холодний. Загальний вид формули для ексергетичної ефективності “брутто”

$$\eta_{ex}^{brt} = \frac{\sum_i |\Delta Ex_i|}{\sum_k |\Delta Ex_k|}, \quad (4)$$

де ΔEx_k – “витратні” деструкції потоків енергоносіїв, кДж/с.

За результатами оцінки значень деструкції всіх видів ексергії при поглибленому аналізі СКП оцінюють найбільш економічно вигідні рішення з урахуванням ціни ексергії кожної складової. Поєднання термодинамічного аналізу з економічним дає можливість не тільки оптимального проектування СКП, а й коригування її роботи при моніторингу.

Сучасна теорія *термоекономіки* базується на методі *SPECO* (*SP*ecific *E*xergy *CO*sting), що “об’єднує” ексергію з економікою показником ексергетичної вартості для потоку [4]

$$C_i = c_i E_i = c_i (g_i e_i), \text{ грн/с}, \quad (5)$$

де c_i – вартість ексергії, грн/кДж; g_i – масовий потік речовини, кг/с; e_i – питома ексергія потоку, кДж/кг.

У запропонованому нами варіанті поглибленого ексергоекономічного аналізу для СКП показником ексергетичної вартості потоку C_i , грн/с, доцільно користуватися як накопичувальним суми вартості деструкцій в усіх функціональних елементах системи. Такий метод дає можливість послідовно (за ходом потоку повітря) аналізувати накопичені значення ексергетичної вартості повітряного потоку в СКП. Результатом такого аналізу є накопичена ексергетична вартість відповідного схемного рішення, яка показує ексергетичні й економічні показники.

Для СКП з традиційним конденсаційним методом осушення повітря (рис. 2) подано графічне зображення інтегральної потокової діаграми ексергетичної вартості, яка демонструє вказаний метод (рис. 3). Подібна оцінка доцільна для порівняння проектних рішень за певної можливої невизначеності результатів ексергетичного аналізу та при підготовці інвестиційних пропозицій. Так, наприклад, у роботі [16] подано результати ексергоекономічних розрахунків при виборі схемного рішення обробки повітря в СКП для приміщення фармацевтичної промисловості. Було проаналізовано три схемні рішення СКП з різними варіантами осушення повітря: адсорбційним, конденсаційним та комбінованим – адсорбційним з конденсацією.

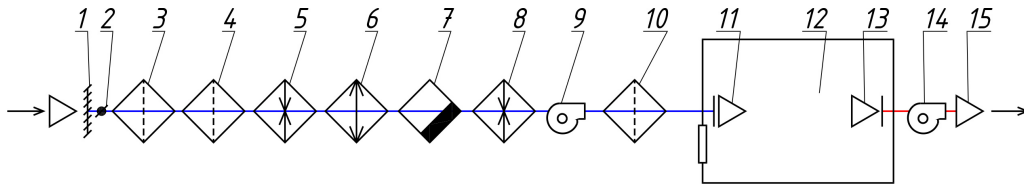


Рис.2. Схема СКП з конденсаційним методом осушення повітря
 1 – повітрязабірна решітка; 2 – заслінка; 3,4,10 – фільтри; 5,8 – поверхневі нагрівачі повітря;
 6 – поверхневий охолоджувач повітря; 7 – каплевловлювач; 9,14 – вентилятор; 12 – приміщення
 11,13 – припливна та витяжна решітки в приміщенні; 15 – викид назовні

