

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ  
КИЇВСЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ  
БУДІВНИЦТВА І АРХІТЕКТУРИ

**ЄВДОКИМЕНКО ЮРІЙ МИКОЛАЙОВИЧ**

 УДК 697.93

**ЕНЕРГООЩАДНА СИСТЕМА КОНДИЦІОНУВАННЯ ПОВІТРЯ З  
НАПІВПРОНИКНОЮ МЕМБРАНОЮ ПРИМІЩЕНЬ ДЛЯ ЗБЕРІГАННЯ  
НАСІННЯ РОДИНИ ГАРБУЗОВИХ**

05.23.03 – Вентиляція, освітлення та теплогазопостачання

**АВТОРЕФЕРАТ**  
дисертації на здобуття наукового ступеня  
кандидата технічних наук

Київ – 2021

Дисертацією є рукопис.

Робота виконана на кафедрі теплогазопостачання та вентиляції Київського національного університету будівництва і архітектури.

**Науковий керівник:** кандидат технічних наук, доцент  
**ЗАДОЯННИЙ ОЛЕКСАНДР ВАСИЛЬОВИЧ**,  
доцент кафедри теплогазопостачання і вентиляції  
Київського національного університету будівництва і  
архітектури.

**Офіційні опоненти:** доктор технічних наук, професор  
**ВОЗНЯК ОРЕСТ ТАРАСОВИЧ**,  
професор кафедри теплогазопостачання і вентиляції  
Національного університету «Львівська політехніка».

кандидат технічних наук, доцент  
**СУХОДУБ ІРИНА ОЛЕГІВНА**,  
доцент кафедри теплотехніки та енергозбереження  
Національного технічного університету України  
"Київський політехнічний інститут імені Ігоря  
Сікорського".

Захист відбудеться "28" Вересня 2021р. о 11<sup>00</sup> годині на засіданні спеціалізованої вченої ради Д 26.056.07 при Київському національному університеті будівництва і архітектури за адресою: 03037, м. Київ, Повітрофлотський просп., 31, ауд. 466.

З дисертацією можна ознайомитись у бібліотеці Київського національного університету будівництва і архітектури за адресою: 03037, м. Київ, Повітрофлотський просп., 31.

Автореферат розісланий "25" серпня 2021 р.

Вчений секретар спеціалізованої  
Вченої ради Д 26.056.07  
доктор технічних наук, професор

Ткаченко Т.М.

## ЗАГАЛЬНА ХАРАКТЕРИСТИКА РОБОТИ

**Актуальність теми.** В сучасних економічних умовах в Україні, забезпечення ефективного використання енергоресурсів стає основним завданням при проектуванні та розробленні енергоперетворювальних систем.

Системи кондиціонування повітря (СКП) різного призначення споживають енергоресурси в обсязі, який закладено в проектних рішеннях і які в свою чергу відповідають нормативам для створення та підтримки відповідних комфортних або технологічних параметрів повітря. Для забезпечення цих параметрів здійснюються такі основні термодинамічні процеси як охолодження, нагрівання, зволоження та осушення повітря. Вказані процеси постійно удосконалюються з метою підвищення ефективності й одночасного зменшення енергоспоживання.

Для приміщення зберігання насіння гарбузу існують, визначені технологічним регламентом умови, які повинні бути забезпечені впродовж всього періоду зберігання. Як відомо, для підтримання відносної вологості в приміщеннях застосовують методи конденсаційного або адсорбційного осушення повітря. Для конденсаційного способу характерні значні витрати енергії для переохолодження повітря нижче точки роси й наступного нагрівання до параметрів припливу. Крім того при переохолодженні нижче 5 °С відбувається обмерзання теплообмінника і система функціонує в циклічному режимі. Системи адсорбційного осушення, потребують постійної регенерації адсорбенту, що пов'язано з підведенням додаткової енергії, а також енерговитрат при сухому охолодженні повітря до параметрів припливного повітря (54 кДж/кг оброблюваного повітря).

Для підвищення енергоощадності вибір способу обробки повітря для досягнення необхідних умов зберігання продукції необхідно проводити з використанням методів порівняння ексергетичних ККД.

Поряд з цим експлуатаційні витрати, СКП які працюють для підтримання встановлених параметрів повітря для належного перебігання технологічного процесу або підтримання сприятливих умов зберігання продукції певного виду впливають на вартість такої продукції. Отже, при оцінці та порівнянні різних схем систем кондиціонування повітря мають враховуватись не тільки термодинамічні показники, а й витрати від перетворення енергії певного виду.

Таким чином, енергоощадність СКП будівель і споруд є актуальним завданням, вирішення якого дає можливість оптимізації систем за показниками енергоспоживання.

**Зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами.** Робота виконана згідно з “Державною програмою підтримки енергоефективних проектів”, безпосередньо пов'язана з планами держбюджетної тематики Київського національного університету будівництва і архітектури, які виконувалися на замовлення Міністерства освіти і науки України (№ держреєстрації 0116U000846).

**Мета дослідження** полягає в науковому обґрунтуванні зменшення енергоспоживання систем кондиціонування повітря приміщення для зберігання насіння гарбуза, з застосуванням мембранного способу осушення повітря.

**Завдання дослідження:**

- провести літературний огляд та проаналізувати данні з питань способів боротьби з обмерзанням теплообмінника в процесі конденсаційного осушення повітря приміщення для зберігання насіння гарбуза.
- розробити фізичну модель процесу мембранного осушення повітря;
- провести поглиблений ексергетичний порівняльний аналіз з використанням поточкових діаграм для систем з конденсаційним, адсорбційним та ізотеричним мембранним осушенням повітря з визначенням ексергетичного ККД;
- провести ексергоекономічний порівняльний аналіз систем кондиціонування повітря з конденсаційним, адсорбційним та ізотеричним мембранним осушенням повітря з визначенням витрат ексергії в процесі обробки повітря;
- провести експериментальні дослідження процесу мембранного осушення повітря з визначенням потенціалу осушення повітря на ПВХ мембрані, при заданих вхідних та вихідних параметрах процесу осушення повітря;
- провести економічні порівняння систем кондиціонування повітря приміщення для зберігання насіння родини гарбузових з ізотермічним мембранним осушенням повітря методом поглибленого ексергоекономічного аналізу;
- на основі наукового аналізу, теоретичних та експериментальних даних розробити методику інженерного розрахунку систем кондиціонування повітря з мембранним осушенням приміщень для зберігання насіння гарбузу.

**Об'єкт дослідження** – система кондиціонування повітря приміщення для зберігання насіння гарбуза.

**Предмет дослідження** – енергоощадне ізотермічне осушення повітря за допомогою напівпроникних ПВХ-мембран приміщення для зберігання насіння родини гарбузових.

**Методи дослідження.** Порівняння ефективності перетворення енергії в функціональних блоках та перетворення підведеної ззовні енергії в систем кондиціонування повітря з різними способами осушення проводили методами поглибленого ексергетичного та ексергоекономічного аналізу.

**Наукова новизна одержаних результатів:**

*Вперше:*

- розроблено фізичну модель процесу осушення повітря при русі його вздовж поверхні мембрани, яку описано запропонованою системою диференціальних рівнянь;
- науково обґрунтовано поточкові діаграми складових ексергії вологого повітря при обробленні його в секціях систем кондиціонування повітря приміщень для зберігання насіння родини гарбузових;
- отримана експериментальна залежність зменшення вологовмісту повітряного потоку по довжині мембранного модуля при обробці повітря в секції мембранного осушення.

*Набуло подальшого розвитку:*

- наукове обґрунтування та поглиблення методики ексергоекономічного аналізу для систем кондиціонування повітря приміщення для зберігання насіння родини гарбузових;

**Практичне значення одержаних результатів** полягає в тому, що в результаті експериментальних та теоретичних досліджень розроблено схему, яка дає змогу підвищити енергоощадність та експлуатаційну надійність системи кондиціонування повітря приміщення для зберігання насіння родини гарбузових, з застосуванням ізотермічного, мембранного способу осушення повітря.

**Особистий внесок здобувача.** Безпосередньо автором здійснено:

- інформаційний пошук та аналіз літературних даних за темою дисертації;
- розроблено фізичну модель ізотермічного осушення повітря;
- проведений порівняльний аналіз СКП з різними способами осушення повітря для приміщення зберігання насіння гарбуза, методом поглибленого ексергетичного та ексергоекономічного аналізу;
- проведено експериментальні дослідження процесу ізотермічного осушення повітря на напівпроникній синтетичній ПВХ мембрані;
- отримано експериментальну залежність для визначення ступеню осушення повітря від питомого повітряного навантаження;
- розроблено схему модернізації СКП приміщення для зберігання насіння гарбуза, за адресою с. Голодьки, вінницької обл. з застосуванням мембранного способу осушення повітря.

