

УДК 697.94

Поглиблений ексергоекономічний аналіз як дієвий інструмент розроблення енергозберіжних схемних рішень у системах кондиціонування повітря (на прикладі системи мембранного осушення повітря для приміщення зберігання насіння)

О. В. Задоянний¹, Ю. М. Євдокименко²

¹доцент, Київський національний університет будівництва та архітектури, м. Київ, Україна, bonnesante91@gmail.com
ORCID: 0000-0001-6781-9756

²аспірант, Київський національний університет будівництва та архітектури, м. Київ, Україна, bonnesante91@gmail.com
ORCID: 0000-0002-1697-0816

Анотація. У роботі представлений метод поглибленого ексергоекономічного аналізу, а також приклад його застосування для вибору найбільш енергоефективного способу осушення повітря для приміщення зберігання сільськогосподарської продукції, а саме насіння гарбузу. Подані теоретичні залежності для визначення складових ексергії потоку вологого повітря (термічної, вологісної та механічної, а також повної ексергії). Наведені формули та методика визначення ексергетичного коефіцієнта корисної дії «нетто» та «брутто». Для візуального представлення розрахунків та аналізу витрат ексергії у системі кондиціонування повітря побудовані ексергетичні потокові діаграми. Результати розрахунків витрат на оброблення повітря в системі кондиціонування повітря представлені у вигляді поточкових накопичувальних діаграм. За результатами аналізу та порівняння ексергоекономічних затрат для забезпечення необхідних умов зберігання вибрана схема з комбінованим мембранним осушенням повітря.

Ключові слова: кондиціонування повітря, ексергоекономічний аналіз, ексергетична ефективність, зберігання насіння, питома ексергія, осушення повітря, енергоефективність, потокова ексергетична діаграма.

Постановка проблеми. Для приміщення зберігання сільськогосподарської продукції певного виду (насіння гарбузу, буряка, соняшника та ін.) існують, визначені технологічним регламентом, умови зберігання [1, 2, 3], які повинні бути забезпечені впродовж усього періоду зберігання. Підтримання необхідних параметрів мікроклімату, зокрема температури, °С, відносної вологості, %, та швидкості, м/с, повітряного середовища, досягається [4] влаштуванням систем кондиціонування повітря (СКП).

Як відомо, сьогодні для підтримання відносної вологості в теплий період року в приміщеннях застосовують методи конденсаційного або адсорбційного осушення повітря [5, 6, 7, 8]. Для конденсаційного способу характерні значні витрати енергії для переохолодження повітря нижче точки роси й подальшого нагрівання до параметрів припливу. Крім того при переохолодженні нижче 5 °С відбувається обмерзання поверхні теплообмінного апарата [5, 9]. У такому разі система функціонує в циклічному режимі з періодичним відтаванням теплообмінника. Даного недоліку позбавлені системи осушення повітря на основі сорбентних технологій, у яких здійснюється осушення без конденсації. Проте вони потребують постійної регенерації адсорбенту, що пов'язано з підведе-

нням додаткової енергії у формі водяної пари, електричної енергії, газу тощо [5, 8], а також енерговитрат при сухому охолодженні повітря до параметрів припливу. До вказаних недоліків слід додати необхідність додаткових площ приміщень для розміщення основного обладнання. Ці проблеми стримують широке застосування даного методу осушення повітря [9].

Значні експлуатаційні витрати негативно впливають на собівартість зберігання насіння, тому існує необхідність пошуку шляхів зменшення енергоспоживання систем кондиціонування повітря для приміщення зберігання насіння гарбуза.

Сучасні дослідження направлені на оптимізацію та зниження витрат у процесі осушення повітря [9, 10, 11, 12].

Наприклад, у роботі [12] розглядаються способи зменшення витрат ексергії в процесі адсорбційного осушення повітря. Основну увагу приділяють зниженню температури, °С, регенерації адсорбенту шляхом оптимізації процесів оброблення повітря в роторі адсорбційного осушення повітря. Поряд з цим аналізується комбінування конденсаційного та адсорбційного способів осушення повітря (попереднє охолодження повітря) для підвищення загальної ексергетичної ефективності процесу. Як результат представлено спосіб багато-

стадійного осушення повітря в СКП із застосуванням адсорбційного способу. Він має певні переваги порівняно з указаними щодо енерговитрат, але не знижує їх суттєво, оскільки

- залишає стадії перегріву й переохолодження;
- потребує відповідних додаткових площ для розміщення основного та допоміжного обладнання.

У даній статті представлені результати застосування поглибленого ексергоекономічного методу аналізу для вибору найбільш енергоощадного схемного рішення системи кондиціонування повітря приміщення зберігання насіння голонасінного гарбузу. Проведено порівняння витрат на СКП з різними способами осушення повітря для приміщення зберігання сільськогосподарської продукції (насіння гарбуза) методом ексергетичного та ексергоекономічного аналізу.

Актуальність дослідження. Законом України “Про енергозбереження” [14], а також державними будівельними нормами ДБН В.1.2-11-2008 [15], встановлюються основні вимоги щодо зниження енергоспоживання будівельних об’єктів при їхній експлуатації з урахуванням кліматичних умов, місцезнаходження та призначення об’єкта будівництва. Серед інших, вимоги ДБН В.1.2-11-2008 [15] розповсюджуються на використання енергії для опалення та охолодження приміщень, регулювання відносної вологості повітря, %, та вентиляції. Ними встановлюється, що порівняння ефективного використання енергії при експлуатації інженерних систем, серед яких системи кондиціонування повітря, відбувається за показниками коефіцієнтів корисної дії того чи іншого обладнання. Чіткої методики для обчислення та визначення вище вказаних показників ефективності (коефіцієнтів корисної дії) для систем кондиціонування повітря будівельними нормами не передбачено.

Оцінка ефективності вказаних процесів та ощадності енергоспоживання сьогодні достатньо вдало здійснюється методом ексергетичного аналізу, який все частіше використовується в сучасних дослідженнях різних систем кондиціонування повітря [16]. У вказаній роботі, зокрема, автори оцінюють ексергетичну ефективність роботи центрального кондиціонера для чистих приміщень. Для цього вони використовують безрозмірний показник ексергетичної ефективності – ексергетичний коефіцієнт корисної дії (ЕККД) – відношення витраченої корисної ексергії до підведеної ексергії всіх видів

енергії. Така оцінка ексергетичної ефективності, яка розроблена ще в 90-і роки минулого сторіччя, є усталеною, дає коректні й надійні результати [17].

Останні дослідження та публікації. В умовах енергетичної кризи в Україні, для підвищення енергоощадності СКП приміщення зберігання сільськогосподарської продукції в певних температурно-вологісних умовах (зокрема насіння гарбузу, редису, соняшника), вибір способу обробки повітря для досягнення необхідних кліматичних умов зберігання, зручно проводити з використанням методів порівняння ЕККД СКП з різними способами обробки повітря, що потребує проведення більш детального аналізу.

Як приклад, в роботі [16] автори оцінюють загальну ефективність СКП за допомогою ЕККД. Проте окремі функціональні елементи такі як вентилятор, секції теплообмінних апаратів, секції фільтрації, що входять до системи, залишаються поза увагою. Крім того, бажаною є оцінка енергоощадності СКП на ранніх стадіях проектування для можливості вибору схеми з меншим енергоспоживанням.

