

УДК 697.94

## Ексергетична ефективність системи кондиціонування повітря з адсорбційним осушенням та регенерацією адсорбенту теплотою конденсації для приміщень арбітражного зберігання ліків

О. В. Задоянний<sup>1</sup>, Ю. М. Євдокименко<sup>2</sup>

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

<sup>2</sup>асп., Київський національний університет будівництва і архітектури, м. Київ, Україна, bonnesante91@gmail.com  
ORCID: 0000-0002-1154-5108

*Анотація. Інженерні системи забезпечення мікроклімату будівель і споруд є суттєвими споживачами електричної та теплової енергії різного температурного рівня. Серед них системи кондиціонування повітря різного призначення за показником енергоспоживання є найменш оціадними. При їхньому проектуванні не завжди приділяється належна увага оцінці ступеня їхньої енергоефективності та не проводиться варіантне проектування з порівнянням відповідних показників. Ексергетичний метод аналізу технічних систем забезпечує коректну чисельну оцінку енергоефективності та можливість порівняльного аналізу схемних рішень на різних стадіях. Однак, його поширенню бракує коректних інженерних методик. У даній статті наведено приклад ексергетичного аналізу при проектуванні системи кондиціонування повітря для фармацевтичного виробництва з метою вибору найліпшого за показниками енергоефективності джерела теплоти для регенерації адсорбенту. Результати аналітичних досліджень подано у вигляді відносних значень ексергетичної ефективності та питомих значень ексергії повітря при його обробці, які є зручними для коректного порівняння й подальшого аналізу. У статті показано як за допомогою ексергетичних потокових діаграм складових ексергії вологого повітря визначити деструкцію ексергії та найбільш енергомісткі процеси в системі. Послідовний чисельний ексергетичний аналіз є дієвим і корисним інструментом для визначення показників енергоефективності кондиціонування повітря при проектуванні.*

*Ключові слова: кондиціонування повітря; адсорбційні системи; фармацевтичне виробництво; ексергетичний аналіз; десорбція; теплота конденсаторів холодильних машин.*

**Вступ.** Системи кондиціонування повітря (СКП) різного призначення споживають енергоресурси обсягом, який закладено в проектних рішеннях. Цей обсяг відповідає прийнятним рішенням щодо створення та підтримання відповідних комфортних, або технологічних параметрів повітря.

Для забезпечення цих параметрів у СКП здійснюються термодинамічні процеси охолодження, нагрівання, зволоження та осушення повітря. Указані процеси постійно удосконалюються з метою підвищення ефективності й одночасного зменшення енергоспоживання.

До вказаних процесів та відповідного обладнання для їхнього здійснення регламентовано вимоги державного стандарту [1]. За цим стандартом визначення ефективності споживання енергії зазначеним обладнанням, функціональними елементами, групами елементів та системами повинно визначатися за допомогою коефіцієнта корисної дії.

Аналогом коефіцієнта корисної дії стосовно більшості енергетичних процесів та вище зазначених є ексергетичний коефіцієнт корисної дії. Методологія визначення його та інших показників ексергетичного аналізу базується на законах сучасної нерівноважної термодинаміки [2].

Процеси обробки повітря в СКП мають специфічні особливості, які потребують відповідного підходу. Головна їхня особливість полягає в тому, що потік ексергії вологого повітря, який обробляється в СКП, містить сумірні складові – термічну, механічну та хімічну (концентраційну вологісну) [3].

Кожна з указаних складових у процесі обробки повітря змінює знак і набуває різних значень. Це дає змогу чисельно оцінювати енергоощадність відповідних процесів: нагрівання, охолодження, осушення, зволоження тощо.

Кожна складова або їхня сума чи різниця в певних функціональних вузлах, елементах або системі в цілому може бути:

- “корисною”, відносно якої визначають ексергетичну ефективність;
- “витратною”, яка враховується як витрачена на здійснення відповідного процесу.

Крім ексергії повітря – основного ексергетичного потоку – потрібно аналізувати ексергетичні потоки енергоносіїв, які живлять систему, – теплохолодоносії, електрична енергія тощо. В окремих випадках слід враховувати й радіаційні потоки, які наявні в основному в кондиціонованих приміщеннях [4].

Вищенаведене вказує на існування методологічної проблеми оцінки вказаних вище показників енергоощадності СКП.

**Актуальність дослідження.** Проблема енергоефективності в Україні переросла в кризу енергоспоживання. Нераціональна експлуатація технічних систем забезпечення мікроклімату будівельних об'єктів часто призводить до значного відхилення від нормованих параметрів – температури приміщень, відносної вологості, повітрообміну тощо. Ці явища сприяють, серед іншого:

- збільшенню захворюваності людей у разі порушення санітарних норм в громадських та житлових приміщеннях;
- зниженню продуктивності праці;
- порушенню технологічних регламентів у виробничих приміщеннях;
- зменшенню експлуатаційної надійності будівельних об'єктів;
- руйнуванню будівельних конструкцій усіх видів будівель тощо.