**Апробація результатів дисертації.** Основні результати досліджень та окремі розділи дисертації доповідались на науково-практичних конференціях Київського національного університету будівництва та архітектури різного рівня: на науково-практичній конференції молодих вчених (Україна, м. Київ, 2012-2020 рр.); на міжнародній науково-практичній конференції «Енергоінтеграція» (Україна, м. Київ, 2013 – 2018 рр.), на міжнародній науково-практичній конференції молодих вчених «БУД-МАЙСТЕР-КЛАС» (Україна, м. Київ, 2015-2016 рр.).

**Публікації.** За матеріалами дисертації опубліковано 11 друкованих наукових праць у різних виданнях. З них дев'ять у наукових фахових виданнях України, а також дві статті у виданнях іноземних держав, тринадцять тез доповідей у збірниках матеріалів конференцій.

**Структура роботи.** Дисертаційна робота викладена на 181 сторінках машинописного тексту, складається зі вступу, 4 розділів, загальних висновків, списку використаних джерел та 4 додатків. Обсяг основного тексту дисертації складає 150 сторінок друкованого тексту. Робота ілюстрована 4 таблицями, 54 рисунками. Список використаних джерел містить 108 найменувань.

### **ОСНОВНИЙ ЗМІСТ ДИСЕРТАЦІЇ**

У **вступі** обґрунтовано вибір теми дослідження, визначені об'єкт і предмет дослідження, сформульовані мета і завдання дослідження, розкриті методи дослідження, наукова новизна, практичне значення і апробація одержаних результатів.

У **першому розділі «Огляд літератури та постановка цілей та задач дослідження»** проаналізовано та узагальнено сучасний стан проблеми застосування систем кондиціонування повітря (далі СКП) з конденсаційним та адсорбційним осушенням повітря для зберігання насіння родини гарбузових в регламентованих умовах. Зазначено місце систем кондиціонування повітря в вирішенні задачі

створення та підтримання належних умов зберігання насіння родини гарбузових. Розглянуті можливі способи осушення повітря в теплий період року при підготовці та підтриманні необхідних параметрів внутрішнього повітря в приміщеннях для зберігання насіння гарбузу. Також проаналізовані сучасні роботи присвячені вирішенню задачі зниження енергоспоживання СКП в процесі осушення повітря. Серед них заслуговує уваги робота вітчизняного автора Алі Ісса - УССР, в якій запропоновано застосування комбінації непрямого випарного охолодження та адсорбційного осушення повітря для зниження енерговитрат в процесі підготовки повітря, а також роботи Hua Liu, Yi Jiang – Китай, присвячені розробці способу зменшення витрат ексергії в процесі адсорбційного осушення повітря. Основну увагу в даних роботах приділяють зниженню температури регенерації адсорбенту шляхом оптимізації процесів оброблення повітря в роторі адсорбційного осушення повітря. Поряд з цим аналізується попереднє охолодження повітря - комбінування конденсаційного та адсорбційного способів осушення повітря - для підвищення загальної ексергетичної ефективності процесу.

Представлено теоретичний аналіз застосування мембранного методу осушення повітря в СКП. Представлена та проаналізована фізична модель руху водяних парів крізь напівпроникні, синтетичні ПВХ мембрани, а також модель осушення повітря в СКП при русі його вздовж мембранного модулю осушення повітря.

На основі теоретичного вивчення літературних джерел сформульовано завдання і напрямки досліджень та намічено шляхи вирішення поставлених задач.

**У другому розділі «Ексергетична ефективність систем кондиціонування повітря»** розкрито основні теоретичні положення поглибленого ексергетичного та ексергоекономічного порівняльного аналізу, який розроблений на кафедрі теплогазопостачання Київського національного університету будівництва та архітектури к. т. н., доцентом Задояним О.В. за участі автора дисертації Євдокименко Ю.М., для аналізу ексергетичної ефективності систем кондиціонування повітря, який враховує аналіз окремо кожної із складових ексергії вологого повітря - термічної, вологісної та механічної.

В Україні та за її межами ексергетичними та ексергоекономічними дослідженнями технічних систем займаються вже тривалий час. Значний внесок у розвиток теоретичних напрацювань та практичних методів оцінки зробили такі вчені: В.М. Бродянский; А.А. Долинский; Морозюк Т.В.; Тсатсароніс Дж.; Драганов Б.Х.; Лозано М.А.; Б.С. Сажин та ін. В роботах вказується на те, що для кожної досліджуваної окремої термодинамічної системи в багатьох випадках, при оцінці та оптимізації енергоощадності систем, необхідно враховувати не тільки коефіцієнти корисної дії, а і вартість спожитої чи виробленої енергії.

Для СКП, зважаючи на значний вплив кожної окремої складової ексергії потоку повітря, варто визначати та порівнювати окремо значення термічної, вологісної та механічної складових. Нижче представлені відомі залежності для визначення складових ексергетичних потоків для оброблюваного повітря в СКП:

Термічна складова ексергії потоку вологого повітря:

$$E_{a,h}^{in} = G_a^{in} \left[ T_a^{ext} (c_{p,d,a} + d_a^{in} c_{p,w,v}) \left( \frac{T_a^{in}}{T_a^{ext}} - 1 - \ln \frac{T_a^{in}}{T_a^{ext}} \right) \right], \text{ Дж/с} \quad (1)$$

Механічна складова ексергії потоку вологого повітря:

$$E_{a,m}^{in} = G_a^{in} \left( T_a^{ext} R_v (0,622 + d_a^{in}) \ln \frac{P_a^{in}}{P_a^{ext}} \right), \text{ Дж/с} \quad (2)$$

Вологісна (хімічна концентраційна) складова ексергії потоку вологого повітря:

$$E_{a,ch,cn,w}^{in} = G_a^{in} \left[ T_a^{ext} R_v \left( (0,622 + d_a^{in}) \ln \frac{0,622 + d_a^{ext}}{0,622 + d_a^{in}} + d_a^{in} \ln \frac{d_a^{in}}{d_a^{ext}} \right) \right], \text{ Дж/с} \quad (3)$$

де:  $G_a^{in}$  – масова витрата повітря, кг/с;  $T_a^{ext}$  – абсолютна температура зовнішнього повітря, °К;  $T_a^{in}$  – абсолютна температура припливного повітря, °К  $c_{p,w,v}$  – питома ізобарна теплоємність вологого повітря, Дж/(кг·°К);  $d_a^{in}$  – вологовміст припливного повітря, кг/кг;  $d_a^{ext}$  – вологовміст зовнішнього повітря, кг/кг;  $P_a^{in}$  – абсолютний тиск припливного повітря, Па;  $P_a^{ext}$  – абсолютний тиск зовнішнього повітря, Па;  $R_v$  – газова стала водяної пари, Дж/(кг·°К);

Складові ексергії повітря, яке видаляється з приміщення, розраховуються за цими ж самими рівняннями, але позначаються верхнім індексом out.

Ексергетичні потоки в СКП, які асоціюються із потоками теплоти, «холоду», води та пари для зволоження повітря та електричної енергії і які споживають відповідні елементи системи, визначають за наступним рівнянням:

Потік фізичної ексергії гарячої води:

$$E_{hta,w,l,m}^{in} = g_{hta,w,l,m} \left[ c_{p,sta,w,l} \left\{ (T_{hta,w,l} - T_a^{ext}) - T_a^{ext} \ln \left( \frac{T_{hta,w,l}}{T_a^{ext}} \right) \right\} + v_{hta,w,l,m} (P_{hta,w,l} - P_a^{ext}) \right], \text{ Дж/с} \quad (4)$$

де:  $g_{hta,w,l,m}$  – масові витрати рідинного теплоносія, кг/с;  $c_{p,tha,w,l}$  – питома ізобарна теплоємність рідинного теплоносія, Дж/(кг·°К);  $T_{hta,w,l}$  та  $T_a^{ext}$  – абсолютна температура, відповідно, теплоносія та зовнішнього повітря, °К;  $v_{hta,w,s}$  – питомий об'єм рідинного теплоносія, м<sup>3</sup>/кг;  $P_{hta,w,l}$  та  $P_a^{ext}$  – тиск, відповідно, рідинного теплоносія та зовнішнього повітря, Па.

Для визначення ексергії холодоносія використовують рівняння 4, позначаючи складові індексом cl замість hta.