У роботі [18] подано пропозиції щодо відокремлення втрат ексергії всередині СКП або окремого її функціонального елемента від втрат ексергії які обумовлені підведенням енергії до системи. Таке розділення дає можливість визначати окремо втрати ексергії від недосконалої термодинамічних процесів СКП в цілому чи її елементів всередині та втрати від передачі енергії до СКП або її елемента. У першому випадку порівнюється значення деструкції ексергії повітря в приміщенні до сумарного значення деструкції відповідних складових ексергії вологого повітря в обладнанні СКП, а в другому – до деструкції ексергетичних потоків енергоносіїв, які підводяться до СКП або її елемента.

Зазвичай, центральні СКП складаються з декількох функціонально відокремлених секцій, які за показниками функціональної ефективності і енергоспоживанням суттєво відрізняються одна від одної [17]. Оцінювати, наприклад, деструкцію ексергії за показниками сумарних ексергетичних потоків і порівнювати між собою секції з різними корисними ефектами, як це подано в [17], некоректно. В одній секції корисним ефектом може бути охолодження повітря, а в іншій – охолодження з осушенням. Тому корисні ефекти різних елементів не однакові. На сьогодні не існує гармонізованої методики оцінки ЕККД СКП. У роботі [19], наприклад, пропонується підраховувати ефекти-

вність роботи СКП за декількома ексергетичними коефіцієнтами корисної дії, які за оцінкою самих авторів не дають однозначної оцінки ефективності СКП.

Діаграми ексергетичних потоків у СКП, які представлено в роботах [17, 20], дають тільки загальну уяву деструкції ексергії. Вони дозволяють оцінити ефективність окремих функціональних вузлів і системи за загальною ексергією повітря. Однак, для коректної оцінки ексергетичної ефективності СКП потрібно використовувати підхід, який

- враховує ексергетичні складові потоку вологого повітря;
- дає можливість на цій підставі відокремлювати витрати та втрати ексергії.

Для цього потрібно проводити аналіз складових ексергії вологого повітря: термічної, вологісної та механічної [21]. Кожна з них може характеризуватися відповідним ексергетичним потенціалом та характеризувати корисний ефект в елементі СКП за функціональним призначенням. Основою для цього може служити діаграма ексергетичних потоків [22], яка показує деструкцію кожної складової ексергії вологого повітря. За її допомогою можливо виділити витратну та корисну складові деструкції ексергії відповідно до функціонального призначення елемента СКП.

Формулювання цілей статті. Метою даної роботи є поглиблений ексергетичний та ексергоекономічний аналіз різних способів осушення повітря СКП приміщення зберігання сільськогосподарської продукції на прикладі приміщення для зберігання насіння гарбуза задля зменшення енергоспоживання в процесі обробки повітря з застосуванням мембранного способу осушення.

Основна частина. Ексергетичний аналіз СКП проводиться на основі балансів матеріальних, енергетичних та ексергетичних потоків, які в процесі обробки повітря піддаються деструкції, або втраті [19]. Як відомо [18], деструкція ексергії у свою чергу може бути корисною або витратною. Вона характеризується зміною термодинамічних потенціалів робочого тіла. У загальному вигляді рівняння балансів записуються наступним чином [10, 17]:

- баланс матеріальних потоків

$$\sum_{i=1}^n m^{\text{in}} d^{\text{in}}_i - \sum_{i=1}^n m^{\text{out}} d^{\text{out}}_i = 0 ; \quad (1)$$

- баланс енергетичних потоків

$$\sum_{i=1}^n m^{\text{in}} h^{\text{in}}_i - \sum_{i=1}^n m^{\text{out}} h^{\text{out}}_i = 0 ; \quad (2)$$

- баланс ексергетичних потоків

$$\sum_{i=1}^n E^{\text{in}}_i - \sum_{i=1}^n E^{\text{out}}_i = E_D, \text{ кДж/кг}, \quad (3)$$

де $m_{\text{in}}, m_{\text{out}}$ – матеріальні потоки (потоки повітря) в системі кг/с; $d_{\text{in}}, d_{\text{out}}$ – вологовміст припливного та витяжного повітря, кг/кг; $h_{\text{in}}, h_{\text{out}}$ – ентальпія припливного та витяжного повітря, кДж/кг; $E_{\text{in}}, E_{\text{out}}, E_D$ – сумарні ексергетичні потоки, кДж/кг, відповідно – вхідний, вихідний та втрати, або деструкція ексергії.

Для поглибленого ексергетичного аналізу властиво визначення складових ексергії, кДж/кг, потоку вологого повітря, що піддається обробці в СКП [23]. Вони визначаються за такими залежностями [21]:

- термічна складова ексергії потоку вологого повітря:

$$E_{a,h}^{\text{int}} = G_a^{\text{int}} \left(T_a^{\text{ext}} (c_{p,d,a} + d_a^{\text{int}} c_{p,w,v}) \times \left(\frac{T_a^{\text{int}}}{T_a^{\text{ext}}} - 1 - \ln \frac{T_a^{\text{int}}}{T_a^{\text{ext}}} \right) \right), \text{ кДж/с}; \quad (4)$$

- механічна складова ексергії потоку вологого повітря:

$$E_{a,m}^{\text{int}} = G_a^{\text{int}} \left(T_a^{\text{ext}} R_v (0,622 + d_a^{\text{int}}) \ln \frac{p_a^{\text{int}}}{p_a^{\text{ext}}} \right), \text{ кДж/с}; \quad (5)$$

- вологісна (хімічна концентраційна) складова ексергії потоку вологого повітря:

$$E_{a,ch,cn,w}^{\text{int}} = G_a^{\text{int}} \left(T_a^{\text{ext}} R_v \left((0,622 + d_a^{\text{int}}) \times \ln \frac{0,622 + d_a^{\text{ext}}}{0,622 + d_a^{\text{int}}} + d_a^{\text{in}} \ln \frac{d_a^{\text{int}}}{d_a^{\text{ext}}} \right) \right), \text{ кДж/с}, \quad (6)$$

де G – масова витрата, кг/с; T – абсолютна температура, К; c – питома (масова) 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 – тепло; int – припливне; out – витяжне; ext – зовнішнє; p – ізобарна; d – сухе; w – вологе; v – пара; cn – концентраційна; ch – хімічна;

Ексергетичні потоки в СКП є енергоносіями:

- теплоти,
- «холоду»,
- у вигляді води
- у формі пари для зволоження повітря
- електричної енергії, які живлять відповідні елементи системи.

Потік фізичної ексергії гарячої води, кДж/с:

$$E_{hta,w,l,m}^{in} = g_{hta,w,l,m} \left(c_{p,st,w,l} \left(T_{hta,w,l} - T_a^{ext} \right) - T_a^{ext} \ln \left(\frac{T_{hta,w,l}}{T_a^{ext}} \right) \right) + v_{hta,w,l,m} \left(P_{hta,w,l} - P_a^{ext} \right), \quad (7)$$

кДж/с,

де $g_{hta,w,l,m}$ – масова витрата рідинного теплоносія, кг/с; $c_{p,hta,w,l}$ – його питома теплоємність, кДж/кг К; $T_{hta,w,l}$ – абсолютна температура 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.

Ексергетичний потік електричної енергії для живлення відповідних споживачів (електрокалорифер, вентилятор та ін.) відповідно до властивостей ексергії [17] дорівнює електричній енергії N_{el} , кВт:

$$E_{el} = N_{el}, \text{ кДж/с.} \quad (8)$$

Визначення ексергетичних коефіцієнтів корисної дії ЕККД проводять на підставі структури СКП з відповідними елементами та зв'язками між ними. Структура СКП, згідно з [17, 18] розглядається як така, у якій корисні ефекти виражені як у перетворенні речовини – потоку повітря в процесі обробки, – так і в передачі цієї речовини від однієї підсистеми до іншої. За вказаними принципами побудовано (рис. 1) структуру СКП [18]. Вона містить основні функціональні вузли: підготовки повітря 1 і 3 та споживання повітря 2 – приміщення, яке обслуговується СКП.