У новому будівництві багато проблем із енергоощадністю інженерних систем вирішують завдяки сучасним досконалим системам регулювання та схемним рішенням. Однак подальшому їхньому вдосконаленню в напрямку енергоефективності бракує інженерного методичного забезпечення задля коректного визначення відповідних показників енергоощадності [5]. Ця обставина стосується не тільки СКП, як найбільш енергомістких, а й систем опалення, вентиляції, тепло- та газопостачання тощо.

**Останні дослідження та публікації.** Ексергетичний аналіз дозволяє коректно визначити перетворення ексергетичних потоків у СКП. На цій основі можливо отримати відповідні значення деструкцій, втрат та витрат ексергії, на підставі яких визначають відносні й абсолютні значення енергоощадності системи.

Подібні до цього алгоритму результати наведено в небагатьох роботах для різних схемних рішень та призначень СКП. Найбільш характерними прикладами є роботи [6, 7], у яких наведено результати ексергетичного аналізу СКП відповідно до завдання – оцінки загальної ексергетичної ефективності систем.

У роботі [8] наведено результати ексергетичного аналізу із деталізацією за структурними елементами системи – повітроохолоджувачем, повітронагрівачем, змішувачами та приміщенням. У роботі [9] наведено корисні методичні положення щодо ексергетичних обчислень основних психрометричних процесів, наявних у СКП, – нагріванню, охолодженню, осушенню

та зволоженню повітря.

У кожній з указаних робіт ексергетична ефективність СКП визначається різним чином відповідно до конкретного завдання аналізу із використанням та відповідним обґрунтуванням методик. У даній статті, на відміну від зазначених, об'єктом досліджень прийнято складові ексергетичних потоків повітря СКП та джерела енергопостачання системи.

**Формулювання цілей статті.** У даній роботі подано результати поглибленого ексергетичного аналізу варіантів теплопостачання теплообмінників для регенерації сорбенту та другого підігріву повітря від конденсатора холодильної машини та від теплової мережі. Порівняння вказаних варіантів проведено на стадії проектування адсорбційної СКП фармацевтичного виробництва з метою визначення показників енергоощадності системи.

**Основна частина.** Визначено [6-9], що ексергетичний метод має достатньо ефективні можливості при аналізі як систем в цілому, так і окремих функціональних елементів, вузлів, процесів тощо. Крім того виникає можливість покрокового розрахунку систем. Спочатку аналізують процеси обробки основного повітря з метою отримання оптимального схемного рішення СКП – компонування обладнання, послідовності обробки повітря тощо. Потім розраховують ефективність енергопостачання СКП. На першому етапі:

- використовують *I-d*-діаграму для обчислення ексергетичних потоків повітря в процесах;
- будують діаграму ексергетичних потоків повітря за складовими системи;
- визначають ділянки максимальних витрат ексергії – піки та провалини потоків діаграми [10];
- отримують відносні значення ефективності "нетто"[5].

Після визначення найліпшого варіанту схемного рішення за останнім показником обраховують відповідний варіант енергопостачання за критерієм ексергетичної ефективності "брутто".

Розрахунок ексергетичної ефективності СКП, зазвичай, проводять за методикою [2, 7, 8], яка не зовсім коректна в частині визначення витратної та корисної ексергії. Нами в роботах [4; 5] було подано й доведено більш коректне визначення вказаних величин. У даній роботі розрахунки проведено за відповідною методикою.

Для визначення ефективності схемного рішення СКП варто обраховувати ЕККД «нетто»

із залежності [5]:

$$\eta_E^{net} = \frac{\Delta E_{wz}}{E_{ext-in} + E_{\ell-env}}, \quad (1)$$

$$\eta_E^{net} = \frac{\Delta E_{wz}}{\sum E_{ext-in} + \sum E_{\ell-env}}, \quad (2)$$

де  $\Delta E_{wz}$  – корисно витрачена ексергія всіх складових повітря в приміщенні, кВт;  $\sum E_{ext-in}$  та  $\sum E_{\ell-env}$  – відповідно, витрачена сумарна ексергія повітря, кВт, в обладнанні СКП перед подачею в приміщення та після нього, Вт.

Величина  $\Delta E_{wz}$ , кВт, визначається за різницею значень ексергії, кВт, у припливному (*in*) і витяжному (*ℓ*) повітрі. Витратна ексергія в знаменнику формули (2) визначається як сума витраченої ексергії повітря в  $i = 1 \dots n$  та  $j = m$  елементах СКП:

$$\sum E_{ext-in} = \sum_{i=1}^n \Delta E_{a,i}, \text{ Вт}, \quad (3)$$

$$\sum E_{\ell-env} = \sum_j^m \Delta E_{a,j}, \text{ Вт}, \quad (4)$$

де  $\Delta E_{a,i}$  та  $\Delta E_{a,j}$  – витрачена ексергія, кВт, повітря, відповідно, в  $n$  елементах СКП перед приміщенням та  $m$  елементах після нього.