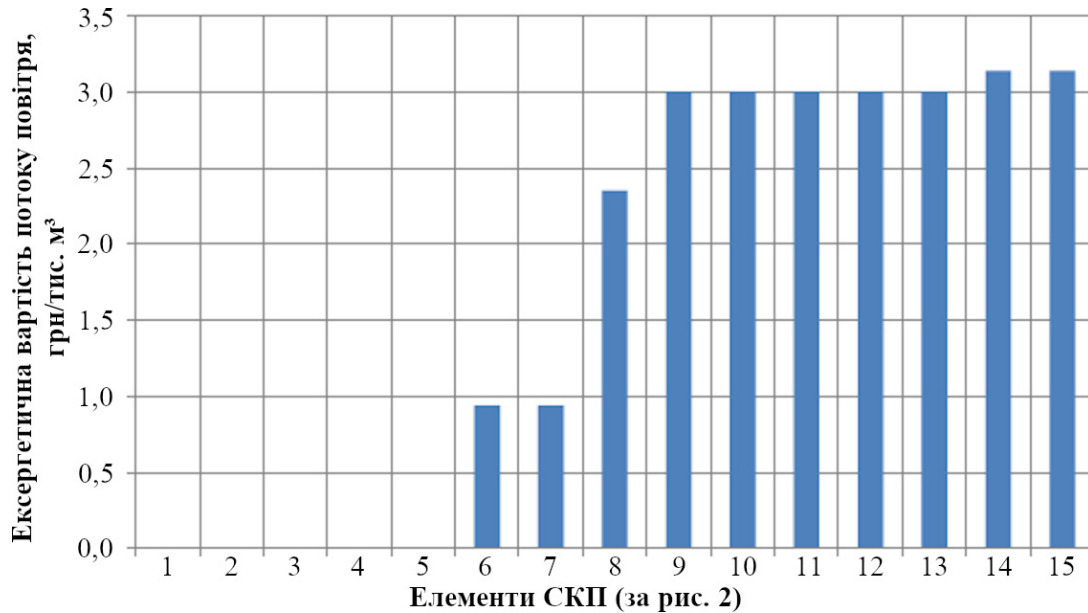


Рис. 3. Інтегральна потокова діаграма ексергетичної вартості повітря в СКП з конденсаційним методом осушення

Найбільш характерним прикладом вказаного методу аналізу є інтегральна потокова діаграма ексергетичної вартості для традиційного конденсаційного методу осушення повітря (рис. 3). Вона побудована для теплого періоду року. З діаграми видно поелементне накопичення ексергетичної вартості потоку основного повітря при послідовній його обробці в системі.

Розрахунки ексергетичної вартості потоку обробленого в СКП повітря в грн/1000 м³ проведено за формулою

$$C_{ex} = 1000 \sum E_{en}^{Tot} \rho_a C_{en}, \text{ грн/тис. м}^3, \quad (6)$$

де E_{en}^{Tot} – сумарне питоме значення підведеної до повітря ексергії, кДж/кг повітря; ρ_a – густина повітря, кг/м³; C_{en} – вартість ексергії електричної енергії, грн/кДж [17].

Спостерігається характерне збільшення вартості з шостого елемента – охолодження з конденсацією – та з восьмого – другий підігрів. Кінцева вартість для даної схеми склала 3,25 гривні на 1000 м³ повітря. За значенням кі-

нцевої накопиченої (повної) ексергетичної вартості повітря (15 елемент системи) вибирають відповідне схемне рішення для подальшої розробки.

Висновки. Подані в статті узагальнені положення щодо методології оцінки енергоощадних показників СКП на основі поглибленого ексергоекономічного аналізу є корисним інструментом для оцінки ступеню енергоощадності функціональних вузлів, елементів та СКП в цілому, включаючи приміщення, що ними обслуговуються та претендують на узагальнення й застосування в науковій та інженерній практиці. Наведені основні положення методології разом із посиланнями на джерела є достатніми для залучення фахівців для участі в оцінці й оптимізації роботи СКП щодо енергоефективності.

Перспективи подальших досліджень. У подальших роботах з цієї тематики планується оцінка сезонних показників енергоощадності СКП із застосуванням методів поглибленого ексергоекономічного аналізу. Крім того, плануються дослідження поведінки ексергетичних функцій в елементах СКП.