Відповідно до структури рівняння для визначення ЕККД в загальному вигляді має вигляд [18]:



Рис. 1. Структура СКП

$$\eta_{ex} = \frac{E_{kop}}{E_{sump}} = \frac{\Delta E_2}{\Delta E_1 + \Delta E_3} = \frac{\Delta E_{wz}}{\Delta E_{ext-in} + \Delta E_{l-env}}, \quad (9)$$

де ΔE_{wz} , ΔE_{ext-in} та ΔE_{l-env} – відповідно, корисна ексергія повітря, витрачена перед подачею в приміщення, та після видалення з приміщення в СКП.

Корисно витрачена ексергія ΔE_{wz} у приміщенні є різницею значень повної ексергії потоку вологого повітря, від повітророзподільника (E_{in} , кДж/с) до витяжної решітки (E_l , кДж/с):

$$\Delta E_{wz} = \Delta E_{l-in} = E_l - E_{in}, \text{ кДж/с.} \quad (10)$$

Затрачена ексергія у вузлі 1 E_l , кДж/с, є сума деструкції ексергії повітря при обробці його в кожному елементі СКП до подачі в приміщення:

$$E_l = \Delta E_{ext-in} = \sum_{i=1}^n E_{ext-in,i}^D, \text{ кДж/с,} \quad (11)$$

де E_{ext-in}^D – деструкції ексергії повітря у вузлі 1.

Аналогічно визначається затрачена ексергія повітря у вузлі 3:

$$E_3 = \Delta E_{l-env} = \sum_{i=1}^n E_{l-env,i}^D, \quad (12)$$

де $E_{l-env,i}^D$ – деструкції ексергії повітря у вузлі 3.

З урахуванням залежностей (10), (11) і (12) формулу (9) можна переписати:

$$\eta_E^{net} = \frac{\Delta E_{l-in}}{\sum_{i=1}^n E_{ext-in,i}^D + \sum_{i=1}^n E_{l-env,i}^D}. \quad (13)$$

Отримана залежність (13) цілком коректна для визначення ЕККД СКП. Вона містить корисну ексергію в чисельнику та використану в знаменнику. Нею можна користуватися для аналізу ексергетичної ефективності процесів обробки повітря, але без урахування втрат підведеної ексергії. Витрати ексергії будуть відповідати тільки внутрішнім термодинамічним перетворенням повітря в СКП, тобто зміні стану ексергії «нетто».

Ексергетична ефективність СКП з урахуванням підведеної ексергії від зовнішніх джерел у поточних позначеннях буде мати вигляд:

$$\eta_E^{brt} = \frac{\Delta E_{l-in}}{\sum_{i=1}^n E_{ext-in,i}^T + \sum_{i=1}^n E_{l-env,i}^T}, \quad (14)$$

де $E_{ext-in,i}^T$ – підведена до i -го вузла ексергія від зовнішніх джерел на шляху від забору зовнішнього повітря до подачі припливного повітря в приміщення; $E_{l-env,i}^T$ – підведена до i -го вузла ексергія від зовнішніх джерел енергопостачання після видалення повітря з приміщення до викиду в атмосферне повітря.

Поглиблений ексергоекономічний аналіз дозволяє врахувати не тільки термодинамічні показники ефективності, а й економічні критерії порівняння того чи іншого варіанту схемного рішення СКП. Для врахування та аналізу матеріальних витрат на підготовку (обробку) повітря в СКП нами запропонована методика ексергоекономічного аналізу [23], яка базується на визначенні накопичувальної вартості потоку ексергії повітря та його складових від повітрозабірної пристрою до викиду відпрацьованого повітря назовні. Для ексергії повітряного потоку, який проходить обробку в СКП, як зазначено вище, виділяються три основні складові: термічна, вологісна та механічна. Крім того, в основних функціональних елементах, де відбувається перетворення енергії (повітроохолоджувач, повітронагрівач, вентилятор тощо) враховуються також витрати ексергії від підведених джерел. Вартість потоків ексергії визначається за формулою

$$C_{ex} = 1000 \sum_{i=1}^n e_{en,i}^{tot} \rho_a c_{en}, \quad (15)$$

де $e_{en,i}^{tot}$ – питома ексергія енергоносіїв, віднесена до потоку повітря, кДж/кг; C_{ex} – витрати ексергії, грн/1000 м³; ρ_a – питома густина повітря, кг/м³; c_{en} – тариф на енергію, грн/кДж.

Тариф на енергоносії приймається за даними компанії постачальника для певного регіону, наприклад, за тарифами «Київенерго» [24].

Застосування методики поглибленого ексергоекономічного аналізу для вибору найбільш енергоощадного способу осушення повітря в СКП представлено на конкретному прикладі. Розглянемо приміщення зберігання сільськогосподарської продукції – насіння гарбуза. За умов та наявних енергоносіїв вибрано три можливі схеми (рис. 2) осушення повітря

для досягнення необхідних параметрів згідно з технологічним регламентом зберігання продукції такого виду [3]:

1. Механічне осушення (конденсаційний спосіб) з електрокалорифером для догрівання повітря та секцією байпасу повітроохолоджувача для зниження потужності теплообмінника другого підігріву
2. Адсорбційне осушення з електричним теплообмінником для регенерації адсорбенту
3. Комбіноване конденсаційне осушення та подальше доосушення в секції мембранного модуля осушення повітря.

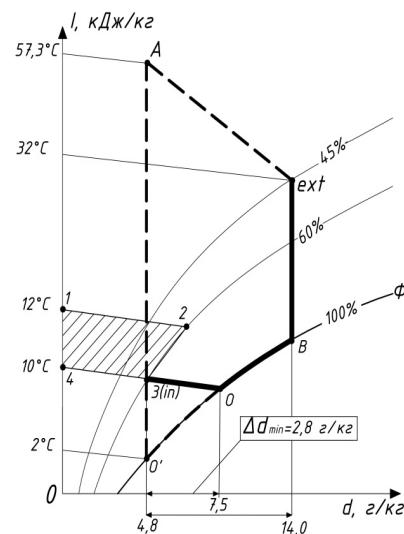


Рис. 2. I-d діаграма процесів обробки повітря для складу зберігання сільськогосподарської продукції: процес $ext-B-O-in$ конденсаційне осушення повітря (схема 1); процес $ext-A-in$ адсорбційне осушення повітря (схема 2); процес $ext-B-O-in$ відповідно комбіноване з мембранним осушенням повітря (схема 3)

Виконано розрахунки складових ексергетичних потоків для теплого періоду року, коли існує потреба в осушенні повітря. При обробці повітря в СКП з конденсаційним осушенням маємо зміну (рис. 3) ексергетичних потенціалів основних складових ексергії волого повітря – термічної, вологісної, механічної та сумарної – від повітрозабірної решітки до викиду відпрацьованого повітря назовні. Пік витрат термічної та вологісної складових ексергії потоку повітря в СКП з конденсаційним осушенням повітря спостерігаються в секції охолодження та осушення повітря (ділянка 5-6 на рис. 3). Значення становлять 1,159 кДж/кг та 0,879 кДж/кг відповідно.

Витрати механічної складової ексергії потоку повітря, які мають найбільші піки в елементах 9 і 16, еквівалентні повному тиску припливного та витяжного вентиляторів відповідно.