Для випадку, коли в якості охолоджувача використовують випарник холодильної машини, підведена до випарника ексергію потоку холодоагенту у стані насиченої пари визначають із залежності:

$$E_{cl,r,v,sat,ph} = g_{cl,r,m} \left[ c_{p,r,sat,v} \left\{ (T_{cl,r,sat,v} - T_a^{ext}) - T_a^{ext} \ln \left( \frac{T_{cl,r,sat,v}}{T_a^{ext}} \right) \right\} + v_{cl,r,sat,v} (P_{cl,r,sat,v} - P_a^{ext}) \right], \text{ Дж/с} \quad (5)$$

де:  $g_{cl,r,m}$  – масова витрата холодоагенту, кг/с;  $c_{p,r,sat,v}$  – питома ізобарна теплоємність холодоагенту в стані пари, Дж/(кг·°К);  $T_{cl,r,sat,v}$  та  $T_a^{ext}$  – абсолютна температура, відповідно, холодоагенту в стані пари та зовнішнього повітря, °К;  $v_{cl,r,sat,v}$  – питомий об'єм холодоагенту в стані пари, м<sup>3</sup>/кг;  $P_{cl,r,sat,v}$  та  $P_a^{ext}$  – тиск, відповідно, холодоагенту в стані пари та зовнішнього повітря, Па;

а у стані рідини за наступною залежністю:

$$E_{cl,r,l,ph} = g_{cl,r,m} \left[ c_{p,r,l} \left\{ (T_{cl,r,l} - T_a^{ext}) - T_a^{ext} \ln \left( \frac{T_{cl,r,l}}{T_a^{ext}} \right) \right\} + v_{cl,r,l} (P_{cl,r,l} - P_a^{ext}) \right], \text{Дж/с} \quad (6)$$

де:  $g_{cl,r,m}$  – масова витрата холодоагенту, кг/с;  $c_{p,r,l}$  – питома ізобарна теплоємність холодоагенту в стані рідини, Дж/(кг·°К);  $T_{cl,r,l}$  та  $T_a^{ext}$  – абсолютна температура, відповідно, холодоагенту в стані рідини та зовнішнього повітря, °К;  $v_{cl,r,l}$  – питомий об'єм холодоагенту в стані рідини, м<sup>3</sup>/кг;  $P_{cl,r,l}$  та  $P_a^{ext}$  – тиск, відповідно, холодоагенту в стані рідини та зовнішнього повітря, Па.

Ексергетичний потік електричної енергії для живлення відповідних секцій споживачів (електрокалорифер, вентилятор та ін.), як відомо з властивостей ексергії, дорівнює електричній енергії:

$$E_{el} = N_{el} \quad \text{Дж/с} \quad (7)$$

Де:  $N_{el}$  – електрична потужність, Дж/с.

Також в даному розділі дисертації наведені основні результати надрукованих наукових праць в яких розкриваються переваги застосування потокових ексергетичних діаграм для представлення та аналізу складових ексергії вологого повітря в СКП при проходженні потоку повітря крізь функціональні секції СКП від повітрозабірної решітки до видалення повітря назовні. Наведені приклади аналізу деструкції ексергії в окремих секціях СКП.

В підрозділі 2.2 представлені залежності для визначення ексергетичної ефективності систем кондиціонування повітря на основі ексергетичних коефіцієнтів корисної дії (ЕККД), виходячи із структури СКП рис.1, яка розглядається з відповідними функціональними елементами СКП та зв'язками між ними.

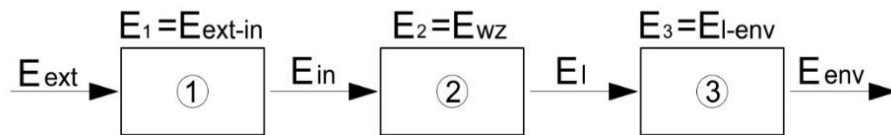


Рис.1. Структура СКП

1,3 – секції підготовки повітря; 2 – приміщення, яке обслуговується СКП.

$$\eta_E^{net} = \frac{\Delta E_{l-in}}{\sum_{i=1}^n E_{ext-in,i}^D + \sum_{i=1}^n E_{l-env,i}^D} \quad (8)$$

де  $E_{l-in}$  – відповідно корисна ексергія повітря, Дж/с;  $E_{ext-in}^D$  – витрачена перед подачею в приміщення в СКП, Дж/с,  $E_{l-env}^D$  – витрачена після видалення з приміщення в СКП, Дж/с.

Представлена залежність 8 ЕККД СКП включає корисну ексергію, що в чисельнику та використану, що в знаменнику. Нею можна користуватись для аналізу ексергетичної ефективності процесів обробки повітря без урахування втрат підведеної ексергії. Втрати ексергії будуть відображати тільки внутрішні термодинамічні перетворення повітря в СКП, тобто зміну стану ексергії «нетто». Втрати ексергії  $E_D$  в даному випадку враховуються в цілому без поділення на «зовнішні» та «внутрішні».

Ексергетична ефективність СКП з урахуванням тільки підведеної ексергії від зовнішніх джерел має вигляд:



$$\eta_E^{brt} = \frac{\Delta E_{l-in}}{\sum_{i=1}^n E_{ext-in,i}^T + \sum_{i=1}^n E_{l-env,i}^T} \quad (9)$$

де  $E_{l-env}$  – відповідно корисно витрачена ексергія повітря, Дж/с;  $E_{ext-in}^T$  – підведена до  $i$ -го вузла ексергія від зовнішніх джерел, Дж/с  $E_{l-env}^T$  – підведена до вузла  $i$ -го ексергія від зовнішніх джерел енергопостачання, Дж/с.

Залежність 9 характеризує ЕККД СКП «брутто», тобто з урахуванням втрат в системі підведеної зовні ексергії.

В підрозділі 2.3 представленні основні положення запропонованої нами методики ексергоекономічного розрахунку СКП, з визначенням ексергетичної вартості при обробленні повітря в секціях СКП. Зроблено порівняльний аналіз з відомими на сьогодні методами проведення ексергоекономічного аналізу різних енергоперетворювальних систем, зокрема методом СПЕСО. Представлені основні відмінності та переваги запропонованого нами підходу до визначення ексергетичної вартості СКП та представлення результатів у вигляді накопичувальної діаграми зростання ексергетичної вартості при русі оброблюваного потоку повітря в секціях СКП від повітрязабірної решітки до видалення повітря на зовні.

В підрозділі 2.4 проведені дослідження з застосування ексергетичних діаграм для аналізу СКП.

Діаграму ексергетичних потоків вологого повітря в СКП нами запропоновано представляти у вигляді діаграми-лінії (графіка) в двовимірній прямокутній системі координат. По вісі ординат відкладають питоме значення ексергії повітря, кДж/кг, а по вісі абсцис - елементи СКП в послідовності основного проходження повітря, що обробляється. Елементи СКП враховуються по всій системі - від повітрязабірної решітки до викиду відпрацьованого повітря назовні. На вісі ординат можна також відкладати значення питомої вартості ексергії та абсолютні значення ексергії для можливості відстеження накопичення витрат (втрат) та деструкції ексергії в процесі термодинамічних перетворень повітря.

Побудова у вказаних координатах перетворень складових ексергії вологого повітря і сумарної для кожного функціонально відокремленого елемента СКП дає змогу візуального відображення та чисельної оцінки її зміни у відповідних елементах та в системі в цілому. Крім того візуалізація ексергетичних перетворень складових ексергії в цій діаграмі дає можливість відокремити та визначити величини корисної деструкції ексергії кожного виду від загальних її витрат, як для кожного функціонального елемента ( функціональної групи елементів) так і для системи в цілому. Ця можливість знімає обмеження у визначенні ексергетичної ефективності вузлів та системи і обчисленні характеристик енергоощадності. У варіанті розмітки вертикальної шкали в одиницях питомих значень грошових витрат (грн/кг повітря) з'являється можливість ексергоекономічної оцінки роботи СКП.

В підрозділі 2.5 на основі описаного вище методу поглибленого ексергетичного аналізу та з застосуванням потокових ексергетичних діаграм проведені дослідження ексергетичної ефективності СКП з різними способами

осушення повітря, а саме: механічне осушення (конденсаційний спосіб), адсорбційне осушення та комбіноване з використанням ізотермічного мембранного осушення повітря.

На рис. 2 представлена діаграма складових ексергетичних потоків для теплого періоду року при обробці повітря в СКП з конденсаційним осушенням повітря. Пік витрат термічної та вологісної складових ексергії потоку повітря в СКП з конденсаційним осушенням повітря спостерігаються в секції охолодження та осушення повітря. Значення складають 1,159 кДж/кг та 0,879 кДж/кг відповідно.

