

**ОСОБЛИВОСТІ ВИЗНАЧЕННЯ ЕКСЕРГЕТИЧНОЇ  
ЕФЕКТИВНОСТІ ВУЗЛА «ПОВІТРООХОЛОДЖУВАЧ-  
КАПЛЕВЛОВЛЮВАЧ-ПОВІТРОНАГРІВАЧ» ПРЯМОТОКОВОЇ  
СКП З ВИКОРИСТАННЯМ ДІАГРАМИ ПОТОКІВ ЕКСЕРГІЇ  
ВОЛОГОГО ПОВІТРЯ**

*<sup>1)</sup>Київський національний університет будівництва і архітектури, Україна*

*<sup>2)</sup>ТОВ "УнітехнологіїЮеї", інженер-проектувальник СВіК*

*Подана методика та розрахунки оцінки ексергетичного коефіцієнту корисної дії функціонального вузла «повітроохолоджувач-каплєвловлювач-повітронагрівач» прямотокової СКП з використанням діаграми потоків ексергії вологого повітря. Обґрунтовано вибір корисної та витратної ексергії в вузлі, наведено діаграму потоків складових ексергії вологого повітря, проведено розрахунки ексергетичного коефіцієнту корисної дії.*

*Ключові слова: діаграма потоків ексергії вологого повітря; системи кондиціонування повітря; ексергетичний коефіцієнт корисної дії.*

**Постановка проблеми.** Підвищення енергоощадності систем забезпечення мікроклімату будівель і споруд неможливо без коректної оцінки їх ефективності. Можливості ексергетичного аналізу систем кондиціонування повітря (СКП) на сьогодні не відповідають сучасним вимогам і потребують удосконалення [1]. Діаграми ексергетичних потоків, які використовують при аналізі СКП, дають можливість візуальної оцінки деструкції ексергії в системі та її окремих елементах. Однак усталений підхід їх побудови у вигляді діаграм Грассмана, який відображає тільки сумарні ексергетичні потоки, не сприяє поглибленому аналізу систем та їх елементів і певною мірою обмежує можливості ексергетичного аналізу, а в окремих випадках призводить до некоректних висновків.

Системи кондиціонування повітря будівель і споруд потребують більш детального аналізу ніж відомі, які базуються на оцінці деструкції сумарної ексергії. Це стосується головним чином складових елементів СКП. Центральні СКП складаються з декількох функціонально відокремлених секцій, які за показниками функціональної ефективності і енергоспоживанням значно відрізняються одна від другої [1]. Оцінювати, наприклад, деструкцію ексергії за показниками сумарних ексергетичних потоків і порівнювати між собою секції з різними корисними ефектами, як це подано в [1], некоректно. В одній секції корисним ефектом може бути охолодження повітря, а в інший

оохолодження з конденсацією, тобто корисні ефекти – різні. На сьогодні не існує єдиної коректної методики оцінки ексергетичного ККД СКП. В роботі [1], наприклад, пропонується підраховувати ефективність роботи СКП за декількома ексергетичними коефіцієнтами корисної дії, які за оцінкою самих авторів не дають однозначної оцінки ефективності СКП.

Діаграми ексергетичних потоків в СКП, які представлено в роботах [1,2], дають загальну уяву деструкції ексергії і дозволяють оцінити ефективність окремих функціональних вузлів і системи тільки по загальних витратах енергії. Для коректної оцінки ексергетичної ефективності вузлів СКП потрібна методика, яка враховує ексергетичні складові потоку вологого повітря та дає можливість на цій підставі відділяти витрати та втрати ексергії. Для цього потрібно проводити аналіз складових ексергії вологого повітря: термічної, вологісної та механічної. Кожна з них може характеризуватись відповідним ексергетичним потенціалом та характеризувати корисний ефект в елементі СКП за функціональним призначенням. Основою для цього може служити діаграма ексергетичних потоків [3], яка показує деструкцію кожної складової ексергії вологого повітря. За її допомогою можливо відділити витратну та корисну складові деструкції ексергії відповідно до функціонального призначення елемента СКП.