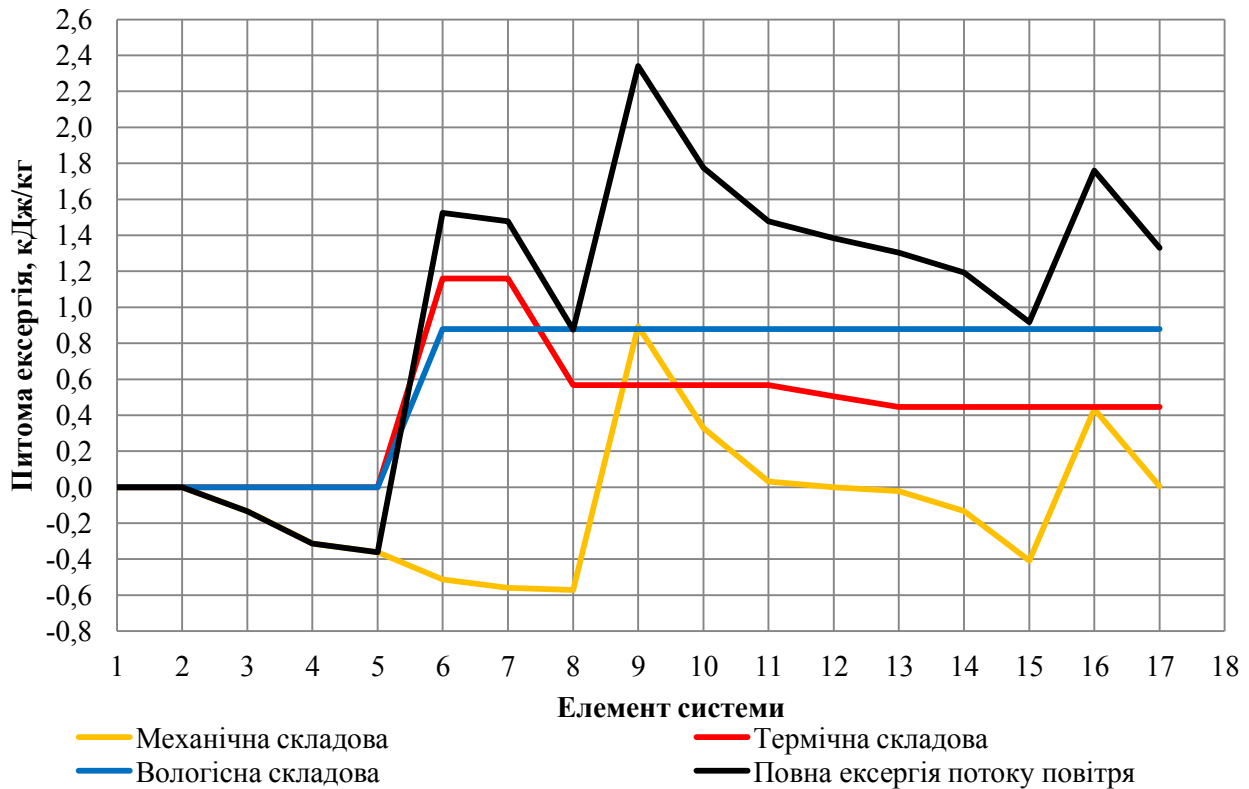


Рис. 3. Діаграма ексергетичних потоків для теплого періоду року при обробці повітря в СКП з конденсаційним осушенням повітря:

- 1 – зовнішнє повітря; 2 – дросель-клапан з приводом; 3 – фільтр G4; 4 – фільтр F5; 5 – повітрянагрівач №1; 6 – повітроохолоджувач з осушенням; 7 – краплеуловлювач; 8 – повітрянагрівач; 9 – припливний вентилятор; 10 – припливні повітроводи; 11 – припливна решітка; 12 – приміщення; 13 – витяжна решітка; 14 – витяжні повітроводи; 15 – фільтр F7; 16 – вентилятор витяжка; 17 – викид повітря назовні

При обробці повітря в СКП з адсорбційним осушенням повітря (рис. 4) пік витрат термічної та вологісної складових ексергії спостерігається в секціях адсорбційного осушення повітря (ділянка 5-6 рис. 4) та в секції нагрівання повітря для регенерації адсорбенту (ділянка 16-17, рис. 4). Значення термічної та вологісної складових ексергії для відповідних секцій обробки повітря становлять 1,543 кДж/кг та 0,879 кДж/кг.

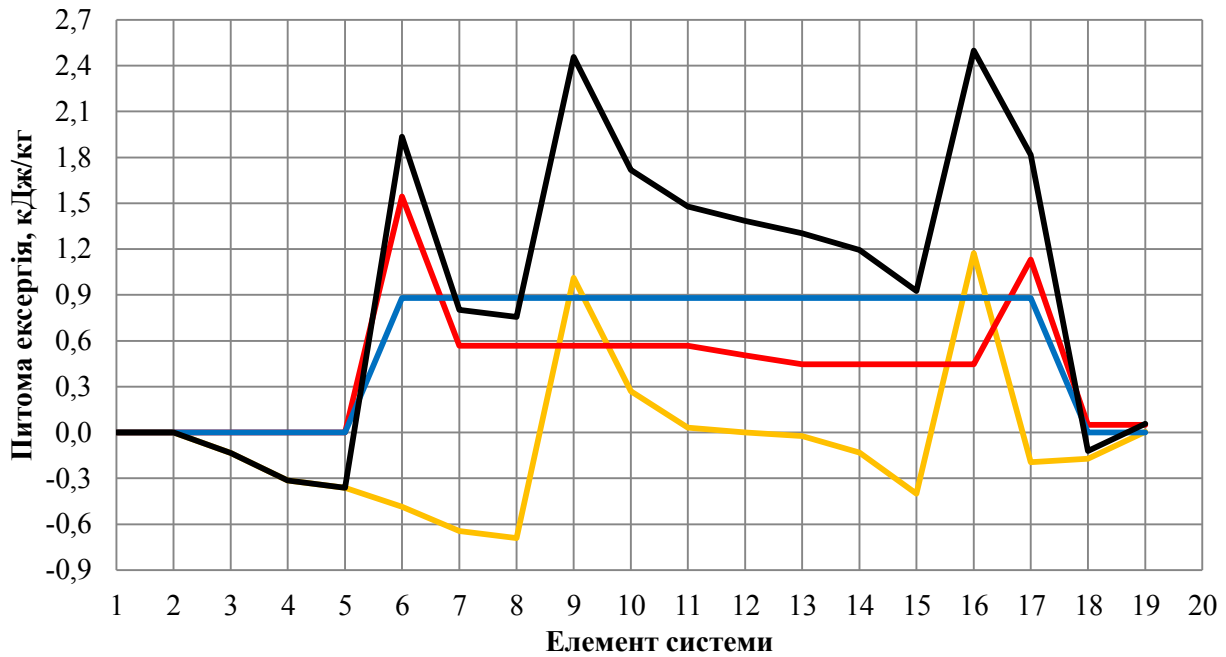
Зміна значень термічної та вологісної складових ексергії потоку повітря в СКП з комбінованим мембранним осушенням (рис. 5) характерна тим, що ділянка 5-6-7-8 не має явно виражених піків. Максимальні значення термічної складової становлять 0,571 кДж/кг, що у два рази менше від пікового значення при конденсаційному способі обробки повітря та у 2,7 разів менше ніж при адсорбційному осушення повітря.