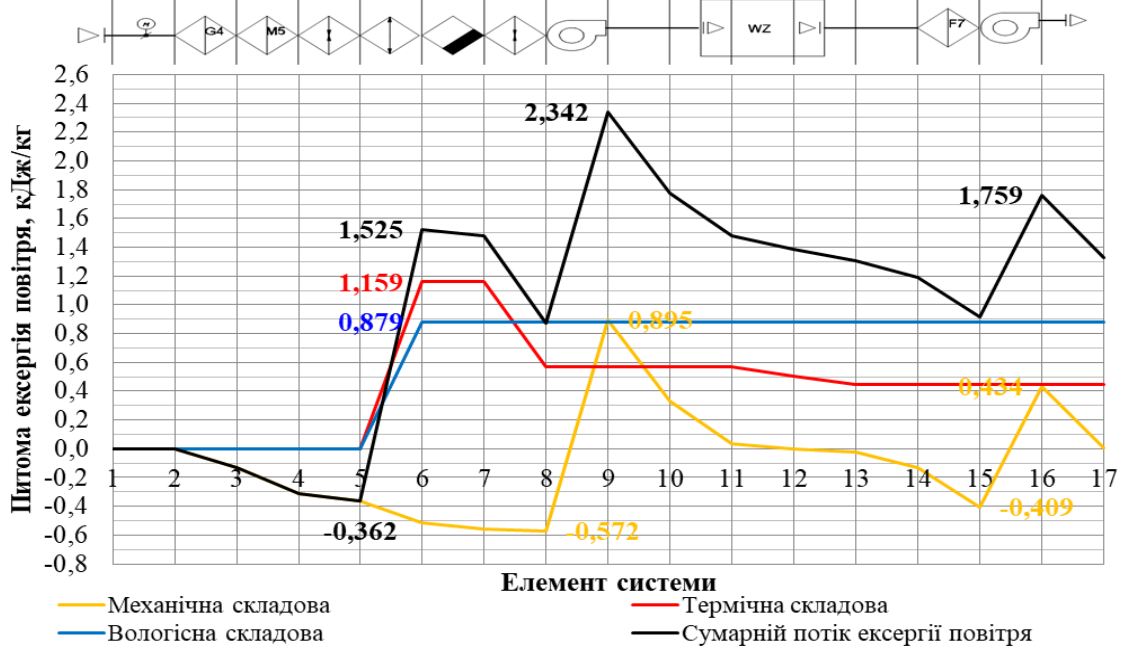


Рис. 2. Діаграма складових ексергетичних потоків для теплого періоду року при обробці повітря в СКП з конденсаційним осушенням повітря:

1 - зовнішнє повітря; 2 - дросель-клаван з приводом; 3 - фільтр G4; 4 - фільтр M5; 5 - повітрянагрівач №1; 6 - повітроохолоджувач з осушенням; 7 - каплевловлювач; 8 – повітрянагрівач №2; 9 – припливний вентилятор; 10 - припливні повітропроводи; 11 - припливна решітка; 12 - приміщення; 13 - витяжна решітка; 14 - витяжні повітропроводи; 15 - фільтр F7; 16 – витяжний вентилятор; 17 - викид повітря на зовні;

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

На рис. 3 представлена діаграма складових ексергетичних потоків для теплого періоду року при обробці повітря в СКП з адсорбційним осушенням повітря. Пік витрат термічної та вологісної складових ексергії потоку повітря в СКП з адсорбційним осушенням повітря спостерігаються в секціях адсорбційного осушення повітря та в секції нагрівання повітря для регенерації адсорбенту. Значення для відповідних секції обробки повітря складають 1,543 кДж/кг та 0,879 кДж/кг.

На рис. 4 представлена діаграма складових ексергетичних потоків для теплого періоду року при обробці повітря в СКП з комбінованим ізотермічним, мембранним осушенням повітря. Зміна значень термічної та вологісної складових ексергії потоку повітря в СКП з комбінованим ізотермічним, мембранним осушенням повітря

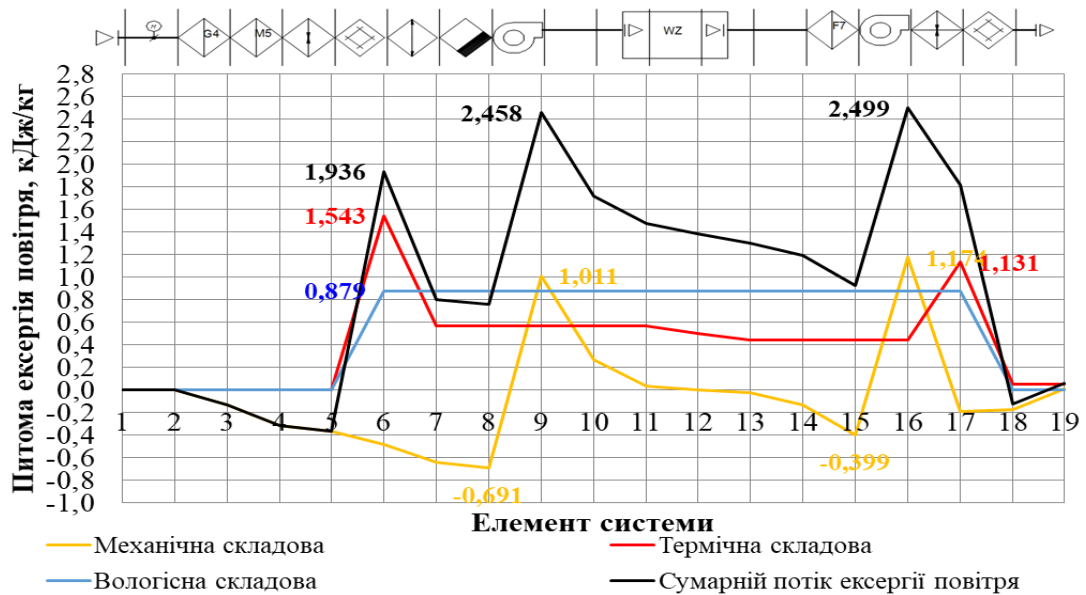


Рис. 3. Діаграма складових ексергетичних потоків для теплого періоду року при обробці повітря в СКП з адсорбційним осушенням повітря:

1 - зовнішнє повітря; 2 - дросель-клапан з приводом; 3 - фільтр G4; 4 - фільтр M5; 5 - повітрянагрівач №1; 6 – адсорбційний осушувач; 7 - повітроохолоджувач; 8 – каплевловлювач; 9 – припливний вентилятор; 10 - припливні повітропроводи; 11 - припливна решітка; 12 - приміщення; 13 - витяжна решітка; 14 - витяжні повітропроводи; 15 - фільтр F7; 16 - витяжний вентилятор; 17 – нагрівач повітря для регенерації адсорбенту; 18 - адсорбційний осушувач (десорбція); 19 - викид повітря на зовні;

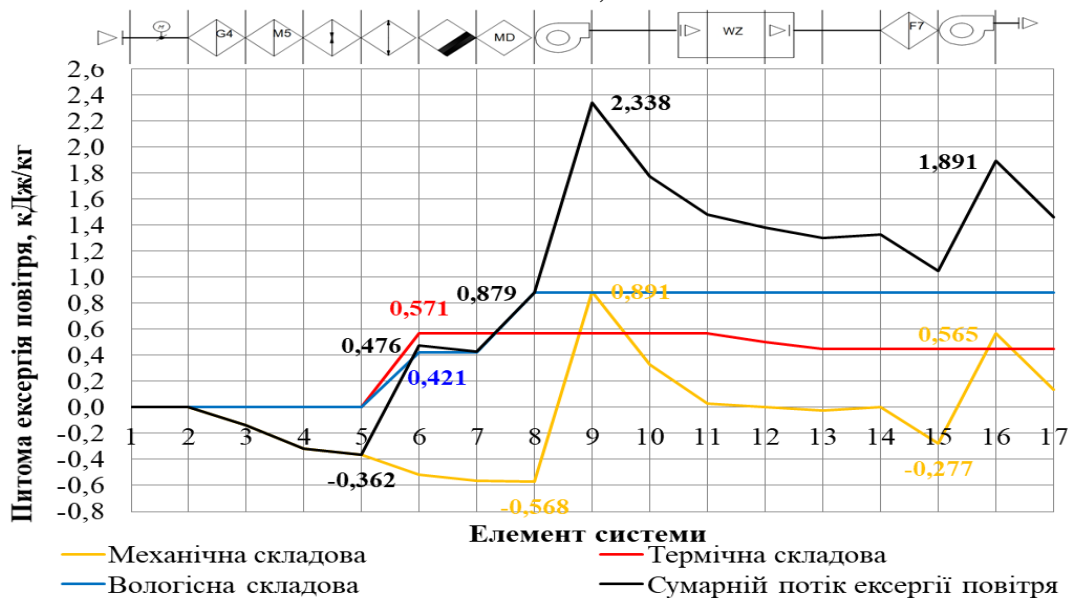


Рис. 4. Діаграма складових ексергетичних потоків для теплого періоду року при обробці повітря в СКП з комбінованим мембранним осушенням повітря:

1 - зовнішнє повітря; 2 - дросель-клапан з приводом; 3 - фільтр G4; 4 - фільтр M5; 5 - повітрянагрівач №1; 6 - повітроохолоджувач з осушенням; 7 - каплевловлювач; 8 – мембранний модуль осушення повітря; 9 – припливний вентилятор; 10 - припливні повітропроводи; 11 - припливна решітка; 12 - приміщення; 13 - витяжна решітка; 14 - витяжні повітропроводи; 15 - фільтр F7; 16 - витяжний вентилятор; 17 - викид повітря на зовні

відбувається без явно виражених піків. Максимальні значення термічної складової складають 0,571 кДж/кг, що в 2 рази менше від пікового значення при конденсаційному способі обробки повітря та в 2,7 разів менше ніж при адсорбційному осушення повітря.