**Актуальність дослідження.** Ексергетичний аналіз СКП широко використовують для оцінки енергоощадності систем забезпечення мікроклімату будівель і споруд. Він дає можливість оптимізації систем за показниками енергоспоживання. Його доцільно застосовувати при проектуванні на різних стадіях. Особливо це стосується центральних систем кондиціонування повітря адміністративних та виробничих будівель і споруд, які є найбільш енергоємними. При виборі схемних рішень СКП та їх порівнянні між собою за ексергетичними критеріями можливо коректно оцінити та проаналізувати різні за функціональним призначенням вузли та агрегати СКП. За результатами аналізу можливо також модернізувати та розробляти нові енергоощадні схемні рішення СКП. На часі є оптимізація роботи систем не тільки за ексергетичними, а й за ексергоекономічними критеріями при виборі, наприклад, варіантів енергопостачання систем.

**Зв'язок із науковими і практичними завданнями.** 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.** Потоківі діаграми ексергії використовуються для аналізу енерговитрат в СКП головним чином у вигляді діаграм Грассмана та суміщених  $i, d - E, t$  [1]. Діаграми Грассмана побудовані за принципом послідовного приросту ексергій

енергетичних потоків в елементах системи і відображаються у вигляді смуг, ширина яких у відсотках відповідає витраченому та сприйнятому приросту ексергії у відповідному складовому елементі [1,2]. Суміщені діаграми  $i,d - E,t$  використовують для оцінки деструкції ексергії та визначення ексергетичної ефективності в СКП [1]. В обох видах діаграм відсутнє відображення деструкції складових ексергії вологого повітря – термічної, вологісної та механічної.

**Виділення невирішених питань.** Суміщені діаграми на відміну від діаграм Грассмана мають ізолінії параметрів стану вологого повітря: температури, вологовмісту, ентальпії, відносної вологості та ексергії. Але на наш погляд цього замало для отримання необхідної інформації і детального аналізу елементів СКП. По-перше, в діаграмі Грассмана відсутня можливість чисельної оцінки деструкції складових ексергії, а є тільки можливість відносної та загальної оцінки. Діаграми Грассмана не мають також ізоліній значень ексергії складових повітря і відповідних шкал. В діаграмах Грассмана відображують процеси термодинамічних перетворень в СКП тільки у вигляді втрат ексергії [5]. Суміщені діаграми дають можливість оцінити загальні перетворення ексергії в процесах обробки повітря в СКП, але обмежені в можливості відобразити й оцінити перетворення складових ексергії вологого повітря. Так, наприклад, на суміщеній діаграмі, що наведена в роботі [1], неможливо визначити яких саме складових ексергії вологого повітря проходить деструкція при ізоентальпійному процесі зволоження повітря в холодний період року і яка їх чисельна оцінка, а це не дає можливості коректного порівняння ефективності різних способів зволоження повітря між собою. Більш зручним є відображення процесів в даних діаграмах в значеннях питомої ексергії, чого не вистачає в суміщених діаграмах. Вказані недоліки великою мірою обмежують можливості ексергетичного аналізу СКП, не дозволяють відокремити корисну та витрачену складові ексергії вологого повітря в окремих функціональних елементах СКП. Перелічені недоліки не повною мірою використовують можливості ексергетичного аналізу і не дозволяють коректно оцінити енергоощадні показники систем.

**Новизна.** В ексергетичній діаграмі вологого повітря доцільно відображати всі складові – термічну, вологісну та механічну [3,4]. Відображення деструкції складових ексергії вологого повітря дає можливість визначити корисну та витратну частини ексергії, які функціонально відповідні кожному елементу СКП. Так, наприклад, деструкція термічної складової ексергії є домінуючою в теплообміннику, або в повітроохолоджувачі, а механічної - у всіх елементах СКП. Відображення складових ексергії вологого повітря на діаграмі дозволяє відокремлювати, або об'єднувати разом за функціональним призначенням елементи системи. Вузол СКП «повітроохолоджувач-каплевловлювач-повітронагрівач» відокремлений

в єдиний відповідно його функціональному призначенню для охолодження та осушки повітря й доведення до температури припливу відповідно принципу функціональної єдності та зв'язку між елементами [1]. Окремо визначати ефективність охолоджувача не коректно, тому що він виконує подвійну функцію - охолоджує та осушує конденсацією повітря. Повітронагрівач в цьому вузлі виконує завершальну стадію осушення повітря і доводить його нагріванням до температури припливу. В наведеній діаграмі (рис.1) стало можливим відокремити корисну деструкцію ексергії від загальної для кожного складового елемента системи.