Ефективність використання підведеної зовні ексергії характеризується ЕККД «брутто» і визначається із залежності:

$$\eta_E^{brt} = \frac{\Delta E_{wz}}{\sum_{i=1}^n E_i}, \quad (5)$$

де  $E_i$  – підведена централізовано ексергія до  $i$ -го елемента від зовнішніх джерел, кВт.

У даній роботі розглянуто СКП для обслуговування приміщення арбітражного зберігання зразків фармацевтичної промисловості. За технічними умовами в приміщенні потрібно підтримувати цілодобово відносну вологість повітря в діапазоні  $\phi = 10 \dots 30 \%$  та температуру повітря  $t = 20 \pm 0,5 \text{ }^\circ\text{C}$  протягом усього терміну зберігання.

Продуктивність СКП  $L = 13695 \text{ м}^3/\text{год}$ , що забезпечує вимоги до повітрообміну для класу чистоти  $D$  ( $GMP \text{ EU}$ ) – кратність повітрообміну  $20 \text{ год}^{-1}$ .

При виборі схемного рішення СКП було проведено попередній порівняльний ексергетич-

ний аналіз двох різних схем обробки повітря з різними способами осушення – традиційним конденсаційним та комбінованим конденсаційно-адсорбційним [11]. Порівнювалися сумарні витрати ексергії за даними термодинамічних потенціалів процесів обробки повітря в системах за  $I-d$ -діаграмою.

За результатами аналізу надано перевагу конденсаційно-адсорбційному способу (рис. 1), який споживає на 9,2 % менше ексергії теплоти, що йде на другий підігрів, за умови використання теплоти від конденсатора холодильної машини.

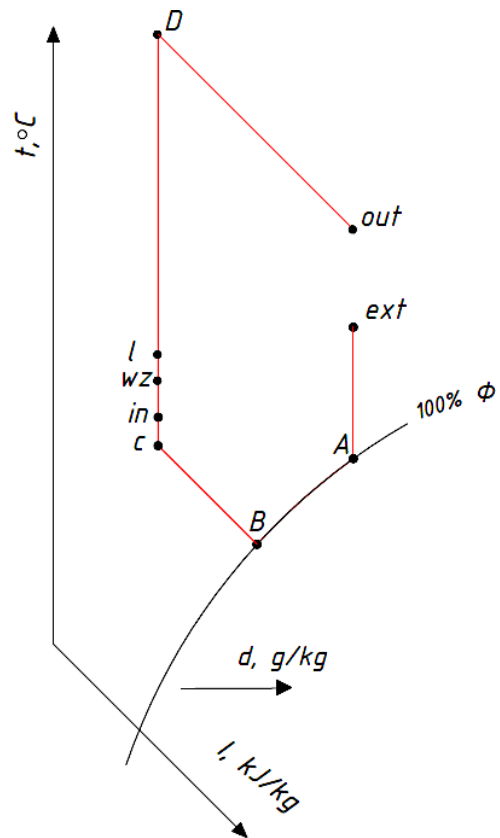


Рис.1. Процес обробки повітря в СКП в теплий період року:

*ext-A* – «сухе» охолодження в поверхневому повітроохолоджувачі; *A-B* – охолодження з частковим осушенням у поверхневому повітроохолоджувачі; *B-C* – адсорбційне осушення в адсорбері 9; *C-in* – підігрів у вентиляторі; *in-wz-ℓ* – процес у приміщенні; *ℓ-D* – нагрівання відпрацьованого повітря в нагрівачі повітря до температури десорбції  $t_D = 60^\circ\text{C}$ ; *D-E* – процес десорбції в адсорбері

Для зручного й коректного визначення корисної та витраченої ексергії в СКП (рис. 2) складено й використано діаграму ексергетичних потоків складових ексергії вологого повітря, що на рис. 3 [10]. Параметри повітря відповідають табл. 1.

На діаграмі (рис. 3) зображено зміну ексергетичних потенціалів основних складових ексергії вологого повітря – термічної, воло-