Результати порівняльних розрахунків ЕККД (рис. 6) для трьох вибраних схем обробки повітря за формулами (13) та (14) показують, що найвищий ЕККД «нетто» та «брутто» відповідає комбінованому мембранному осушенню повітря. ЕККД «нетто» для зазначеної СКП на

16 % більше за ЕККД «нетто» СКП з конденсаційним осушенням повітря, і на 48 % більше за ЕККД «нетто» СКП з адсорбційним способом осушення повітря. ЕККД «брутто» для СКП з комбінованим мембранним осушенням повітря на 43,5 % більше за ЕККД «брутто» СКП з конденсаційним осушенням повітря, і на 54,6 % більше за ЕККД «брутто» СКП з адсорбційним способом осушення повітря.

З діаграми видно, що використання СКП з комбінованим мембранним осушенням для обробки повітря в складі зберігання насіння гарбузу збільшує ЕККД «брутто» майже вдвічі порівняно з іншими можливими способами обробки повітря для досягнення параметрів повітря згідно з технологічним регламентом зберігання продукції такого виду. Як видно з діаграми, ексергетичний аналіз дає коректну, але не повну оцінку. Як результат, можлива суперечність у визначенні найбільш енергоощадного способу обробки повітря в СКП.

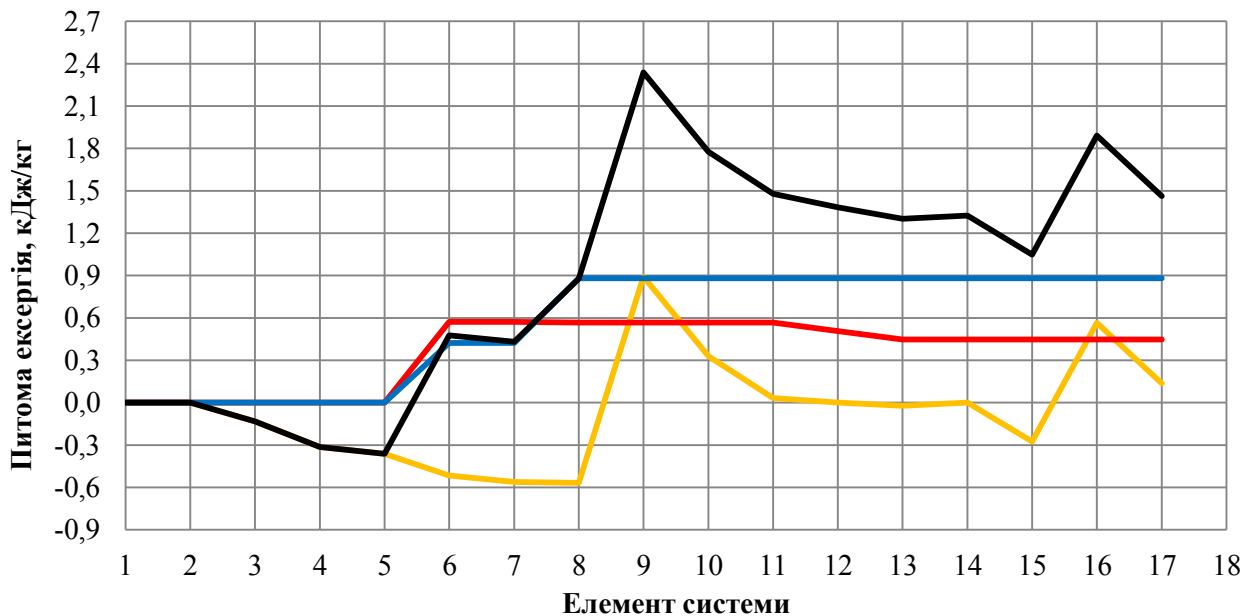
Розглянемо (рис. 7) накопичення питомої ексергетичної вартості потоку повітря на 1000 м³ повітря для трьох вибраних схем. Для зручності подальшого аналізу прийнято наступні скорочення назв цих схем:



— Механічна складова — Термічна складова
— Вологісна складова — Повна ексергія потоку повітря

Рис. 4. Діаграма ексергетичних потоків для теплого періоду року при обробці повітря в СКП з адсорбційним доосушенням повітря:

- 1 – зовнішнє повітря; 2 – дросель-клапан з приводом; 3 – фільтр G4; 4 – фільтр F5; 5 – повітрянагрівач №1; 6 – адсорбційний осушувач; 7 – повітроохолоджувач; 8 – краплевлловлювач; 9 – припливний вентилятор; 10 – припливні повітроводи; 11 – припливна решітка; 12 – приміщення; 13 – витяжна решітка; 14 – витяжні повітроводи; 15 – фільтр F7; 16 – витяжний вентилятор; 17 – нагрівач повітря для регенерації адсорбенту; 18 – адсорбційний осушувач (десорбція); 19 – викид повітря назовні



— Механічна складова — Термічна складова
— Вологісна складова — Повна ексергія потоку повітря

Рис. 5. Діаграма ексергетичних потоків для теплого періоду року

при обробці повітря в СКП з комбінованим мембранним доосушенням повітря:

- 1 – зовнішнє повітря; 2 – дросель-клапан з приводом; 3 – фільтр G4; 4 – фільтр F5; 5 – повітрянагрівач №1; 6 – повітроохолоджувач з осушенням; 7 – краплевлловлювач; 8 – мембранний модуль осушення повітря; 9 – припливний вентилятор; 10 – припливні повітроводи; 11 – припливна решітка; 12 – приміщення; 13 – витяжна решітка; 14 – витяжні повітроводи; 15 – фільтр F7; 16 – витяжний вентилятор; 17 – викид повітря назовні

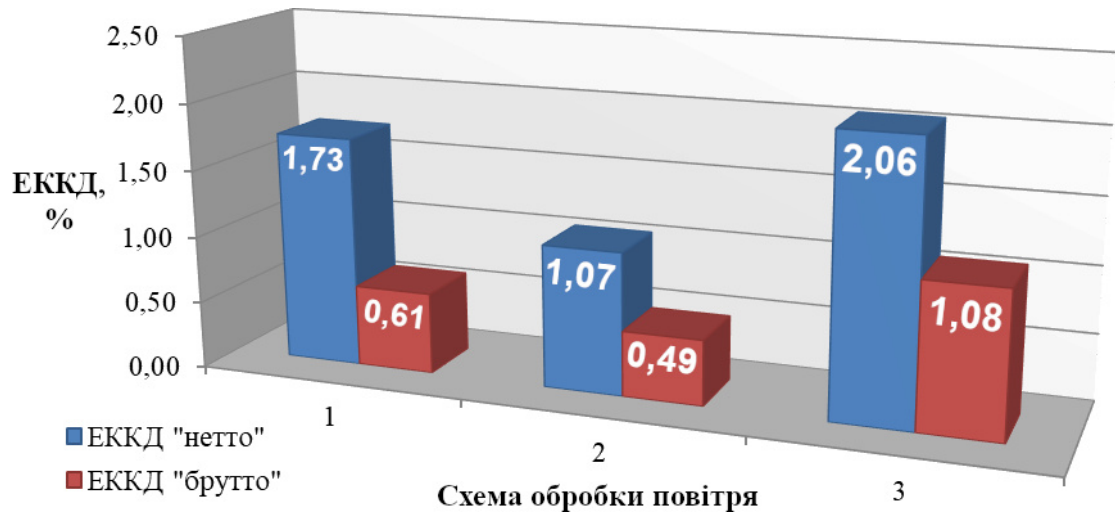


Рис. 6. Результати розрахунків ЕККД для трьох вибраних схем обробки повітря приміщення зберігання сільськогосподарської продукції (насіння гарбуза):
 1 – СКП з конденсаційним осушенням повітря; 2 – СКП з адсорбційним осушенням повітря;
 3 – СКП з комбінованим мембранним доосушенням повітря.