Література

1. Закон України "Про енергетичну ефективність будівель" від 22.06.2017 №2118-VIII [Електронний ресурс]. Режим доступу: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/2118-19>.
2. 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: Мінрегіонбуд України, 2008. – V, 14 с.
3. Методика обстеження інженерних систем будівлі [Електронний ресурс]. Режим доступу: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/z0826-18/page2/print>.
4. Тсатсароннс Д. Взаимодействие термодинамики и экономики для минимизации стоимости энергопреобразующей системы / Тсатсароннс Д. – Одесса: Студия «Негоциант», 2002. – 152 с.
5. Low Exergy Systems for High-Performance Buildings and Communities. Annex 49 Final Report [Електронний ресурс]. – URL: <https://www.annex49.info/download/Annex49guidebook.pdf>.
6. Морозюк Т. В. Углубленный эксергетический анализ – современная потребность оптимизации энергопреобразующих систем / Т. В. Морозюк, Д. Тсатсаронис // Промышленная теплотехника. – 2005. – Т.27. – №2. – С.88-92.
7. Бродянский В. М. Эксергетические расчеты технических систем: Справ.пособие / В. М. Бродянский, Г. П. Верховикер, Я. Я. Карчев и др. – Киев: Наукова Думка, 1991. – 360 с. – ISBN 5-12-0011397-X.
8. Задоянний О. В. Порівняльний эксергетичний аналіз пристроїв із створення мікроклімату офісних приміщень / О. В. Задоянний, О. О. Товстограй // Вентиляція, освітлення та теплогазопостачання: наук.-техн. зб. / Київський національний університет будівництва і архітектури. – 2019. – Вип. 28. – с. 17-27. <https://doi.org/10.32347/2409-2606.2019.28.17-27>
9. Лабай В. Й., Гарасим Д. І. Дослідження эксергоефективності та шляхів енергозбереження системи кондиціонування повітря операційних чистих кімнат // Холодильна техніка та технологія. – 2015. – Т. 51, вип. 4. – С. 53-59. <https://doi.org/10.15673/0453-8307.4/2015.48627>
10. Задоянний О. В. Види эксергії в системах кондиціонування повітря та їх визначення / О. В. Задоянний, Ю. М. Євдокименко // Вентиляція, освітлення та теплогазопостачання: наук.-техн. зб. / Київський національний університет будівництва і архітектури. – 2016. – Вип. 19. – с. 3-15.
11. Marletta L. Air Conditioning Systems from a 2-nd Law Perspective / L. Marletta // Entropy. – 2010. – no 12. – P. 859-877. <https://doi.org/10.3390/e12040859>
12. Задоянний, О. В. Особливості визначення эксергетичної ефективності вузла «повітроохолоджувач-каплевловлювач-повітронагрівач» прямої токової СКП з використанням діаграми потоків эксергії вологого повітря / О. В. Задоянний, Ю. М. Євдокименко // Енергоефективність в будівництві та архітектурі: наук.-техн. зб. / Київський національний університет будівництва і архітектури. – 2015. – Вип. 7. – с. 95-103.
13. Sato N. Chemical Energy and Exergy: An Introduction to Chemical Thermodynamics for Engineers. / N. Sato. – Elsevier Science & Technology Books, 2004. – 149 p.
14. Задоянний О. В. Эксергетичні критерії при оцінці енергоощадності систем кондиціонування повітря будівель і споруд / О.В.Задоянний // Вентиляція, освітлення та теплогазопостачання:- наук.-техн. зб. / Київський національний університет будівництва і архітектури. – 2014. – Вип. 17. – с. 3-9.
15. Задоянний, О. В. Дослідження функції термічної складової эксергетичного потоку вологого повітря в кон-диціонованому приміщенні / О. В. Задоянний // Вентиляція, освітлення та теплогазопостачання: наук.-техн. зб. / Київський національний університет будівництва і архітектури. – 2018. – Вип. 19. – с. 19-24.
16. Zadoyanny O. V. Exergoeconomic Analysis of Air Cooling Systems / O. V. Zadoyanny, Y. M. Yevdokymenko // Вентиляція, освітлення та теплогазопостачання. – 2016. – Вип. 20. – С. 14-23.
17. Роздрібні тарифи для споживачів електричної енергії у місті Києві. – [Електронний ресурс]. – URL: <http://kyivenergo.ua/ee-company/>