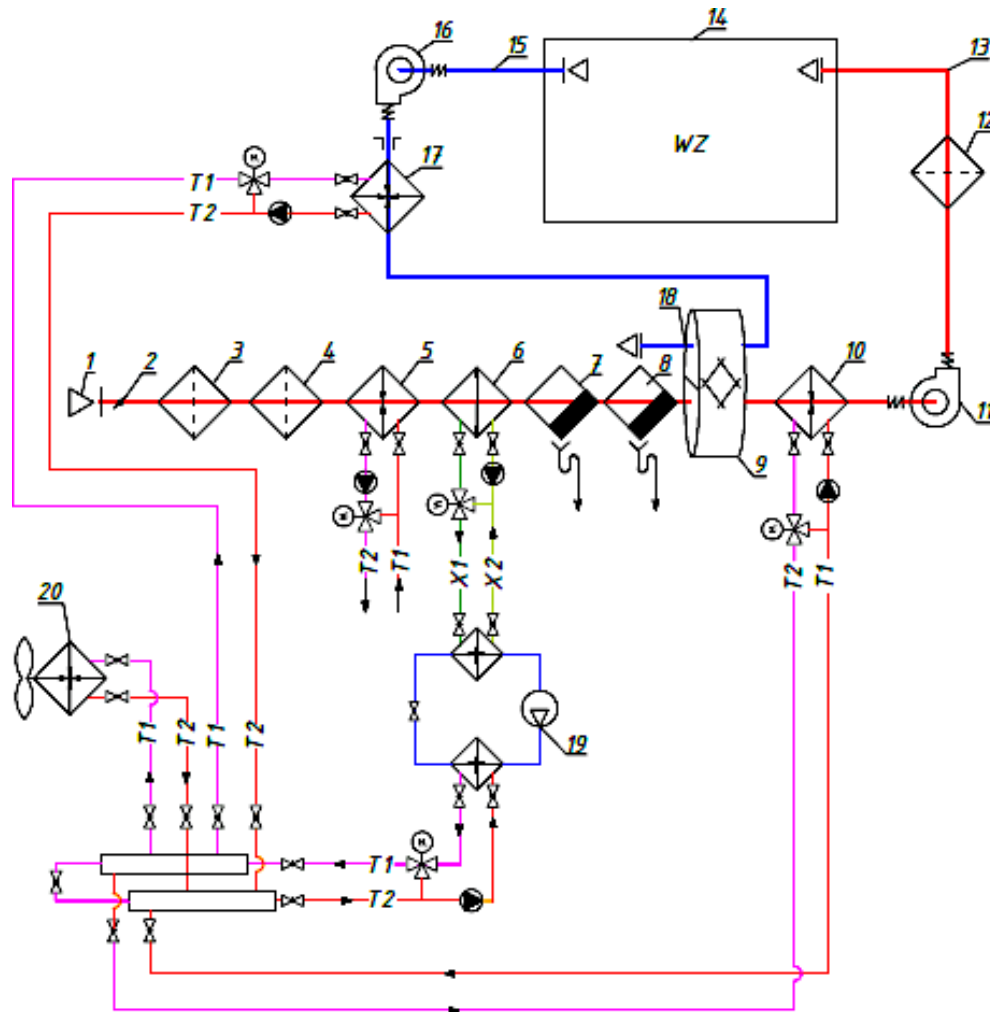


Рис.2. Функціональна схема СКП:

1 – повітрязабірна решітка; 2 – регулювальний пристрій; 3 – фільтр G4; 4 – фільтр F5; 5 – нагрівач повітря (холодний період); 6 – охолоджувач повітря; 7 – охолоджувач повітря (режим конденсації); 8 – сепаратор краплин води; 9 – адсорбер (режим осушення); 10 – нагрівач повітря; 11 – вентилятор; 12 – фільтр F9; 13 – ділянка припливних повітропроводів; 14 – приміщення, що обслуговується СКП; 15 – ділянка витяжних повітропроводів; 16 – вентилятор; 17 – нагрівач повітря; 18 – адсорбер (режим десорбції); 19 – холодильна машина; 20 – теплообмінник

Таблиця 1

Параметри повітря в процесі обробки

Позначення характерної точки процесу	Температура, $t$ , °C	Ентальпія, $I$ , кДж/кг	Відносна вологість, $\varphi$ %	Вологовміст, $d$ , г/кг
ext	30,0	62,3	45	12,5
A	17,6	49,4	95	12,5
B	13,3	37,3	95	9,4
C	21,9	37,3	35	6,0
in	23,0	38,5	32	6,0
wz	24,0	39,5	30	6,0
l	25,0	40,5	29	6,0
D	60,0	76,3	5	6,0
out	43,6	76,3	21	12,5

гісної та механічної – в процесі його обробки в елементах СКП від повітрязабірної решітки до викиду відпрацьованого повітря назовні.

На діаграмі (рис. 3) зображено зміну ексергетичних потенціалів основних складових ексергії вологого повітря – термічної, вологісної та механічної – у процесі його обробки в елементах СКП від повітрязабірної решітки до викиду відпрацьованого повітря назовні. Питомі значення вказаних складових ексергії визначалися за відомими формулами для вологого повітря [2].

З діаграми (рис. 3) видно, що найбільше значення термічної складової ексергії спостерігається в елементі № 17 (повітрянагрівач регенерації адсорбенту), яка характеризується відповідним піком кривої.

Як видно з рис. 2, живлення підігрівача здійснюється теплоносієм від конденсатора холодильної машини (поз. 19).