На рис. 5 в вигляді діаграми графічно представлені значення ЕККД для трьох вибраних способів осушення повітря. Найбільші значення ЕККД «нетто» та «брутто» спостерігаються для СКП з комбінованим мембранним осушенням повітря, і складають 2,36 та 1,22. Аналогічними значеннями ЕККД для СКП з конденсаційним способом осушення повітря складають: ЕККД «нетто» складає 1,93 а ЕККД «брутто» 0,65; для СКП з адсорбційним способом осушення повітря складають: ЕККД «нетто» складає 1,17 ЕККД «брутто» 0,52. Таким чином ЕККД «нетто» для СКП з комбінованим мембранним осушенням повітря 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 результатів розрахунків видно, що використання СКП з комбінованим мембранним осушенням для обробки повітря в складі зберігання насіння гарбузу збільшує ЕККД «брутто» майже вдвічі в порівнянні із іншими можливими способами осушення повітря для досягнення параметрів повітря згідно технологічного регламенту зберігання продукції такого виду.

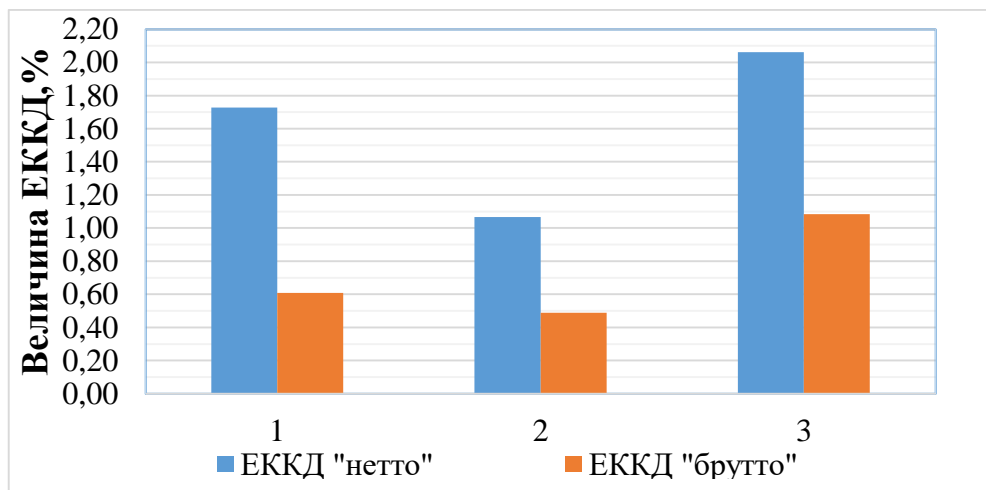


Рис. 5. Порівняльна діаграма ексергетичних коефіцієнтів корисної дії для трьох обраних способів осушення повітря в СКП приміщення зберігання насіння гарбуза: 1 – СКП з конденсаційним осушення повітря (DCM); 2 – СКП з адсорбційним осушенням повітря (DAM); 3 – СКП з модулем мембранного осушення повітря (DMM).

В підрозділі 2.6 представлені результати порівняльного, ексергоекономічного аналізу СКП з різними способами осушення для приміщення зберігання насіння гарбузу. Для розрахунків вартість енергоносіїв прийнята за даними тарифів постачальника для теплової енергії  $0,3139 \times 10^{-3}$  грн/кДж, для електричної енергії  $0,456 \times 10^{-3}$  грн/кДж. На рис. 6 подана порівняльна графічна залежність накопичення ексергетичної вартості на 1000 кг в процесі обробки повітря в СКП.

З діаграми рис. 6 видно, що зростання вартості ексергії в DCM та DMM спостерігається з моменту обробки в секції охолодження повітря (конденсаційного осушення – поз. 6). Значення ексергетичної вартості на охолодження та осушення повітря для схеми DCM складає 2,34 грн/1000кг повітря, що на 33,3 % перевищує значення ексергетичної вартості секції охолодження повітря для схеми DMM, яке складає 1,56 грн/1000кг повітря. Після секції адсорбційного осушення повітря в схемі DAM спостерігається зростання затрат на «сухе» (по  $d=\text{const}$ ) охолодження повітря. Ексергетична вартість здійснення процесу охолодження повітря до параметрів притоку для DAM складає 1,87 грн/1000кг, що майже на 17% більше ніж за затрати на попереднє охолодження повітря в схемі DMM.

Наступне зростання ексергетичної вартості для схеми DCM спостерігається в процесі догрівання до параметрів припливного повітря, на рис. 6 відрізок 7-8, значення складає 4,25 грн/1000кг повітря. А також, для всіх трьох схем, характерне зростання ексергетичної вартості на здійснення процесів переміщення повітря припливним вентилятором, на рис. 6 відрізок 8-9.

Таким чином, з діаграми видно, що сумарні витрати ексергії (грн/кг) на оброблення повітря для схеми DCM в 2 рази більші за аналогічні затрати для схеми DMM. А сумарні затрати на оброблення повітря для схеми DAM в 2,7 більші ніж для схеми DMM.

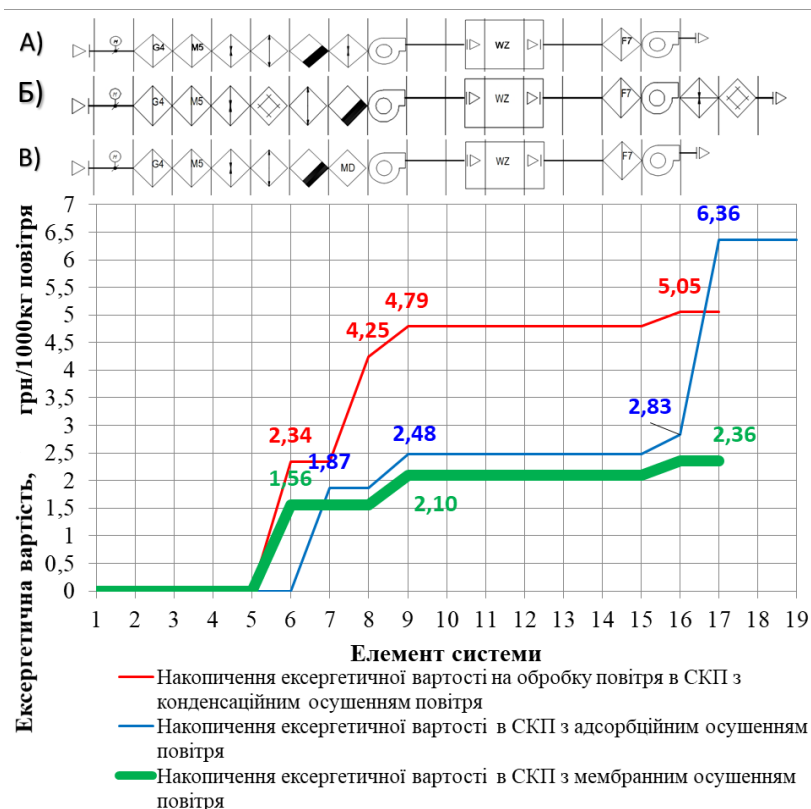


Рис. 6. Порівняльна графічна залежність накопичення ексергетичної вартості в процесі обробки повітря в СКП з трьома різними способами осушення повітря: А – однолінійна схема DCM; Б - однолінійна схема DAM; В - однолінійна схема DMM.

У третьому розділі «Експериментальні дослідження мембранного осушення повітря в СКП» проведені експериментальні дослідження процесу осушення повітря на напівпроникній пористій ПВХ мембрані. Для



експериментального дослідження процесу мембранного осушення повітря з визначенням питомої проникності обраної мембрани  $Q_{pF}$ ,  $\text{кг}/(\text{с}\cdot\text{м}^2\cdot\text{Па})$  була розроблена експериментальна установка, рис. 7 та рис. 8. Підготовлене повітря з параметрами  $t=10\pm 1^\circ\text{C}$ ,  $\phi=95\pm 5\%$  подавалось на мембранну секцію осушення, а в просторі між мембраною і стінками камери створювалось та постійно підтримувалось розрідження, значення якого контролювалось цифровим мікроманометром. Значення витрати потоку повітря в ході експериментального дослідження варіювалось в діапазоні від 0 до 400  $\text{м}^3/\text{год}$ . За допомогою  $i-d$  – діаграми розраховували зміну вологовмісту в процесі оброблення повітря та значення пропускної здатності мембрани по волозі  $q$  ( $\text{кг}/\text{год}$ ). Відносна похибка вимірювань в ході експериментального дослідження складала 0,76-5,2 %.

За результатами проведених досліджень отримана апроксимована експериментальна залежність зміни вологовмісту повітря від питомого значення повітряного потоку на поверхню мембрани при сталому перепаді тиску на мембрані  $\Delta P = 250 \text{ Па}$ .