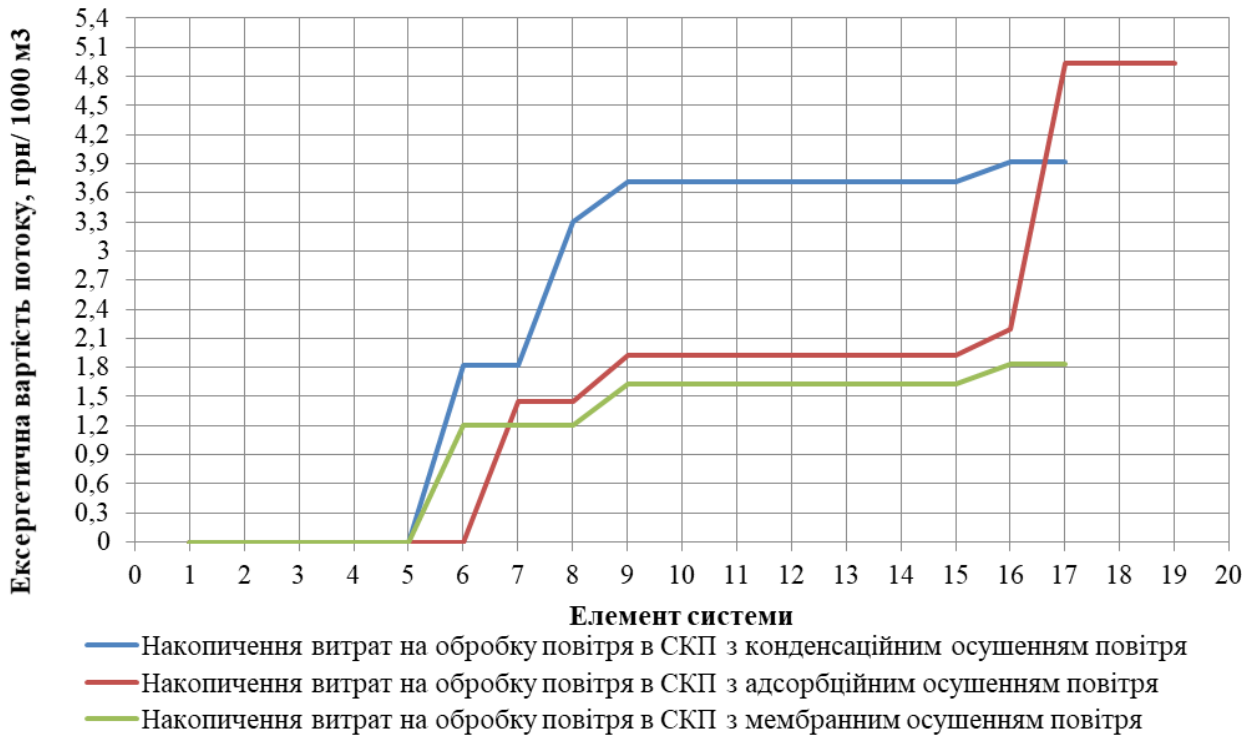


Рис. 7. Накопичення витрат (питомої ексергетичної вартості потоку повітря) на 1000 м³ повітря для трьох вибраних схем обробки повітря приміщення зберігання насіння гарбуза при його обробці в секціях центрального кондиціонера

- DCM – конденсаційне осушення повітря;
- DAM – адсорбційне осушення повітря;
- DMM – мембранне осушення повітря.

З діаграми на рис. 7 видно, що зростання вартості ексергії в схемах DCM і DMM спостерігається з моменту обробки в секції охолодження (конденсаційного осушення – поз. б) повітря. При цьому витрати на осушення повітря для схеми DCM на 33,6% перевищують витрати для схеми DMM. Для схеми DAM зростання витрат у секції адсорбційного осушення

повітря не суттєве, а значення знаходиться нижче точності розрахунку. Спричинено це тим, що для здійснення процесу ззовні підводиться лише електрична енергія для обертання роторного теплообмінника, потужність двигуна якого становить 45 Вт.

Після секції адсорбційного осушення повітря в схемі DAM спостерігається зростання витрат на «сухе» (вздовж $d = \text{const}$) охолодження повітря. Значення затрат на охолодження повітря до параметрів припливу для DAM на 17 %

більша за витрати на попереднє охолодження повітря в схемі DMM.

Наступне зростання витрат ексергії для схеми DCM спостерігається в процесі догрівання до параметрів припливного повітря (на рис. 7 відрізок 7-8). Також для всіх трьох схем подальше зростання витрат відбувається на переміщення повітря припливним вентилятором (на рис. 7 ділянка 8-9).

Таким чином, з діаграми зрозуміло, що на ділянці від повітрязабірної решітки до подачі повітря в приміщення витрати ексергії на оброблення припливного повітря для схеми DCM в 2,2 разів більші за аналогічні витрати для схеми DMM. А витрати на оброблення припливного повітря для схеми DAM на 14,5 % більші ніж для схеми DMM.

Для всіх трьох схем характерне зростання затрат ексергії на переміщення повітря витяжним вентилятором (на рис. 7 ділянка 15-16). Проте для схеми DAM також присутні додаткові витрати ексергії в процесі підігріву повітря для регенерації адсорбенту (відрізок 16-17 на рис. 7).

Отже, з діаграми видно, що сумарні витрати ексергії на оброблення повітря для схеми DCM у два рази більші за аналогічні витрати для схеми DMM. А сумарні витрати на оброблення повітря для схеми DAM в 2,5 більші ніж для схеми DMM. Найбільше зростання вартості на енергоносії спостерігається в схемі DAM у процесі нагрівання повітря для регенерації адсорбенту. Для схеми DCM, де для осушення повітря реалізуються процеси традиційного осушення з конденсацією вологи, збільшення затрат порівняно з DMM спричинено наявністю секції другого підігріву припливного повітря.

Висновки. Застосування поглибленого ексергоекономічного методу оцінки підвищення енергоефективності в процесах оброблення повітря дає коректні результати, які можуть бути застосовані в системах на стадіях проектування та реконструкції. Згідно з результатами ексергоекономічного аналізу, найбільше зростання цін на енергоносії спостерігається в схемі DAM у процесі нагрівання повітря для регенерації адсорбенту. Для схеми DCM, де для осушення повітря реалізуються процеси традиційного осушення з конденсацією вологи, збільшення затрат в порівнянні з DMM спричинено наявністю секції другого підігріву припливного повітря. Сумарні витрати ексергії на оброблення повітря для схеми DCM в 2 рази більші за аналогічні витрати для схеми DMM. А сумарні витрати на оброблення повітря для схеми DAM в 2,5 рази більші ніж для схеми DMM. Згідно з результатами поглибленого ексергетичного та ексергоекономічного порівняльного аналізу застосування DMM схеми обробки повітря для приміщення зберігання насіння гарбуза має переваги перед схемами DCM, DAM, а саме: зниження енерговитрат на обробку повітря і, як наслідок, зменшення експлуатаційних затрат СКП.

Перспективи подальших досліджень. Подальші дослідження, після проведення дослідів на пілотному об'єкті, будуть направлені на розроблення конструкції для корисної моделі осушувача повітря з використанням напівпроникних мембран та уточнення й поглиблення теоретичних положень.