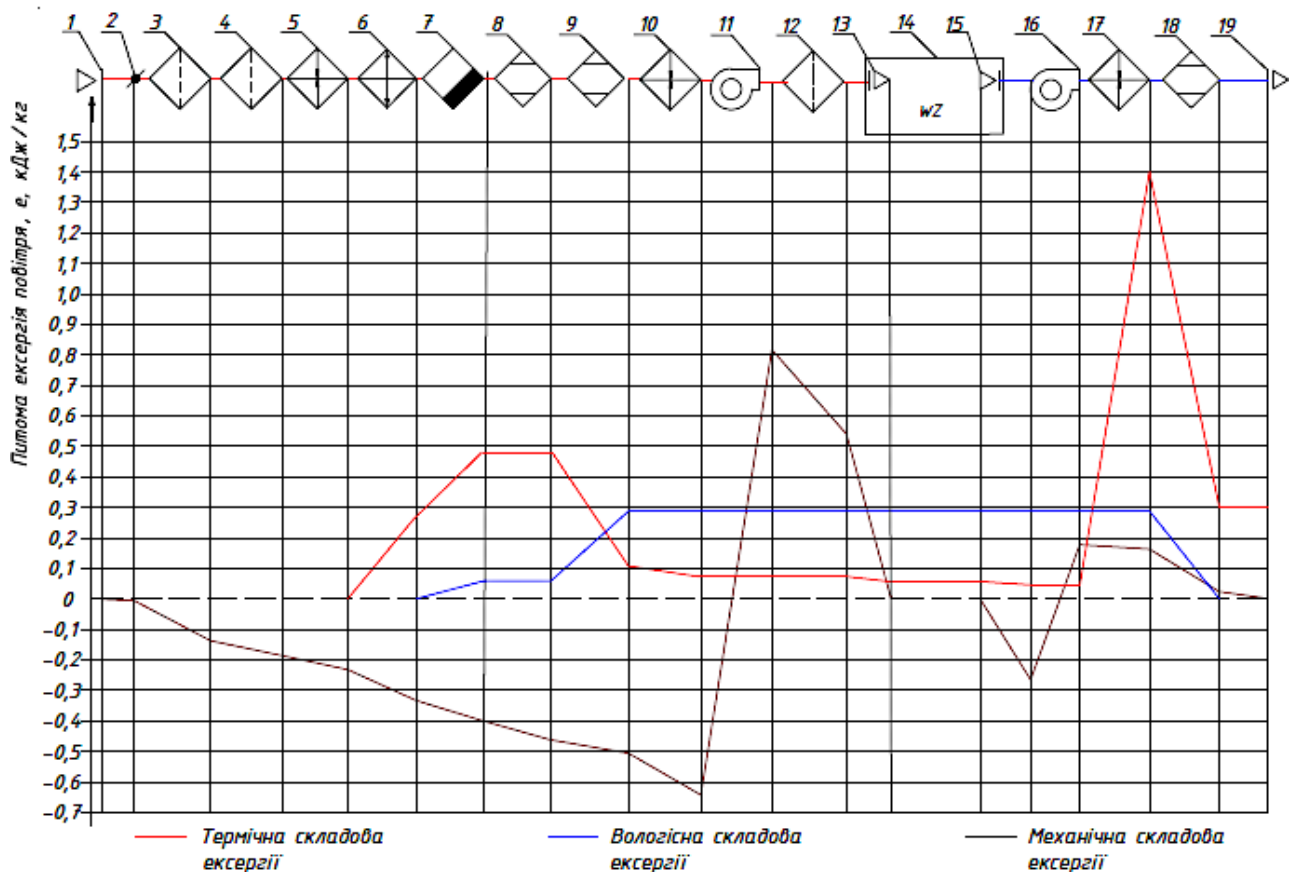


Рис.3. Діаграма ексергетичних потоків вологого повітря в СКП з конденсаційно-адсорбційним осушенням повітря: 1 – повітрязабірна решітка; 2 – дросель-кран з приводом; 3 – фільтр G4; 4 – фільтр F5; 5 – повітрянагрівач (холодний період); 6 – повітроохолоджувач; 7 – повітроохолоджувач (режим конденсації); 8 – каплевідокремлювач; 9 – сорбційний осушувач (режим осушення); 10 – повітрянагрівач; 11 – припливний вентилятор; 12 – фільтр F9; 13 – припливні повітропроводи; 14 – приміщення арбітражного зберігання; 15 – витяжні повітропроводи; 16 – витяжний вентилятор; 17 – повітрянагрівач; 18 – сорбційний осушувач (режим регенерації); 19 – видалення повітря назовні

Це обумовлює величину термічної складової, кДж/кг, на цій ділянці. На рис. 1 процес позначено лінією  $l-D$ .

Після нагрівача термічна складова ексергії різко зменшується (процес  $D-out$ ). Це відповідає ізоентальпійному процесу охолодження повітря при десорбції з віддачею теплоти повітря на випаровування вологи з адсорбенту.