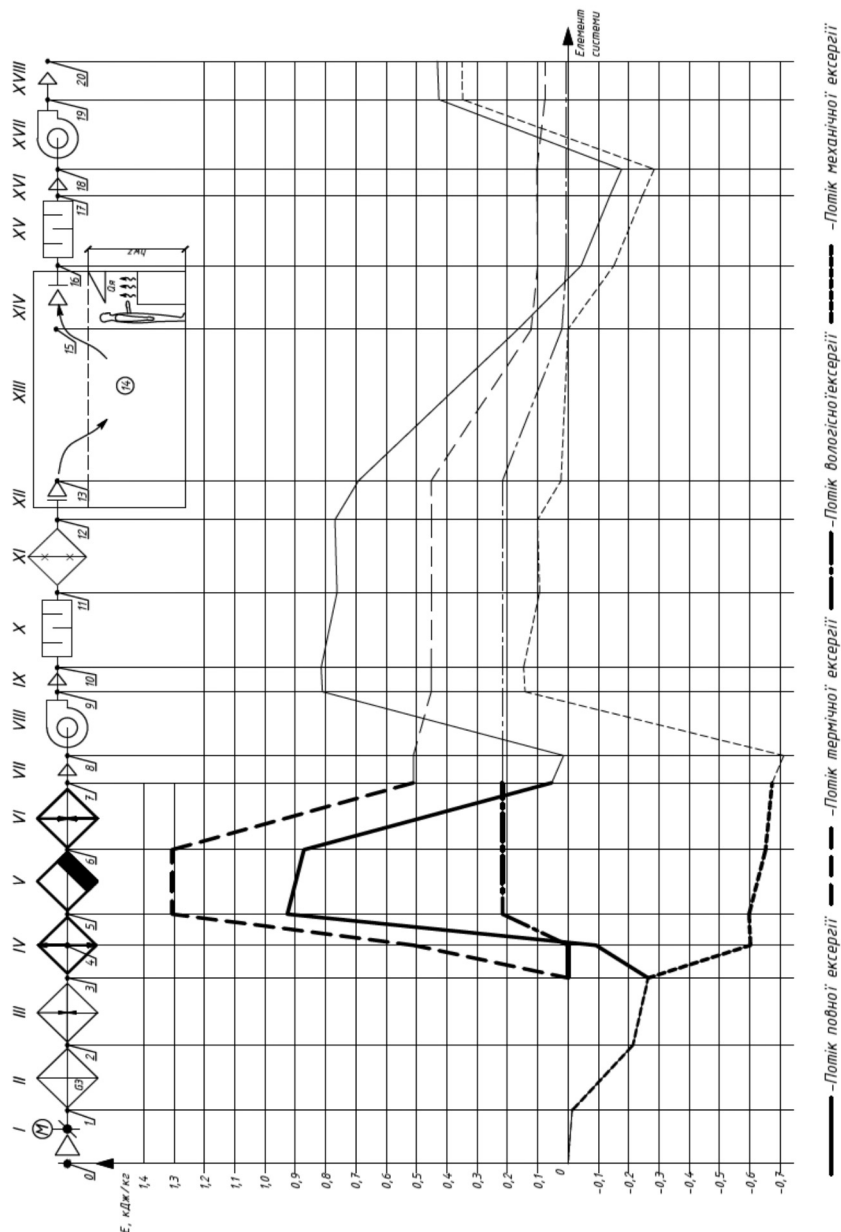


Рис.1. Діаграма ексергетичних потоків вологого повітря СКП фармацевтичного виробництва

**Методологічне значення.** Завдяки вказаним особливостям визначення деструкції складових ексергії вологого повітря, стала можливою чисельна їх оцінка та подальше коректне визначення показників енергоощадності. Так, наприклад, для осушення повітря в вузлі за корисний ефект прийнято деструкцію вологісної складової ексергії повітря, а для нагрівання та охолодження – деструкцію термічної складової, а не загальної як в роботах [1,2].