Література

1. Гордеева А.В. Плодоовощеводство. Производственное обучение / А.В. Гордеева, Н.И. Козлов, В.В. Скорина. – Минск: Урожай-2002. – 432 с. – ISBN: 985-04-0506-6.
2. Трисвятский Л.А. Хранение и технология сельскохозяйственных продуктов / Л. А. Трисвятский, Б. В. Лесик, В. Н. Курдина. – Москва: Агропромиздат, 1991. – 415 с.: ил. – ISBN 5-10-001955-7.
3. Бутяйкин В.В. Технология хранения и переработки сельскохозяйственной продукции / В.В. Бутяйкин. – Саранск: МГУ им. Н. П. Огарёва, 2012. – 161 с.
4. ДБН В.2.5-67:2013. Опалення, вентиляція та кондиціонування. – Чинні від 01.01.2014. – Київ: Укрархбудінформ, 2013. – V, 141 с.
5. Липа А. И. Кондиционирование воздуха. Основы теории. Современные технологии обработки воздуха / А. И. Липа. – Одеса: ОГАХ «Издательство ВМВ». – 2010. – 607с., ил. – ISBN 978-966-413-146-6.
6. Богословский В. Н. Кондиционирование воздуха холодоснабжение / В. Н. Богословский, О.Я. Кокорин, Л.В. Петров. – Москва: Стройиздат, 1985. – 367с.
7. Баркалов Б. В. Кондиционирование воздуха в общественных, промышленных и жилых зданиях / Б. В. Баркалов, Е. Е. Карпис. – Москва: Стройиздат, 1982. – 312 с.
8. Нимич Г. В. Современные системы кондиционирования воздуха / Г. В. Нимич, В. А. Михайлов, Е. С. Бондарь. – «ИВИК», ТОВ «Видавничий будинок», 2003. – 626 с. – ISBN 966-7671-65-8.
9. Задоянний О. В. Експериментальні дослідження осушення повітря з використанням синтетичних напівпроникних мембран в системах кондиціонування повітря / О. В. Задоянний, Ю. М. Євдокименко // Вентиляція, освітлення та теплогазопостачання: Наук.-техн. зб. – 2018. – Вип. 24. – С. 24-31.

10. Mujahid Rafique M. Energy, Exergy and Anergy Analysis of a Solar Desiccant Cooling System / M. Mujahid Rafique, P. Gandhidasan, Luai M. Al-Hadhrami, Shafiqur Rehman // *Journal of Clean Energy Technologies*. – 2016. – Vol. 4. – No. 1. – pp. 78-83. DOI: 10.7763/JOCET.2016.V4.257
11. Boer D. Exergy and Structural Analysis of an Absorption Cooling Cycle and the Effect of Efficiency Parameters / D. Boer, M. Medrano, M. Nogués // *International Journal of Thermodynamics*. – 2005. – Vol. 8. – No. 4. – pp. 191-198. – ISSN 1301-9724. DOI: 10.5541/ijot.161
12. Shmit B. D. Design of equilibrium Stages proces / B.D. Shmit. – McGraw-Hill, New York, 1963. – 647 p.
13. Rang Tu. Lowering the regeneration temperature of a rotary wheel dehumidification system using exergy analysis / Rang Tu, Xiao-Hua Liu, Yi Jiang // *Energy Conversion and Management*. – 2015. – Vol. 89. – pp. 162-174. <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2014.09.068>
14. Закон України Про енергозбереження № 74/94-ВР від 01.07.1994. – Редакція від 23.07.2017. – URL: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/74/94-вр>
15. ДБН В.1.2-11-2008. Основні вимоги до будівель і споруд. Економія енергії. – Чинні від 01.10.2008. – Київ: Укрархбудінформ, 2008. – 13 с.
16. 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.* – 2014. – №6. С.10-18.
17. Бродянский В. М. Эксергетические расчеты технических систем: Справ.пособие АН УССР. Институт технической теплофизики / В. М. Бродянский, Г. П. Верхивкер, Я. Я. Карчев и др. – Киев: Наук. Думка, 1991. – 360 с. – ISBN 5-12-0011397-X.
18. Задоянний О. В. Эксергетичні критерії при оцінці енергоощадності систем кондиціонування повітря будівель і споруд / О. В. Задоянний // *Вентиляція, освітлення та теплогазопостачання: Наук.-техн. зб.* – 2014. – Вип. 17. – С.3-9.
19. Бродянский В. М. Эксергетический метод и его приложения / В.М.Бродянский, В. Фратшер, К. Михалек. – Москва: Энергоатомиздат, 1988. – 288 с. – ISBN 5-283-00152-0
20. Luigi Marletta. Air Conditioning Systems from a 2-nd Law Perspective / Luigi Marletta // *Entropy*. – 2010. – No 12. – pp. 859-877. doi:10.3390/e12040859
21. Задоянний О. В. Види ексергії в системах кондиціонування повітря та їх визначення / О. В. Задоянний, Ю. М. Євдокіменко // *Вентиляція, освітлення та теплогазопостачання: Наук.-техн. зб.* – 2016. – Вип. 19. – С.3-15.
22. Задоянний О. В. Эксергетична оцінка обробки повітря в центральній прямооточній системі кондиціонування повітря / О. В. Задоянний, А. Котляров // *Енергоефективність в будівництві та архітектурі: Наук.-техн. зб.* – 2014. – №6. – С.95-100.
23. Zadoyanny O. V. Exergoeconomic Analysis of Air Cooling / O. V. Zadoyanny, Yu. M. Yevdokimenko // *Вентиляція, освітлення та теплогазопостачання: Наук.-техн. зб.* – 2016. – Вип. 20. – С.14-23.
24. Роздрібні тарифи для споживачів електричної енергії у місті Києві. URL: <https://www.nerc.gov.ua/?id=18353>

References

1. Gordeeva A. V., Kozlov N. I., Skorina V. V. *Plodoovoshchevodstvo. Proizvodstvennoe obuchenie. Urozhai-2002*. 432 p. ISBN: 985-04-0506-6.
2. Trisvyatskiy L. A., Lesik B. V., Kurdina V. N. *Khranenie i tekhnologiya selskokhoziaistvennykh produktov. Agropromizdat*, 1991. 415 p. ISBN 5-10-001955-7.
3. Butiaikin V. V. *Tehnologiya khraneniia i pererabotki selskokhoziaistvennoi produktsii*. Saransk: MGU im. N. P. Ogaryova, 2012. 161 с.
4. *Opalennia, ventyliatsiia ta kondytsionuvannia*. DBN V.2.5-67:2013, Ukrarkhbudinform, 2013.
5. Lipa A. I. *Konditsionirovanie vozduha. Osnovyi teorii. Sovremennyye tekhnologii obrabotki vozduha*. OGAKH «Izdatelstvo VMV». 2010. 607 p. ISBN 978-966-413-146-6.
6. Bogoslovskii V. N., Kokorin O. Ya., Petrov L. V. *Konditsionirovanie vozduha kholodosnabzhenie*. Stroizdat, 1985. 367 p.
7. Barkalov B. V., Karpis E. E. *Konditsionirovanie vozduha v obshchestvennykh, promyshlennykh i zhilykh zdaniakh*. Stroizdat, 1982. 312 p.
8. Nimich G. V., Mikhailov V. A., Bondar E. S. *Sovremennyye sistemy konditsionirovaniia vozdukha*. «IVIK», TOV «Vidavnychiy budynok», 2003. 626 p. ISBN 966-7671-65-8.
9. Zadoiannyi O. V., Yevdokymenko Yu. M. “Eksperymentalni doslidzhennia osushennia povitria z vykorystanniam syntetychnykh napivpronyknykh membran v systemakh kondytsionuvannia povitria.” *Ventyliatsiia, osviltennia ta teplohapostachannia: Nauk.-tekh. zb.* 2018. Vyp. 24. С. 24-31.
10. M. Mujahid Rafique, P. Gandhidasan, Luai M. Al-Hadhrami, Shafiqur Rehman “Energy, Exergy and Anergy Analysis of a Solar Desiccant Cooling System.” *Journal of Clean Energy Technologies*. 2016. Vol. 4. No. 1. pp. 78-83. DOI: 10.7763/JOCET.2016.V4.257