Рис. 7 Фото лабораторного стану для дослідження ізотермічного осушення повітря на ПВХ мембрані

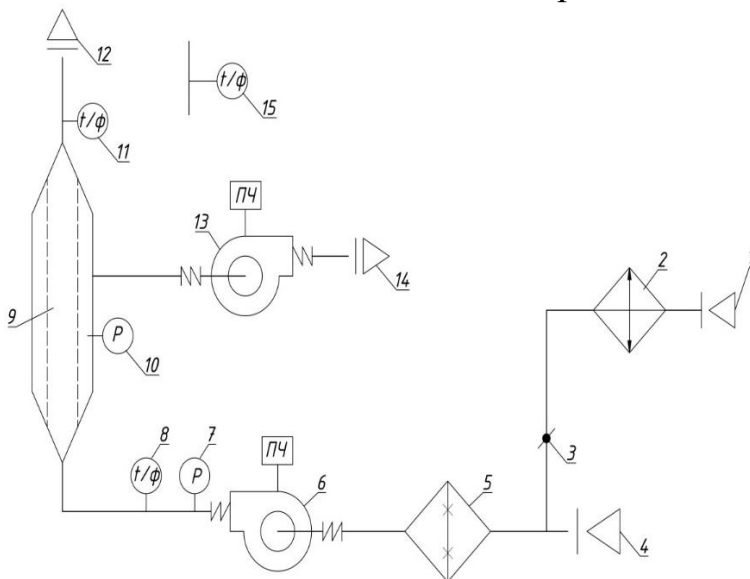


Рис. 8. Схема експериментальної установки.

1,4-вхід повітряного потоку; 2 - охолоджувач; 3 – регулювальний дросель-кран; 5 – паровий зволожувач повітря; 6,13 – радіальний вентилятор з частотним перетворювачем; 7 – цифровий диференціальний манометр ДМЦ-01М з трубкою Піто; 8,11 – каналний датчик температури та відносної вологості повітря; 9 – мембранний модуль осушення повітря; 10 – датчик тиску; 12 – вихід осушеного потоку повітря; 14 – вихід повітряного потоку та пермеату; 15-датчик температури та відносної вологості повітря в приміщенні.

Для умов експерименту оптимальне значення питомого повітряного навантаження на мембрану склало 89 м<sup>3</sup>/(год•м<sup>2</sup>). При цьому зменшення вологовмісту спостерігалось в межах  $\Delta d \in (1,1 \dots 1,2)$  г/кг. Швидкість руху повітря в перерізі модуля мембранного осушення повітря складала 1,4 м/с.

Отримано рівняння регресії для визначення питомої проникності мембрани  $Q_{pF}$ , кг/(с•м<sup>2</sup>•Па) як функції від кількості вологи, що проходить через мембрану при перепаді тиску на мембрані в 250 Па.

За результатами розрахунків представлена уточнена фізична модель зменшення вологи (темпу осушення)  $G$  кг/с при русі повітря вздовж мембранного модуля обробки повітря. Побудована порівняльна графічна залежність теоретичного та фактичного осушення повітря в секції мембранного модулю. Для врахування розбіжності теоретичних та експериментальних даних темпу осушення повітря в модулі мембранного осушення введено емпіричний коефіцієнт  $k_u = 0,0769$  кореляції фізичної моделі осушення повітря на напівпроникній мембрані. Представлена критеріальна експериментальна залежність фактичного темпу осушення повітря на напівпроникній мембрані для СКП приміщення зберігання насіння гарбузу:

$$-G = 0,0769 \cdot \pi \cdot d \cdot Q_{pF} \cdot (P_1 - P_2) \cdot l, \text{ кг/с} \quad (10)$$

де:  $Q_{pF}$  – значення коефіцієнту проникності водяних парів через ПВХ дослідну мембрану, кг/(с•м<sup>2</sup>•Па);  $G$  – масова витрата водяних парів що проникає через мембрану, кг/с;  $P_1, P_2$  – відповідно абсолютний тиск вихідного потоку та потоку пермеату, Па;  $\pi \cdot d \cdot l$  – площа поверхні мембрани, м<sup>2</sup>.

**У четвертому розділі «Розроблення схеми осушення повітря в СКП з застосуванням мембранного способу осушення для приміщення зберігання насіння родини гарбузових»** розглянуто прикладні задачі застосування ізотермічного осушення повітря в СКП для приміщення зберігання насіння гарбузу.

В підрозділі 4.1 на основі експериментальної фізичної моделі осушення повітря в мембранній секції, розглянуто методику інженерного розрахунку СКП з комбінованим конденсаційним та мембранним осушенням повітря. Запропонована методика дозволяє розрахувати на  $i$ - $d$  діаграмі процеси обробки повітря в СКП з ізотермічним мембранним осушенням повітря. За отриманими значеннями початкових та кінцевих параметрів повітря для модулю мембранного осушення повітря визначають необхідне зменшення вологовмісту та розраховують кількість вологи яка виділяється з оброблюваного потоку повітря. За отриманими експериментальними рівняннями розраховують значення питомого коефіцієнту проникності  $Q_{pF}$ , кг/(с•м<sup>2</sup>•Па) ПВХ мембрани, як функції від кількості вологи що проходить через мембрану. За рівнянням 10 розраховують мінімально необхідну площу поверхні мембрани  $F_{т. необ}$ , м<sup>2</sup> для здійснення процесу осушення повітря.

В підрозділі 4.2 розглянуто принципи розрахунку та побудови модулів багатостадійного мембранного осушення повітря (ММО).

В підрозділі 4.3 розглянуто впровадження схеми СКП з комбінованим конденсаційним та мембранним осушенням повітря, для модернізації існуючої СКП на прикладі приміщення зберігання насіння гарбузу в с. Голодьки вінницької обл. Для забезпечення нормальних умов зберігання насіння в складі необхідно

цілодобово в продовж року підтримання температури повітря в межах  $+10...+12$  °С та відносної вологості не вище 60%. Загальна продуктивність існуючої СКП по повітрю складає 39 630 м<sup>3</sup>/год. Охолодження та осушення повітря проходить в секції водяного охолоджувача, потужність складає 212 кВт. Холодоносії – 40% розчин пропіленгліколю. Параметри холодоносія в системі холодопостачання:  $-2/+2$  °С. Для догрівання повітря до параметрів припливу влаштована секція електричного калориферу, потужністю 108 кВт.

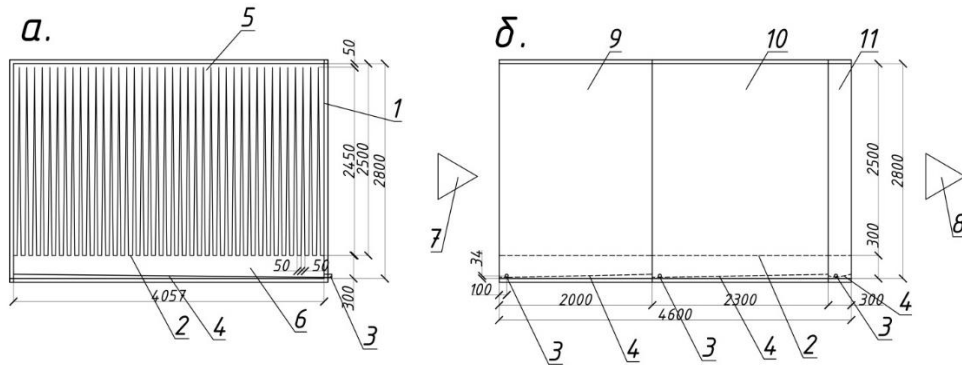


Рис. 10 Загальний вигляд модулю мембранного осушення

а. вигляд з переду; б. вигляд збоку; 1 – корпус; 2 – мембрана; 3 – патрубок відводу конденсату; 4 – дренажний піддон; 5 – простір для проходу оброблюваного потоку повітря; 6 – простір виходу пермеату; 7 – вхід повітря; 8 – вихід повітря; 9 – модуль першої стадії обробки повітря; 10 – модуль другої стадії обробки повітря; 11 – модуль третьої стадії обробки повітря;

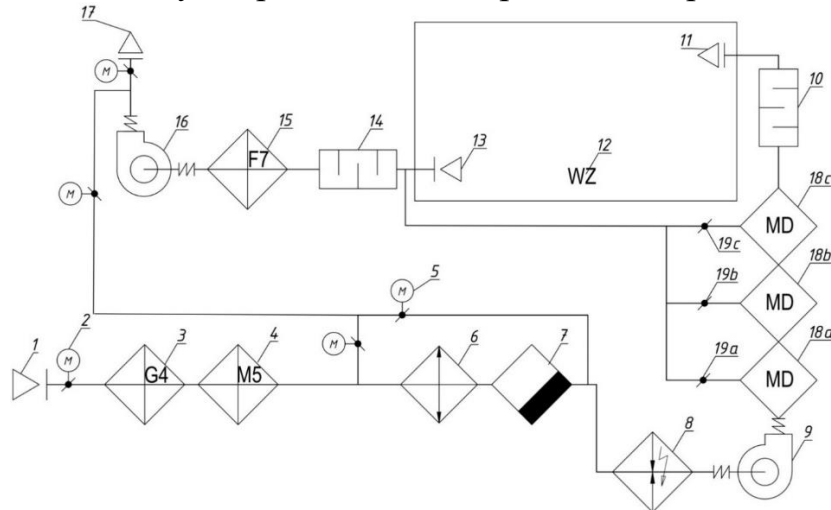


Рис. 11 Схема модернізації існуючої системи кондиціонування повітря приміщення зберігання насіння гарбуза, шляхом включення тристадійного мембранного осушення повітря. 1 - зовнішнє повітря; 2 - дросель-кран з приводом; 3 - фільтр G4; 4 - фільтр M5; 5 – кран байпасу; 6 - повітроохолоджувач з осушенням; 7 - каплевловлювач; 8 – електрокалорифер; 9 – припливний вентилятор; 10 - припливні повітропроводи; 11 - припливна решітка; 12 – приміщення; 13 - витяжна решітка; 14 - витяжні повітропроводи; 15 – фільтр F7; 16 – витяжний вентилятор; 17 - викид повітря на зовні; 18а – мембранний модуль осушення повітря (першої стадії осушення); 18b – мембранний модуль осушення повітря (другої стадії осушення); 18c – мембранний модуль осушення повітря (третьої стадії осушення);



Модуль мембранного осушення (ММО) повітря рис. 10 запропонований до застосування та впровадження для підвищення енергоощадності існуючої системи кондиціонування повітря приміщення зберігання насіння гарбузу. Для цього запропонована модернізація існуючої схеми СКП шляхом включення до її складу секції тристадійного мембранного осушення повітря, рис. 11.