**Основний матеріал.** На діаграмі ексергетичних потоків вологого повітря для СКП фармацевтичного виробництва жирним виділено вказаний функціональний вузол. Діаграма побудована для теплого періоду року, система - прямотечійна, продуктивність по повітрю – 6834 м<sup>3</sup>/год., по холоду – 93,8 кВт, по теплу – 103 кВт. Процес обробки повітря на *I-d*-діаграмі представлено на рис. 2.

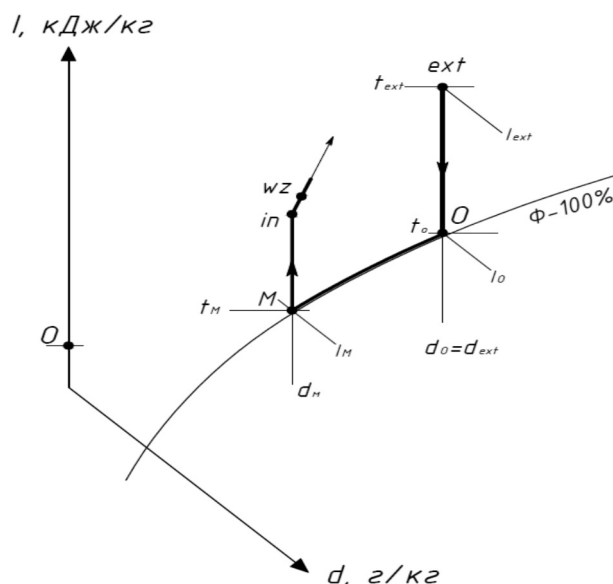


Рис.2. Процес обробки повітря - на *I-d*-діаграмі

Діаграма побудована для трьох складових ексергії вологого повітря - термічної, вологісної, механічної та сумарної. На діаграмі показана деструкція складових та сумарної ексергії вологого повітря при послідовній обробці його в елементах СКП від повітрязабірної решітки через приміщення, що обслуговується, й до видалення зовні. Вертикальна вісь діаграми - шкала питомої ексергії повітря, кДж/кг, а горизонтальна – елементи СКП в послідовності основного руху повітря. Ділянки системи позначено римськими цифрами, а обладнання – арабськими. Початок координат – розрахункові параметри зовнішнього повітря для теплого періоду року із значенням ексергії  $e_{oc} = 0$  на рівні повітрязабірної решітки СКП.

Аналіз розподілу ексергетичних потенціалів в процесі термодинамічних перетворень вологого повітря в вузлі «повітроохолоджувач - каплевловлювач - повітрянагрівач» показує

наступне. На ділянці 3-5 повна ( або сумарна) ексергія зростає від від'ємного значення - 0,264 кДж/кг і за рахунок домінуючої термічної складової приймає значення + 0,927 кДж/кг. Таке значне зростання пояснюється різким охолодженням повітря в поверхневому повітроохолоджувачі IV з конденсацією вологи ( на *I-d*- діаграмі – процес *ext-O-M*, рис.2 ). Від'ємне значення ексергії на цій ділянці має в основному механічна складова ексергії ( і невеликою мірою повна), що обумовлено розрідженням повітря на всмоктувальній частині мережі. На ділянці 4-5 змінюється вологісна складова ексергії від 0 до + 0,216 кДж/кг. ( на *I-d*- діаграмі це процес *O-M*). На ділянці 5-6 змінюється тільки механічна складова за рахунок аеродинамічного опору і відповідно йому – сумарна ексергія. Різке падіння значення термічної ексергії спостерігається на ділянці 6-7 ( на *I-d*- діаграмі – процес *M - in* ) за рахунок нагрівання в повітронагрівачі другого підігріву. Відповідно змінюється на цій ділянці й сумарна ексергія, а зміна механічної складової в порівнянні з термічною на цій ділянці є незначною.

В таблиці 1 представлено результати розрахунків значень складових ексергії у вказаному вузлі.