References

1. Zakon Ukrainy "Pro enerhetychnu efektyvnist budivel" vid 22.06.2017 №2118- VIII. <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/2118-19>
2. *Systema zabezpechennia nadiinosti ta bezpeky budivelnykh ob'ektiv. Osnovni vymohy do budivel i sporud ekonomiiia enerhii.* DBN V.1.2-11-2008. Minrehionbud Ukrainy, 2008.
3. *Metodyka obstezhennia inzhenernykh system budivli.* <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/z0826-18/page2/print>
4. Tsatsaronys D. *Vzaimodeistvie termodinamiki i ekonomiki dlia minimizatsii stoimosti energopreobrazuiushchei sistemy.* Studia «Negotsiant», 2002.
5. *Low Exergy Systems for High-Performance Buildings and Communities. Annex 49 Final Report.* <https://www.annex49.info/download/Annex49guidebook.pdf>
6. Moroziuk T.V., Tsatsaronys D. "Uglublennyi eksergetycheskii analiz – sovremennaia potrebnost optimizatsii energopreobrazuiushchikh sistem." *Promyshlennaia teplotekhnika.* 2005. T.27. №2. P. 88-92.
7. Brodianskyi V. M., Verkhyvker H. P., Karchev Ya. Ia. i dr. *Eksergetycheskie raschety tekhnicheskikh sistem.* Naukova Dumka, 1991. ISBN 5-12-0011397-X.

8. Zadoiannyi O. V., Tovstohrai O. O. "Porivnialnyi ekserhetychnyi analiz prystroiv iz stvorennia mikroklimatu ofisnykh prymishchen." *Ventyliatsiia, osviltennia ta teplofazopostachannia: nauk.-tekhn. zb.* 2019. Vyp. 28. P. 17-27. <https://doi.org/10.32347/2409-2606.2019.28.17-27>
9. Labai V. Y., Harasym D. I. "Doslidzhennia ekserhoefektyvnosti ta shliakhiv enerhozberezhennia systemy kondytsionuvannia povitria operatsiinykh chystykh kimnat." *Kholodyna tekhnika ta tekhnolohiia.* 2015. T. 51, vyp. 4. P. 53-59. <https://doi.org/10.15673/0453-8307.4/2015.48627>
10. Zadoiannyi O. V., Yevdokymenko Yu. M. "Vydy ekserhii v systemakh kondytsionuvannia povitria ta yikh vyznachennia." *Ventyliatsiia, osviltennia ta teplofazopostachannia: nauk.-tekhn. zb.* 2016. Vyp. 19. P. 3-15.
11. Marletta L. "Air Conditioning Systems from a 2-nd Law Perspective." *Entropy.* 2010. no 12. P. 859-877. <https://doi.org/10.3390/e12040859>
12. Zadoiannyi O. V., Yevdokymenko Yu. M. "Osoblyvosti vyznachennia ekserhetychnoi efektyvnosti vuzla «povitrookholodzhuvach-kaplevlovliuvach-povitronahrivach» priamotokovoi SKP z vykorystanniam diahramy potokiv ekserhii volohoho povitria." *Enerhoefektyvnist v budivnytstvi ta arkhitekturi: nauk.-tekhn. zb.* 2015. Vyp.7. s. 95-103.
13. Sato N. *Chemical Energy and Exergy: An Introduction to Chemical Thermodynamics for Engineers.* Elsevier Science & Technology Books, 2004.
14. Zadoiannyi O. V. "Ekserhetychni kryterii pry otsyntsi enerhooshchadnosti system kondytsionuvannia povitria budivel i sporud." *Ventyliatsiia, osviltennia ta teplofazopostachannia: nauk.-tekhn. zb.* 2014. Vyp. 17. P. 3-9.
15. Zadoiannyi, O. V. "Doslidzhennia funktsii termichnoi skladovoi ekserhetychnoho potoku volohoho povitria v kon-dytsionovanomu prymishchenni." *Ventyliatsiia, osviltennia ta teplofazopostachannia: nauk.-tekhn. zb.* 2018. Vyp. 19. P. 19-24.
16. Zadoiannyi O. V., Yevdokymenko Yu. M. "Exergoeconomic Analysis of Air Cooling Systems." *Ventyliatsiia, osviltennia ta teplofazopostachannia: nauk.-tekhn. zb.* 2016. Vyp. 20. P. 14-23.
17. Rozdribni taryfy dlia spozhyvachiv elektrychnoi enerhii u misti Kyevi. <http://kyivenergo.ua/ee-company/>