На основі проведених розрахунків, нами запропонована конструкція мембранного модулю осушення (ММО) повітря, рис. 10. Необхідна загальна площа поверхні мембрани ММО складає 751,06 м<sup>2</sup>. Для модернізованої СКП приміщення зберігання насіння родини гарбузових, для попереднього охолодження та осушення повітря необхідна холодильна потужність складає 40,7 кВт. Параметри повітря на вході охолоджувач:  $t = 13^{\circ}\text{C}$ ;  $d = 6,1$  г/кг. Параметри повітря на вході ММО:  $t = 10^{\circ}\text{C}$ ;  $d = 6,1$  г/кг, параметри повітря на виході ММО:  $t = 10^{\circ}\text{C}$ ;  $d = 4,1$  г/кг.

В підрозділі 4.4 проведені техніко-економічні, порівняльні розрахунки ексергетичної вартості в процесі оброблення повітря існуючої СКП з конденсаційним осушенням повітря та запропонованої схеми з комбінованим мембранним осушенням повітря. Найбільше зростання ексергетичної вартості спостерігається в існуючій схемі СКП з конденсаційним осушенням повітря, та складає 2,56 грн/1000кг. Для запропонованої схеми СКП з мембранним осушенням повітря, сумарні накопичення ексергетичної вартості на оброблення повітря складають 0,84 грн/1000кг, що в 3 рази менше ніж для осушення з конденсацією вологи, яке реалізовано для існуючої схеми СКП.

## ВИСНОВКИ

Основні результати дисертаційного дослідження викладені у висновках, які зводяться до наступних положень.

1. На підставі аналізу літературних джерел встановлено, що найбільш раціональним є ізотермічний мембранний спосіб осушення повітря в СКП приміщень для зберігання насіння родини гарбузових, завдяки тому, що процес селективного переносу парів вологи в мембрані проходить ізотермічно, що на відміну від адсорбційного та конденсаційного процесів не потребує додаткових витрат енергії на підігрів або на охолодження повітря.
2. Розроблено фізичну модель процесу ізотермічного осушення повітря та відповідну до неї математичну модель у вигляді диференціального рівняння. Рівняння враховує фізичний ефект переносу вологи через товщину мембрани в залежності від перепаду повного тиску на мембрані при русі повітря вздовж модулю.
3. Розроблено та апробовано методику поглибленого ексергетичного аналізу психрометричних процесів схемних рішень СКП, яка дозволяє визначити деструкції термічної, хімічної ( вологісної концентраційної ) та механічної складових ексергії вологого повітря, з графічним зображенням на потоковій ексергетичній діаграмі зміни ексергетичних потенціалів всієї системи від забору повітря до викиду повітря назовні.
4. Проведено поглиблений порівняльний ексергетичний аналіз трьох основних схемних рішень обробки повітря в СКП з DCM, DAM та ізотермічним осушенням. Найбільші значення ЕККД «нетто» та «брутто» спостерігаються для СКП з

комбінованим мембранним осушенням повітря, і складають 2,36% та 1,22% відповідно. Аналогічні значеннями ЕККД для СКП з DCM відповідно складають: 1,93 % та 0,65%; для СКП з DAM повітря складають: 1,17% та 0,52%.

5. Розроблено та апробовано методику ексергоекономічного аналізу яка поєднує деструкцію ексергії повітряного потоку в СКП з вартісними витратами енергоносіїв, які живлять систему. Результати представлені в вигляді потокової діаграми накопичення питомої ексергетичної вартості на 1000 кг повітря, при його обробці в секціях центрального кондиціонера. Отримані значення для схеми DCM складають 5,05 грн/1000кг, що в 2 рази більше ніж для схеми DMM, значення складає 2,35 грн/1000кг, для схеми DAM складає 6,36 грн/1000кг, що в 2,7 разів більше ніж для схеми DMM.

6. Розроблено та сконструйовано лабораторний дослідний зразок модулю ізотермічного осушення повітря продуктивністю 400 м<sup>3</sup>/год та проведено експериментальні дослідження ізотермічного осушення повітря на напівпроникній ПВХ мембрані. За результатами експерименту отримано функціональну залежність зміни вологовмісту повітря  $\Delta d$ , г/кг від питомого значення повітряного навантаження на поверхню ПВХ мембрани  $L_F$ , м<sup>3</sup>/(год·м<sup>2</sup>) при сталому перепаді тиску на мембрані  $\Delta P = 250$  Па. Для умов експерименту значення склало 89 м<sup>3</sup>/(год м<sup>2</sup>). При цьому зменшення вологовмісту спостерігалось в межах  $\Delta d \in (1,1 \dots 1,2)$  г/кг.

7. Отримано рівняння регресії для визначення коефіцієнту проникності парів вологи  $Q$  кг/(м<sup>2</sup>·Па·год) від потоку вологи  $G$  кг/год, що проходить крізь мембрану, для умов характерних для СКП приміщення для зберігання насіння гарбузу. Отриманні експериментальні данні дозволяють розраховувати фактичне значення коефіцієнту проникності мембрани.

8. Для приміщення зберігання насіння гарбузу в с. Голодьки, вінницької обл. запропонована схема реконструкції СКП з ізотермічним мембранним осушенням повітря. Представлені результати порівняльного ексергоекономічного аналізу застосування мембранного осушення повітря для модернізації існуючої СКП приміщення зберігання насіння гарбузу. Ексергетична вартість оброблення повітря існуючої СКП складає 2,56 грн/1000кг, для запропонованої СКП з мембранним осушенням повітря відповідне значення складає 0,84 грн/1000кг повітря, що в три рази менше ніж осушення з конденсацією вологи.

9. Розроблено та представлено методику інженерного розрахунку СКП з секціями мембранного ізотермічного осушення повітря, за якою визначають необхідну кількість вологи, яка має бути видалена з повітря, площу поверхні ПВХ та кількість мембранних модулів.

### **СПИСОК ОПУБЛІКОВАНИХ ПРАЦЬ ЗА ТЕМОЮ ДИСЕРТАЦІЇ**

**Статті у виданнях іноземних держав, які включені до міжнародних наукометричних баз:**

1. O. Zadoiannyi, Y. Yevdokymenko (2021). Theoretical analysis of membrane air dehumidification in air conditioning systems. New York. TK Meganom LLC. Innovative Solutions in Modern Science. 4(48). doi: 10.26886/2414-634X.4(48)2021.3. ISSN 2414-634X

*(Особистий внесок здобувача – теоретичні дослідження процесів ізотермічного осушення повітря на напівпроникних мембранах, розроблення*

фізичної моделі процесу осушення повітря, участь у підготовці та написанні статті).

**Статті у фахових виданнях:**

2. Можливості ексергоекономічного аналізу при оцінці енергоощадності систем кондиціонування повітря / О. В. Задоянний, Ю. М. Євдокименко // Енергоефективність в будівництві та архітектурі. - 2013. - Вип. 4. - С. 124-127.

*(Особистий внесок здобувача – проведення та оформлення розрахунків, участь у підготовці та написанні статті).*

3. Задоянний О.В., Євдокименко Ю.М. Порівняльна ексергетична оцінка прямої системи кондиціонування повітря з конденсаційним та комбінованим конденсаційно-адсорбційним осушенням повітря: Науково-технічний збірник «Енергоефективність в будівництві та архітектурі». Випуск №52 с.13//відповідальний редактор П.М.Куліков.-К.:КНУБА,2014 р.-364 с.

*(Особистий внесок здобувача – проведення та оформлення розрахунків, участь у підготовці та написанні статті).*

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 / відповідальний редактор Е.С.Малкін.- КНУБА, 2015.-128 с.