Значне збільшення термічної складової спостерігається на ділянках 6 (сухе охолодження, процес  $ext-A$  на  $I-d$ -діаграмі) та 7 (охолодження з випадінням конденсату, процес  $A-B$  на  $I-d$ -діаграмі), де розташовано поверхневий повітроохолоджувач. Адіабатне осушення повітря в адсорбері 9 (процес  $B-C$  на  $I-d$ -діаграмі) супроводжується зменшенням питомої ексергії термічної складової до параметрів температури припливного повітря.

Вологісна складова ексергії починає проявляти себе з початку процесу конденсації вологи з повітря на поверхні повітроохолоджувача 7 (процес  $A-B$  на  $I-d$ -діаграмі) і приймає найбільше значення після закінчення

процесу осушення повітря в адсорбері 9, (процес  $B-C$  на  $I-d$ -діаграмі).

Отримане значення ексергетичного потенціалу вологісної складової відповідає необхідному вологовмісту в припливному повітрі – 6,6 г/кг. Далі воно не змінюється при повітрообміні в приміщенні ( $\epsilon = +\infty$ ). Наприкінці мережі після адсорбера (процес десорбції  $D-out$  на  $I-d$ -діаграмі) вологісна складова ексергії у результаті насичення повітря вологою до значень зовнішнього вологовмісту набуває нульового значення. Слід зазначити, що вказаний процес обробки повітря достатньо коректно обґрунтований теоретично, але потребує експериментального уточнення.

Механічна складова ексергії, повітря змінюється в системі з початку мережі по ходу повітря із збільшенням гідравлічних втрат відповідно до епюри надлишкових тисків системи. У приміщенні вона дорівнює нулю (атмосферний тиск повітря), а найбільші значення вона набуває перед та після нагнітачів.

Діаграма ексергетичних потоків надає можливість отримати значення перетворень ексергетичних потенціалів повітря, визначити ділянки в системі з найбільшими витратами та обчислити вищевказані значення ексергетичної ефективності за формулами (2) і (5).

Було проведено (табл. 2) розрахунки ЕККД за даними робочих креслень за формулами (2), (3), (4) та (5). З розрахунків видно, що використання теплоти конденсації холодильної машини СКП для регенерації адсорбенту збільшує ЕККД «брутто» майже вдвічі порівняно з централізованим теплопостачанням. Аналіз результатів наведених ексергетичних розрахунків показує доцільність застосування в СКП комбінованого способу осушення повітря з використанням теплоти конденсації холодильних машин для регенерації адсорбенту. Витрати підведеної ексергії теплоти на здійснення процесів обробки повітря за даного способу вдвічі менші ніж при централізованому теплопостачанні.

**Висновки.** Обґрунтована можливість послідовного чисельного визначення та коректного порівняльного аналізу схемних рішень та варіантів енергопостачання СКП із застосуванням методів ексергетичного аналізу. Використання потокових діаграм ексергії повітря та оцінки енергоощадності за безрозмірними

критеріями на етапі прийняття проектних рішень на різних стадіях дозволяє оцінити енергетичні витрати та скоригувати рішення задля їхнього заощадження. Застосування комбінованого конденсаційно-адсорбційного способу осушення повітря з використанням теплоти конденсації холодильних машин в СКП суттєво скорочує енерговитрати на здійснення процесів обробки повітря.

Ексергетичний аналіз з використанням потокових діаграм складових ексергії повітря та оцінкою енергоощадності процесів обробки повітря в СКП за безрозмірними показниками ЕККД «нетто» та «брутто» на прикладі дослідження СКП з комбінованим способом осушення повітря підтверджує перспективність його запровадження. Він може бути застосований із вказаною метою при проектуванні СКП на різних стадіях проектування. У результаті застосування вказаного методу оцінки енергоощадності СКП стає можливим значне заощадження енерговитрат на обробку повітря.

**Перспективи подальших досліджень.** В подальшому результати даної роботи планується використати для експериментальних досліджень та провести аналіз ексергетичної вартості з урахуванням тарифів на різні види енергоносіїв.

Таблиця 2

Результати розрахунків ЕККД

Найменування СКП	$\Delta e_{вз}$ , кДж/кг	$\sum E_{ext-in}$ , кВт	$\sum E_{\ell-ext}$ , кВт	$\sum E_i$ , кВт	$\eta_E^{net}$ , %	$\eta_E^{brt}$ , %
СКП з конденсаційно-адсорбційним осушенням повітря та регенерацією від централізованих джерел теплопостачання	0,352	8,421	3,867	52,234	2,863	0,673
СКП з конденсаційно-адсорбційним осушенням повітря та регенерацією теплою від конденсаторів холодильної установки	0,352	8,421	3,867	28,839	2,863	1,220

#### 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: Мінрегіонбуд України, 2008 – V, 14 с.
- Бродянский В. М. Эксергетические расчеты технических систем: справ. пособие / В. М. Бродянский, Г. П. Верхивкер, С. В. Дубовской и др.; под ред. А. А. Долинского, В. М. Бродянского. – Київ: Наук. Думка, 1991. – 360 с.
- Задоянний О. В. Види ексергії 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.
- Задоянний О. В. Порівняльний ексергетичний 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.
- Задоянний О. В. Ексергетичні 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. 3-18.