Таблиця 1

Результати розрахунків деструкції ексергії в вузлі СКП  
«повітроохолоджувач-каплевловлювач-повітронагрівач»

Ділянка	Обладнання СКП	Значення ексергії повітря, кДж/кг, по складових на ділянках							
		Термічна		Вологісна		Механічна		Сумарної	
		На початку	В кінці	На початку	В кінці	На початку	В кінці	На початку	В кінці
3-4	Повітроохолоджувач (IV)	0	0,509	0	0	- 0,264	- 0,602	- 0,264	-0,093
4-5		0,509	1,307	0	0,216	- 0,602	- 0,596	-0,093	0,927
5-6	Каплевловлювач (V)	1,307	1,307	0,216	0,216	- 0,596	- 0,652	0,927	0,871
6-7	Повітронагрівач (VI)	1,307	0,511	0,216	0,216	- 0,652	- 0,673	0,871	0,054

Визначення ексергетичної ефективності вузла проводять в наступному порядку. Для підрахунку ЕККД необхідно виділити і розрахувати значення корисної складової та витраченої повної ексергії в вузлі. За корисні ефекти приймається осушення повітря від  $d_{ext}$  до потрібного значення  $d_{in}$  та охолодження від температури  $t_{ext}$  до температури припливного повітря  $t_{in}$  та відповідна їм деструкція ексергії. Витратна деструкція ексергії на здійснення корисних ефектів складається з термічної, вологісної та механічної на ділянці системи, в якій отримано корисний ефект. Кожна з перелічених складових при складанні враховується за абсолютною величиною без урахування знаку.

Слід зазначити, що відповідно до ексергетичної теорії [6] деструкція ексергії повітря, яка має місце в вказаному вузлі поділяється на «зовнішньо-залежну» та «внутрішньо-залежну» (англійською відповідно - exogenous (EX) та endogenous (EN)) [6,7]. Це означає, що зовнішньо-залежна деструкція (EX) - це деструкція від незворотності процесів, яка впливає на певний елемент системи від попереднього по ходу потоку елемента системи, а внутрішньо-залежна (EN) - від незворотності внутрішніх процесів в елементі СКП. В даній роботі розглядається «внутрішньо-залежна» деструкція (EN), яка характеризує саме ефективність складових елементів СКП.

Відповідні значення внутрішньо-залежної деструкції термічної та вологісної складових ексергії повітря в цьому вузлі будуть  $E_{D,in-ext}^{t,EN} = e_{12}^t - e_3^t = 0,451 - 0 = 0,451$  кДж/кг та  $E_{D,5-4}^{d,EN} = e_5^d - e_4^d = 0,216 - 0 = 0,216$  кДж/кг, разом - 0,667 кДж/кг.

Витратна «внутрішньо-залежна» деструкція ексергії, тобто загальна деструкція ексергії вологого повітря в вузлі на здійснення вказаних корисних ефектів - це сума деструкції вологісної, термічної та механічної складових ексергії на ділянці 3-7

$$E_{D,3-7}^{T,EN} = E_{D,3-7}^{d,EN} + E_{D,3-7}^{t,EN} + E_{D,3-7}^{m,EN} = 0,216 + 2,103 + 0,475 = 2,794 \text{ кДж/кг.}$$

ЕККД «нетто» [7], або «внутрішньо-залежний», який враховує деструкцію ексергії повітря від незворотності процесів в обладнанні функціонального вузла «повітроохолоджувач-каплевловлювач-повітронагрівач» підраховується за наступною залежністю і становить

$$\eta_{3-7}^{net} = \frac{E_{D,5-4}^{d,EN}}{E_{D,3-7}^{T,EN}} = \frac{0,667}{2,794} = 0,2387 \text{ (23,87\%).}$$

**Головні висновки.** Методика обчислення ЕККД «нетто» надає можливість коректної оцінки ЕККД вузла СКП. Отримане значення ЕККД характеризує внутрішню недосконалість термодинамічних процесів вузла «повітроохолоджувач-каплевловлювач-повітронагрівач» СКП і є вихідним для прийняття рішення щодо його удосконалення, або заміни на більш досконалий при порівнянні за вказаним показником. Для більш повної оцінки енергоощадності вказаного вузла відносно

підведеної зовні енергії варто користуватись ЕККД «брутто» та показниками відповідних втрат [7].