11. Boer D., Medrano M., Nogués M. "Exergy and Structural Analysis of an Absorption Cooling Cycle and the Effect of Efficiency Parameters." *International Journal of Thermodynamics*. 2005. Vol. 8. No. 4. pp. 191-198. DOI: 10.5541/ijot.161
12. Shmit B. D. *Design of equilibrium Stages proces*. McGraw-Hill, New York, 1963. 647 p.
13. Rang Tu, Xiao-Hua Liu, Yi Jiang. "Lowering the regeneration temperature of a rotary wheel dehumidification system using exergy analysis." *Energy Conversion and Management*. 2015. Vol. 89. pp. 162-174. <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2014.09.068>
14. Закон України Про енергозбереження № 74/94-VR від 01.07.1994.
15. *Основні вимоги до будівел і споруд. Економія енергії*. ДБН В.1.2-11-2008, Ukrarkhbudinform, 2008.
16. Labai V. Y., Harasym D. I. "Stan i perspektyvy pidvyshchennia enerhoefektyvnosti system kondytsiuvannia povitria chystykh prymishchen." *Enerhoefektyvnist v budivnytstvi ta arkhitekturi: Nauk.-tekhn. zb.* 2014. №6. pp.10-18.
17. Бродянский В. М., Верхивкер Г. П., Карчев Я. Я. и др. *Эксергетические расчеты технических систем: Справ. пособие АН УССР. Институт технической теплофизики*. Наук. Думка, 1991. 360 с. ISBN 5-12-0011397-X.
18. Zadoiannyi O. V. "Ekserhetychni kryterii pry otsyntsi enerhooshchadnosti system kondytsionuvannia povitria budivel i sporud." *Ventylatsiia, osvittennia ta teplohozopostachannia: Nauk.-tekhn. zb.* 2014. Vyp. 17. pp. 3-9.
19. Brodianskii V. M., Fratsher V., Mikhalek K. *Eksergeticheskii metod i ego prilozheniia*. Energoatomizdat, 1988. 288 p. ISBN 5-283-00152-0
20. Luigi Marletta. "Air Conditioning Systems from a 2-nd Law Perspective." *Entropy*. 2010. No 12. pp. 859-877. doi:10.3390/e12040859
21. Zadoiannyi O. V., Yevdokymenko Yu. M. "Vydy ekserhii v systemakh kondytsionuvannia povitria ta yikh vyznachennia." *Ventylatsiia, osvittennia ta teplohozopostachannia: Nauk.-tekhn. zb.* 2016. Vyp. 19. pp. 3-15.
22. Zadoiannyi O. V., Kotliarov A. "Ekserhetychna otsinka obrobky povitria v tsentralnii priamotochnii systemi kondytsionuvannia povitria." *Enerhoefektyvnist v budivnytstvi ta arkhitekturi: Nauk.-tekhn. zb.* 2014. №6. pp. 95-100.
23. Zadoiannyi O. V., Yevdokymenko Yu. M. "Exergoeconomic Analysis of Air Cooling." *Ventylatsiia, osvittennia ta teplohozopostachannia: Nauk.-tekhn. zb.* 2016. Vyp. 20. pp.14-23.
24. Rozdribni taryfy dlia spozhyvachiv elektrychnoi enerhii u misti Kyievi. URL: <https://www.nerc.gov.ua/?id=18353>

УДК 697.94

Углубленный эксергоэкономический анализ как действенный инструмент разработки энергосберегающих схемных решений для систем кондиционирования воздуха (на примере системы мембранного осушения воздуха для помещения хранения семян)

О. В. Задоянний., Ю. Н. Евдокименко¹

¹ доцент, Киевский национальный университет строительства и архитектуры, г. Киев, Украина, bonnesante91@gmail.com
ORCID: 0000-0001-6781-9756

² аспирант, Киевский национальный университет строительства и архитектуры, г. Киев, Украина, bonnesante91@gmail.com
ORCID: 0000-0002-1697-0816

Аннотация. В работе представлен метод углубленного эксергоэкономического анализа, а также пример его применения для выбора наиболее энергоэффективного способа осушения воздуха для помещения хранения сельскохозяйственной продукции, а именно семян тыквы. Поданы теоретические зависимости для определения составляющих эксергии потока влажного воздуха (термической, влажностной и механической, а также полной эксергии). Приведены формулы и методика определения эксергетического коэффициента полезного действия «нетто» и «брутто». Для визуального представления расчётов и анализа деструкции эксергии в СКП построены эксергетические потоковые диаграммы. Результаты расчётов затрат на обработку воздуха в системе кондиционирования воздуха представлены в виде потоковых накопительных диаграмм. По результатам анализа и сравнения эксергоэкономических затрат для обеспечения необходимых условий хранения выбрана схема с комбинированным мембранным осушением воздуха.

Ключевые слова: кондиционирования воздуха, эксергоэкономический анализ, эксергетическая эффективность, хранение семян, удельная эксергия, осушение воздуха, энергоэффективность, потоковая эксергетическая диаграмма

UDC 697.94

In-Depth Exergoeconomic Analysis as an Effective Tool for the Development of Energy-Efficient Circuit Solutions in Air-Conditioning Systems (for Example, a Membrane Air Dehumidification System for Seed Storage Premises)

O. Zadoiannyi¹, Y. Yevdokymenko¹

¹graduate student. Kyiv National University of Construction and Architecture, Kyiv, Ukraine, bonnesante91@gmail.com

ORCID: 0000-0001-6781-9756

²associate professor. Kyiv National University of Construction and Architecture, Kyiv, Ukraine, bonnesante91@gmail.com

ORCID: 0000-0002-1697-0816

Abstract. The paper presents a method of in-depth exergoeconomic analysis, as well as an example of its application to select the most energy-efficient method of air dehumidification for storing agricultural products, namely pumpkin seeds. Theoretical dependences are presented for determining the exergy components of moist airflow (thermal, humidity and mechanical, as well as full exergy). The formulas and the methodology for determining the exergy efficiency "net", which reflects only the internal thermodynamic transformations of air in the air-conditioning system and the exergy efficiency "gross", taking into account the amount of exergy from external sources are given. For a visual representation of the calculations and analysis of exergy destruction in the air conditioning systems, exergy flow diagrams are constructed. The results of calculations of the costs of processing air in an air conditioning system are presented in the form of streaming accumulative diagrams. Based on the results of analysis and comparison of exergoeconomic costs, a scheme with combined membrane dehumidification of air was selected to ensure the necessary storage conditions. Exergy efficiency "net" for an air handling unit with combined membrane dehumidification of air is 16 % higher than exergy efficiency "net" for an air handling unit with condensing air drying, and 48 % more than exergy efficiency "net" for an air handling unit with adsorption method of air drying. Exergy efficiency "gross" for an air handling unit with combined membrane air drying 43.5 % more than exergy efficiency "gross" for an air handling unit with condensing air drying, and 54.6 % more exergy efficiency "gross" for an air handling unit with adsorption air drying. In addition, according to in-depth exergoeconomic analysis, the cost of air treatment in air conditioning systems is halved.

Keywords: air conditioning, exergoeconomic analysis, exergetic efficiency, seed storage, specific exergy, dehumidification, energy efficiency, flow exergy chart.

Надійшла до редакції / Received 04.10.2019