6. Лабай В. Й. Стан і перспективи підвищення енергоефективності систем кондиціонування повітря чистих приміщень / В. Й. Лабай, Д. І. Гарасим // Енергоефективність в будівництві та архітектурі: наук.-техн. зб. / Київський національний університет будівництва і архітектури. – 2014. – Вип. 6. – с. 161-166.
7. Лабай В. Й. Діаграма Грассмана в ексергетичному аналізі систем кондиціонування повітря чистих приміщень / В. Й. Лабай, Д. І. Гарасим // Холодильна техніка і технологія. – 2014. – № 5 (151). – с. 17-22.  
<https://doi.org/10.15673/0453-8307.5/2014.28691>
8. Luigi Marletta. Air Conditioning Systems from a 2-nd Law Perspective / Luigi Marletta // Entropy. – 2010. – Vol. 12. – Iss. 4. – P. 859-877. <https://doi.org/10.3390/e12040859>
9. Ratlamwala T. A. H. Efficiency assessment of key psychometric processes / T.A.H. Ratlamwala, I. Dincer // International Journal of Refrigeration. – 2013. – Vol. 36. – Iss. 3. – P. 1142-1153.  
<https://doi.org/10.1016/j.ijrefrig.2012.10.038>
10. Задоянний О. В. Діаграма потоків ексергії вологого повітря для систем кондиціонування повітря / О. В. Задоянний, Ю. М. Євдокименко // Вентиляція, освітлення та теплогазопостачання: наук.-техн. зб. / Київський національний університет будівництва і архітектури. – 2015. – Вип. 18. – с. 3-15.
11. Задоянний О. В. Порівняльна ексергетична оцінка прямої системи кондиціонування повітря з конденсаційним та комбінованим осушенням повітря / О. В. Задоянний, Ю. М. Євдокименко // Енергоефективність в будівництві та архітектурі: наук.-техн. зб. / Київський національний університет будівництва і архітектури. – 2014. – Вип. 6. – С. 91-94.

### References

1. *Systema zabezpechennia nadiinosti ta bezpeky budivelnykh ob'ektiv. Osnovni vymohy do budivel i sporud ekonomiiia enerhii.* DBN V.1.2-11-2008. Minbud Ukrainy, 2008.
2. Brodyanskiy V. M., Verhivker G. P., Karchev Ya. Ya. i dr. *Eksergeticheskie raschety tehnikeskih sistem.* Naukova Dumka, 1991.
3. Zadoiannyi O. V., Yevdokymenko Yu. M. “Vydy ekserhii v systemakh kondytsionuvannia povitria ta yikh vyznachennia.” *Ventyliatsiia, osviltennia ta teplohozopostachannia: Naukovo-tekhnichnyi zbirnyk*, Iss. 19, Kyiv National University of Construction and Architecture, 2016, pp. 3-15.
4. Zadoiannyi O. V., Tovstohrai O. O. “Porivnialnyi ekserhetychnyi analiz prystroiv iz stvorennia mikroklimatu ofisnykh prymishchen.” *Ventyliatsiia, osviltennia ta teplohozopostachannia: Naukovo-tekhnichnyi zbirnyk*, Iss. 28, Kyiv National University of Construction and Architecture, 2019, pp. 17-27.  
<https://doi.org/10.32347/2409-2606.2019.28.17-27>
5. Zadoiannyi O. V. “Ekserhetychni kryterii pry otsyntsi enerhooshchadnosti system kondytsionuvannia povitria budivel i sporud.” *Ventyliatsiia, osviltennia ta teplohozopostachannia: Naukovo-tekhnichnyi zbirnyk*, Iss. 17, Kyiv National University of Construction and Architecture, 2014, pp. 3-18.
6. Labai V. Y., Harasym D. I. “Stan i perspektyvy pidvyshchennia enerhoefektyvnosti system kondytsionuvannia povitria chystykh prymishchen.” *Enerhoefektyvnist v budivnytstvi ta arkhitekturi: Naukovo-tekhnichnyi zbirnyk*, Iss. 6, Kyiv National University of Construction and Architecture, 2014, pp. 161-166.
7. Labai V. Y., Harasym D. I. “Diahrama Hrassmana v ekserhetychnomu analizi system kondytsionuvannia povitria chystykh prymishchen.” *Kholodylna tekhnika i tekhnolohiia.* № 5 (151). 2014. pp. 17-22.  
<https://doi.org/10.15673/0453-8307.5/2014.28691>
8. Luigi Marletta. “Air Conditioning Systems from a 2-nd Law Perspective.” *Entropy*. 2010. Vol. 12. Iss. 4. P. 859-877. <https://doi.org/10.3390/e12040859>
9. Ratlamwala T. A. H., Dincer I. “Efficiency assessment of key psychometric processes.” *International Journal of Refrigeration*. 2013. Vol. 36. Iss. 3. P. 1142-1153. <https://doi.org/10.1016/j.ijrefrig.2012.10.038>
10. Zadoiannyi O. V., Yevdokymenko Yu. M. “Diahrama potokiv ekserhii volohoho povitria dlia system kondytsionuvannia povitria.” *Ventyliatsiia, osviltennia ta teplohozopostachannia: Naukovo-tekhnichnyi zbirnyk*, Iss. 18, Kyiv National University of Construction and Architecture, 2015, pp. 3-15.
11. Zadoiannyi O. V., Yevdokymenko Yu. M. “Porivnialna ekserhetychna otsinka priamotochnoi systemy kondytsionuvannia povitria z kondensatsiinym ta kombinovanyim osushenniam povitria.” *Enerhoefektyvnist v budivnytstvi ta arkhitekturi: Naukovo-tekhnichnyi zbirnyk*, Iss. 6, Kyiv National University of Construction and Architecture, 2014, pp. 91-94.