**Перспективи використання результатів.** Наведені результати дослідження ексергетичної ефективності елементу СКП із методикою визначення корисної та витратної складових деструкції ексергії волого повітря та ЕККД надають можливість коректної оцінки енергоощадності систем кондиціонування повітря будівель і споруд.

## Література

1. *Бродянский В.М., Верхивкер Г.П., Карчев Я.Я. и др.* Эксергетические расчеты технических систем: Справ.пособие /: Под ред. Долинского А.А., Бродянского В.М. АН УССР. Ин-т технической теплофизики.- Киев: Наук. Думка, 1991.- 360 с. – ISBN 5-12-0011397-X;
2. *Luigi Marletta.* Air Conditioning Systems from a 2-nd Law Perspective // Entropy: мережевий журн. 2010. URL: <http://www.mdpi.com/journal/entropy>. p=860 ( дата звернення 12.12.2011);
3. *Задоянний О.В., Котляров А.* Ексергетична оцінка обробки повітря в центральній прямоточній системі кондиціонування повітря; Науково-технічний збірник «Енергоефективність в будівництві та архітектурі». Випуск 6. Відповідальний редактор П.М.Куліков.- К.:КНУБА,2014 р.-364 с.;
4. *Задоянний О.В., Євдокименко Ю.М.* Діаграма потоків ексергії вологого повітря для систем кондиціонування повітря; Науково-технічний збірник «Вентиляція, освітлення та теплогазопостачання.- Вип.18 /відповідальній редактор Е.С.Малкін.- К.: КНУБА, 2015 р.;
5. *Лабай В.Й., Гарасим Д.І.* Діаграма Грассмана в ексергетичному аналізі систем кондиціонування повітря чистих приміщень// Науково-технічний журнал «Холодильна техніка і технологія». Вип.1. URL: <http://reftech.irce.od.ua/index.php?menu=archive#1> ( дата звернення 25.03.2015);
6. *Морозюк Т.В., Тсатсаронис Дж.* Теория разделения деструкции эксергии на внутренне- и внешне-зависимые части //Научно-технический журнал «Промышленная теплотехника», №6, т.28, 2006г.;
7. *Задоянний О.В.,* Ексергетичні критерії при оцінці енергоощадності систем кондиціонування повітря будівель і споруд; Науково-технічний збірник «Вентиляція, освітлення та теплогазопостачання.- Вип.17 /відповідальній редактор Е.С.Малкін.- К.: КНУБА, 2014 р.-148 с.;



**ОСОБЕННОСТИ ОПРЕДЕЛЕНИЯ ЭКСЕРГЕТИЧЕСКОЙ  
ЭФФЕКТИВНОСТИ УЗЛА «ВОЗДУХООХЛАДИТЕЛЬ-  
КАПЛЕУЛОВИТЕЛЬ-ВОЗДУХОПОДОГРЕВАТЕЛЬ» С  
ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ДИАГРАММЫ ПОТОКОВ ЭКСЕРГИИ**

*А. В. Задоянный, Ю. Н. Евдокименко*

В работе авторы предлагают методику определения эксергетического коэффициента полезного действия для функционального узла системы кондиционирования воздуха «воздухоохладитель - каплеуловитель - воздухоподогреватель» с помощью эксергетической диаграммы потоков влажного воздуха. Предложены расчетные зависимости, алгоритм определения полезной и затраченной деструкции эксергии влажного воздуха, приведена диаграмма потоков эксергии, расчеты и результаты определения эксергетического КПД.

**FEATURES OF DETERMINING OF EXERGY EFFICIENCY OF AIR  
COOLER, DRIP-PAN AND AIR HEATER UNIT USING AN EXERGY  
FLOW CHART**

*A. Zadoyannyi, Yu. Evdokimenko*

In this paper the authors propose a method for determining exergy efficiency for the functional HVAC unit «air-cooling- drip-pan and air heater» using moist air flow diagrams. A calculation based, algorithm for determining the useful and degradation of exergy consumed humid air and a flow diagram of exergy calculations and determine the energetic efficiency shows.