*(Особистий внесок здобувача – проведення та оформлення розрахунків, участь у підготовці та написанні статті).*

5. Задоянний, О. В., Євдокименко Ю.М., Види ексергії в системах кондиціонування повітря та їх визначення / О. В. Задоянний, Ю. М. Євдокименко. - С. 3-15: Науково-технічний збірник «Вентиляція, освітлення та теплогазопостачання».- Вип.19 / відповідальний редактор Е.С.Малкін.- КНУБА, 2016.-145с.

*(Особистий внесок здобувача – проведення та оформлення розрахунків, участь у підготовці та написанні статті).*

6. Exergoeconomic Analysis of Air Cooling Systems / O. V. Zadoyanny, Y. M. Yevdokimenko // Вентиляція, освітлення та теплогазопостачання. - 2016. - Вип. 20. - С. 14-23. - Режим доступу: [http://nbuv.gov.ua/UJRN/votp\\_2016\\_20\\_4](http://nbuv.gov.ua/UJRN/votp_2016_20_4).

*(Особистий внесок здобувача – проведення та оформлення розрахунків, участь у підготовці та написанні статті).*

7. Задоянний О. В., Євдокименко Ю.М., Особливості визначення ексергетичної ефективності процесу повітрообміну в приміщенні / О. В. Задоянний, Ю. М. Євдокименко // Energy-efficiency in civil engineering and architecture. - 2017. - No. 9. - С. 80-83. - Режим доступу: [http://nbuv.gov.ua/UJRN/enef\\_2017\\_9\\_16](http://nbuv.gov.ua/UJRN/enef_2017_9_16).

*(Особистий внесок здобувача – проведення та оформлення розрахунків, участь у підготовці та написанні статті).*

8. Задоянний О. В., Євдокименко Ю.М., Експериментальні дослідження осушення повітря з використанням синтетичних напівпроникних мембран в системах кондиціонування повітря / О. В. Задоянний, Ю. М. Євдокименко // Вентиляція, освітлення та теплогазопостачання. - 2018. - Вип. 24. - С. 24-31. - Режим доступу: [http://nbuv.gov.ua/UJRN/votp\\_2018\\_24\\_7](http://nbuv.gov.ua/UJRN/votp_2018_24_7).

*(Особистий внесок здобувача – проведення експериментальних досліджень)*

*процесу осушення повітря, обробка результатів, участь у підготовці та написанні статті).*

9. Задоянний О. В., Євдокименко Ю.М., Поглиблений ексергоекономічний аналіз як дієвий інструмент розроблення енергозбережних схемних рішень у системах кондиціонування повітря (на прикладі системи мембранного осушення повітря для приміщення зберігання насіння) / О. В. Задоянний, Ю. М. Євдокименко // Вентиляція, освітлення та теплогазопостачання. - 2020. - Вип. 32. - С. 44-55. - Режим доступу: <http://vothp.knuba.edu.ua/article/view/210083>

*(Особистий внесок здобувача – розроблено схему модернізації СКП приміщення для зберігання насіння гарбуза з застосуванням мембранного способу осушення повітря, проведення та оформлення розрахунків, участь у підготовці та написанні статті).*

10. Задоянний О. В., Євдокименко Ю.М., Ексергетична ефективність системи кондиціонування повітря з адсорбційним осушенням та регенерацією адсорбенту теплотою конденсації для приміщень арбітражного зберігання ліків / О. В. Задоянний, Ю. М. Євдокименко // Вентиляція, освітлення та теплогазопостачання. - 2020. - Вип. 33. - С. 39-46. - Режим доступу: [http://vothp.knuba.edu.ua/article/view/210412/pdf\\_z](http://vothp.knuba.edu.ua/article/view/210412/pdf_z).

*(Особистий внесок здобувача – проведення та оформлення розрахунків, участь у підготовці та написанні статті).*

11. Задоянний А.В., Евдокименко Ю.Н. Углубленный эксергетический анализ основных психрометрических процессов в системах кондиционирования воздуха / А. В. Задоянний, Ю. Н. Евдокименко // Вестник Полоцкого государственного университета. Сер. F, Строительство. Прикладные науки. – 2020. – № 16 – С.. 73-77.

*(Особистий внесок здобувача – проведення та оформлення розрахунків, участь у підготовці та написанні статті).*

## АНОТАЦІЯ

**Євдокименко Ю.М. Енергоощадна система кондиціонування повітря з напівпроникною мембраною приміщень для зберігання насіння родини гарбузових – Рукопис.**

Дисертація на здобуття наукового ступеня кандидата технічних наук за спеціальністю 05.23.03 «Вентиляція, освітлення та теплогазопостачання» – Київський національний університет будівництва та архітектури, МОН України, Київ, 2021.

Дисертаційна робота присвячена вирішенню актуального питання зниження енерговитрат в процесах обробки повітря, а саме осушення припливного повітря в системах кондиціонування повітря (далі СКП).

В роботі проведені теоретичні та експериментальні дослідження осушення повітря на напівпроникних ПВХ мембранах. В роботі представлена та уточнена фізична модель руху повітря через елементарну площину мембрани вздовж мембранного модуля осушення. Представлена фізична модель проникнення парів вологи крізь напівпроникну, пористу ПВХ мембрану. Методами поглибленого ексергоекономічного аналізу проведені порівняльні дослідження втрат ексергії

вологого повітря, з врахуванням складових ексергії волого повітря, показників ексергетичної ефективності, та ексергетичної вартості для СКП з конденсаційним, адсорбційним та мембранним осушенням повітря. Для аналізу втрат ексергії в СКП запропоновані потокові ексергетичні діаграми. Запропонована схема модернізації СКП з застосуванням мембранного осушення повітря для приміщення зберігання насіння гарбузу.

**Ключові слова:** поглиблений ексергетичний аналіз, поглиблений ексергоекономічний аналіз, потокові ексергетичні діаграми, мембранне осушення повітря, система кондиціонування повітря, ексергетична ефективність, ексергетичний коефіцієнт корисної дії «нетто», ексергетичний коефіцієнт корисної дії «брутто», коефіцієнт проникності.

## АННОТАЦІЯ

**Евдокименко Ю.М. Энергосберегающая система кондиционирования воздуха с полупроницаемой мембраной помещений для хранения семян семейства тыквенных - Рукопись.**

Диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук по специальности 05.23.03 «Вентиляция, освещение и теплогазоснабжение» - Киевский национальный университет строительства и архитектуры, МОН Украины, Киев, 2021.

Диссертация посвящена решению актуального вопроса снижения энергозатрат в процессах обработки воздуха, а именно осушения приточного воздуха в системах кондиционирования воздуха (далее СКВ).

В работе проведены теоретические и экспериментальные исследования осушения воздуха на полупроницаемых ПВХ мембранах. В работе представлена и уточнена физическая модель движения воздуха через элементарную плоскость мембраны вдоль мембранного модуля осушения. Представлена физическая модель проникновения паров влаги через полупроницаемую, пористую ПВХ мембрану. Методами углубленного эксергоекономического анализа проведены сравнительные исследования потерь эксергии влажного воздуха, с учетом составляющих эксергии, показателей эксергетической эффективности, и эксергетической стоимости для СКВ с конденсационным, адсорбционным и мембранным осушением воздуха. Для анализа потерь эксергии в СКВ предложены поточные эксергетические диаграммы. Предложена схема модернизации СКВ с применением мембранного осушения воздуха для помещения хранения семян тыквы.

**Ключевые слова:** углубленный эксергетический анализ, углубленный эксергоекономический анализ, поточные эксергетические диаграммы, мембранное осушение воздуха, система кондиционирования воздуха, эксергетическая эффективность, эксергетический коэффициент полезного действия «нетто», эксергетический коэффициент полезного действия «брутто», коэффициент проницаемости.

## SUMMARY

**Evdokimenko Y.M. Energy-saving air conditioning system with a semi-permeable membrane storage for premises of seeds of gourd family - Manuscript.**

Dissertation for the degree of Candidate of Technical Sciences on speciality 05.23.03 "Ventilation, lighting and district heating ". - Kyiv National University of Civil Engineering and Architecture, Ministry of Education and Science of Ukraine, Kyiv, 2021.

The thesis is devoted to solving the topical issue of reducing energy consumption in the processes of air treatment, namely dehumidification of supply air in air conditioning systems (hereinafter AC).

In this work, theoretical and experimental studies of air drying on semi-permeable PVC membranes were carried out. A physical model of air movement through the elementary plane of membrane along the membrane dehumidifying module is presented and specified in the work. A physical model of moisture vapor penetration through a semi-permeable, porous PVC membrane is presented. Using methods of in-depth exergoeconomic analysis, comparative studies of losses of exergy of humid air, taking into account components of the exergy of moist air, exergy efficiency indicators, and exergy costs for AC with condensation, adsorption and membrane drying of air are conducted. For the analysis of losses of exergy in AC, the flow diagrams of exergy are offered. The scheme of modernization of AC with application of membrane air drying for pumpkin seeds storage room is offered.

**Key words:** in-depth exergy analysis, in-depth exergy analysis, flow exergy diagrams, membrane air drying, air conditioning system, exergy efficiency, exergy efficiency "net", exergy efficiency "gross", permeability factor.