УДК 697.94

## Эксергетическая эффективность системы кондиционирования воздуха с адсорбционной осушкой и регенерацией адсорбента теплотой конденсации для помещений арбитражного хранения лекарств

А. В. Задоянный<sup>1</sup>, Ю. Н. Евдокименко<sup>2</sup>

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

<sup>2</sup>асп. Киевский национальный университет строительства и архитектуры, г. Киев, Украина, bonnesante91@gmail.com  
ORCID: 0000-0002-1154-5108.

*Аннотация. Инженерные системы обеспечения микроклимата зданий и сооружений являются существенными потребителями электрической и тепловой энергии различного температурного уровня. Среди них системы кондиционирования воздуха различного назначения по показателю энергопотребления являются наиболее энергозатратными. При их проектировании не всегда уделяется должное внимание оценке степени их энергоэффективности и не проводится вариантное проектирование сравнением соответствующих показателей. Эксергетический метод анализа технических систем обеспечивает корректную численную оценку энергоэффективности и возможность сравнительного анализа схемных решений на разных стадиях. Однако, для его применения недостаточно корректных инженерных методик. В данной статье приведён пример эксергетического анализа при проектировании системы кондиционирования воздуха для фармацевтического производства с целью выбора лучшего по показателю энергоэффективности источника теплоты для регенерации адсорбента. Результаты аналитических исследований представлены в виде относительных значений эксергетической эффективности и удельных значений эксергии воздуха при его обработке, которые удобны для корректного сравнения и последующего анализа. В статье показано, как с помощью эксергетической потоковой диаграммы составляющих эксергии влажного воздуха определены деструкция эксергии и наиболее энергоёмкие процессы в системе. Последовательный численный эксергетический анализ является действенным и полезным инструментом для определения показателей экономии энергии кондиционирования воздуха при проектировании.*

*Ключевые слова: кондиционирование воздуха; адсорбционная система; фармацевтическое производство; эксергетический анализ; десорбция; теплота конденсаторов холодильных машин.*

UDC 697.94

## Exergy efficiency of the air-conditioning system with adsorption drying and regeneration of the adsorbent by heat of condensation for the premises of arbitration storage of drugs

O. Zadoiannyi<sup>1</sup>, Y. Yevdokymenko<sup>2</sup>

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

<sup>2</sup>Post-graduate student. Kyiv National University of Construction and Architecture, Kyiv, Ukraine, bonnesante91@gmail.com  
ORCID: 0000-0002-1154-5108.

*Abstract. Engineering systems of microclimate provision in buildings and structures are significant consumers of electrical and heat energy at different temperature levels. Among them, air conditioning systems for various purposes in terms of energy consumption are the most energy-intensive. When developing them, the enough attention is not always paid to assessing the degree of their energy efficiency, and variant design is carried out by comparing the non-relevant indicators. The exergy method of analysis for technical systems provides the correct numerical assessment of energy efficiency and the possibility of a comparative analysis of circuit solutions at different stages. The existing engineering methods are not enough for this application. Adsorption is more energy efficient method for dehumidifying than condensation with re-heating, especially using the secondary energy source – heat of a condenser of a chiller. This article provides an example of an exergy analysis when developing an air conditioning system for pharmaceutical production in order to select the best heat source in terms of energy efficiency for adsorbent regeneration. The results of analytical studies are presented in the form of relative values of exergy efficiency and specific values of air exergy during its processing, which are convenient for proper comparison and subsequent analysis. The article shows how exergetic destruction and the most energy-intensive processes in the system are determined using an exergetic flow diagram of exergetic components of moist air. Sequential numerical exergy analysis is an effective and useful tool for determining energy-efficiency indicators of air conditioning systems in their design. The method allows significant decrease of energy consumption in air treatment of air conditioning in buildings.*

*Keywords: air conditioning; adsorption system; pharmaceutical manufacturing; exergy analysis; desorption; heat of the condensers of chillers.*

Надійшла до редакції / Received 02.03.2020.