УДК 697.94

Обоснование углублённого эксергоэкономического анализа систем кондиционирования воздуха

А. В. Задоянный¹

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

Аннотация. Системы кондиционирования воздуха (СКВ) является наиболее энергоёмкими среди систем обеспечения микроклимата помещений. Они потребляют все виды энергии, которые производят энергогенерирующие компании. На сегодняшний день не разработана корректная гармонизированная методология анализа и оптимизации энергопотребления систем кондиционирования воздуха. Относительно невысокие значения термодинамических потенциалов при преобразовании материальных и энергетических потоков СКП требуют анализа всех составляющих эксергии влажного воздуха систем. Этими составляющими являются термическая, механическая и химические концентрационные: влажностная и двуокиси углерода. Анализ указанных составляющих показывает их соизмеримость и требует корректного учёта при проведении эксергоэкономического анализа. Результаты углублённого эксергоэкономического анализа показывают новые качества СКП и их элементов в виде относительных и абсолютных характеристик энергоэффективности. Им стоит пользоваться при оптимизации систем по критериям минимизации энергопотребления, при конструировании энергоэффективных схемных решений СКП и для мониторинга при эксплуатации.

Ключевые слова: кондиционирование воздуха, эксергетический анализ, влажный воздух, балансовое эксергетическое уравнение; эксергетическая эффективность, эксергетическая потоковая диаграмма; эксергоэкономический анализ; эксергетическая стоимость потока.

UDC 697.94

Grounding of in-depth exergoeconomic analysis of air conditioning systems

O. Zadoiannyi¹

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

Abstract. Air-conditioning systems are the most energy-intensive of the indoor climate systems. They consume all types of energy produced by energy generating companies. Traditional methodological approaches to the estimation of exergy efficiency do not produce correct results. Ukrainian national standards do not sufficiently provide methodologies for assessing the energy efficiency of air conditioning systems for buildings. A harmonized methodology is required to properly assess the energy consumption of these systems. The relatively low values of the thermodynamic potentials in these systems require the analysis of all components of the wet air exergy, which are thermal, mechanical and chemical: humidity and carbon dioxide. An in-depth exergy analysis, taking into account all the components of moist air exergy, reveals new qualities and determines the partial characteristics in the performance indicators of systems and elements. The analysis of the behavior of the thermal exergy component during the air exchange in the room determines the type of air exchange and energy costs. The analysis of all components shows their commensurability and needs to be properly taken into account in the exergo-economic analysis. The results of in-depth exergo-economic analysis show the new qualities of HVAC systems and their elements in the form of relative and absolute energy-efficiency characteristics. They should be used for optimization of the systems (according to the criteria of minimizing energy consumption), design of the energy-efficient solutions and monitoring the energy consumption during operation of the systems. The research results presented in this article are based on real systems data. Methods for determining the performance of systems have been tested when designing and creating new solutions for the systems

Keywords: Air conditioning, exergy analysis, wet air, balance exergy equation; exergy efficiency; exergy flowcharts; exergoeconomic analysis; exergy flow cost.

Надійшла до редакції / Received 02.10.2019.