

DOI 10.26886/2414-634X.4(48)2021.3

UDC 697.934

**THEORETICAL ANALYSIS OF MEMBRANE AIR DEHUMIDIFICATION IN
AIR CONDITIONING SYSTEMS**

O. Zadoiannyi, PhD, Associate Professor

<http://orcid.org/0000-0001-6781-9756>

e-mail: zadoiannyi.ov@knuba.edu.ua

Kyiv National University of Construction and Architecture, Kyiv, Ukraine

Y. Yevdokymenko, Development Director of UNI Technology-ua LLC

<http://orcid.org/0000-0002-1697-0816>

e-mail: bonnesante91@gmail.com

Kyiv National University of Construction and Architecture, Kyiv, Ukraine

The paper presents a simulation of the process of removing moisture from the air in air conditioning systems using construction vapor-permeable membranes. The existing classical physical and mathematical models are considered and analyzed. Based on the analysis of classical models, a schematic and corresponding theoretical mathematical model of air dehumidification with a semipermeable building membrane with certain characteristics for possibilities of use in air conditioning systems is developed and presented. The data of calculations of moisture release from air for the developed model are given. As a result of analytical researches the correct data for possible use in air conditioning systems are received.

Key words: air conditioning systems, air dehumidification, semipermeable membrane, permeability, membrane air dehumidification, convective flow, diffusion flow, moisture permeability.

кандидат технічних наук, доцент, Задоянний О. В., Євдокименко Ю. М. Теоретичний аналіз мембранного осушення повітря в системах кондиціонування повітря / Київський національний

університет будівництва і архітектури, м. Київ, Україна; ТОВ «Унітехнології Юей» м. Київ, Україна

В роботі представлено моделювання процесу видалення вологи з повітря в системах кондиціонування із застосуванням будівельних паропроникних мембран. Розглянуто та проаналізовано існуючі класичні фізичні та математичні моделі. На даних аналізу класичних моделей розроблено й представлено схематичну та відповідну їй теоретичну математичну модель осушення повітря із напівпроникною будівельною мембраною з певними характеристиками для можливостей використання в системах кондиціонування повітря. Наведено дані розрахунків виділення вологи з повітря для розробленої моделі. В результаті аналітичних досліджень отримано коректні дані для можливого використання в системах кондиціонування повітря.

Ключові слова: системи кондиціонування повітря, осушення повітря, напівпроникна мембрана, проникність, мембранне осушення повітря, конвективний потік, дифузійний потік, вологопроникність.

Вступ. Осушення повітря в системах кондиціонування повітря є основним енерговитратним і складним процесом, який потребує постійного удосконалення. Існують різні способи видалення вологи з повітря, кожен з яких має певні переваги та недоліки. Одним з можливих ефективних способів вбачається мембранний, який стає доступним з розвитком технологій виробництва різноманітних мембранних тканин. Теорія мембранного розділення виділяє два основних критерії, яким повинна відповідати вибрана технологія мембранного розділення компонентів, це - технічна можливість здійснення процесу розділення та економічна доцільність. Щодо першого критерія для виконання даної умови необхідно в процесі

розділення отримати необхідну ступінь розділення та «чистоту» продукту. На економічну доцільність впливає склад та концентрація вихідної сировини, а також вибраний спосіб розділення речовини [1].

В технологічних процесах осушення стисненого повітря застосовують системи мембранного розділення повітря та водяних парів, які для здійснення процесів розділення не потребують суттєвих перепадів температури, проте потребують достатньо великих перепадів тисків [2]. До переваг мембранного розділення стисненого повітря можна віднести простоту конструкції, відсутність рухомих частин, холодоагенту або адсорбенту, відсутність необхідності в постійному сервісному обслуговуванні, відсутність необхідності в електроживленні, вибухо- та пожежебезпечність, компактність, невелику масу, безшумність, відсутність конденсату [3].

Системи мембранного розділення повітря та водяних парів характеризуються високою чутливістю мембран до забруднень. Попадання різних субстанцій (мастила, конденсат) на поверхню мембран викликає зниження ефективності їх роботи. Шкідливим є також пошкодження мембран твердими частинками. Для захисту мембранних осушувачів від домішок, які надходить із стисненим повітрям, застосовують механічну фільтрацію. Крім того дані процеси потребують значного удосконалення матеріалу мембран в напрямку збільшення пропускної спроможності [2].

Заслуговує уваги законодавче нормування напівпроникних мембран в будівельній галузі для запобігання конденсації водяних парів в даховому просторі під покрівлею [4]. Розроблені спеціально для вказаної цілі напівпроникні мембрани достатньо ефективно з продуктивністю понад $1300 \text{ кг/доб} \cdot \text{м}^2$ Па, пропускають через себе водяні пари із подальшим видаленням назовні [5, 6]. До процесу не залучають додаткової енергії, він здійснюється завдяки сукупності

капілярних ефектів та перепаду парціальних тисків водяної пари. Такі напівпроникні мембрани виготовляють з полімерних матеріалів, переважно полівінілхлорид (ПВХ) [7,8]. Більшість з них являють собою трьохшаровий матеріал на основі нетканого полотна. Їх структура складається з основного нетканого волокнистого шару, функціонального шару і захисного зносостійкого шару. Шари мембрани з'єднуються в «пакет» за допомогою високотехнологічного ультразвукового зварювання. Внутрішній функціональний шар являє собою полімерну ПВХ-плівку з мікроперфорованою (мікропористою) структурою, яка має високі показники паропроникності та виконує основну функцію - дифузію (виведення) водяних парів назовні. При цьому структура та розмір пор не забезпечують мембрані високі показники водонепроникності (до 3000 мм водяного стовпа) [8]. Така структура (супердифузійних, дифузійних, напівпроникних) будівельних мембран дозволяє їм безперешкодно пропускати повітря і водяний пар.

Найважливішою властивістю дифузійної мембрани є її пропускна спроможність (паропроникність). Паропропускна спроможність покривельних (напівпроникних) мембран вимірюється в кількості водяної пари (мг), що проходить через 1 м² полотна мембрани за 24 години при перепаді тиску на мембрани один паскаль - Q, мг/м²·24год·Па. За критерієм паропроникності мембрани поділяються на слабодифузійні з паропроникністю менше 300, середньодифузійні з паропроникністю 300-1000 та високодифузійні (супердифузійні) з паропроникністю понад 1000.

Супердифузійні мембрани використовують при будівництві в складних кліматичних умовах (або при використанні утеплювачів) та в місцях з різкою зміною вологості. Розрахункова паропроникність супердифузійних мембран при стандартних умовах випробувань складає 1300 г/м²·24год·Па [5]. На практиці пропускна здатність

мембран ще вище, тому що зсередини покрівельного "пирога" утворюється значний надлишковий тиск теплого повітря, а над поверхнею мембрани – навпаки – розрідження, що створюється зовнішнім повітрям при обтіканні будівлі. На сьогодні існують супердифузійні мембрани описаної вище структури різних виробників, зокрема Strotex (Польща), JUTA (Чехія), TOP ROOF (Німеччина). В Україні аналогічні мембрани вготовляють компанії Roofer, «Прушинськи» на замовлення компаній Strotex, TOP ROOF.

Матеріали мембран постійно удосконалюють з метою збільшення їх проникності, покращення механічних властивостей та зменшення вартості.

Осушення повітря за допомогою напівпроникних (селективних) мембран, а також особливості протікання такого процесу детально розглянуті в роботах [9, 10]. В роботах [11, 12] представлені методи регулювання вологості повітря із застосуванням мембранних технологій та перспективи застосування мембран для осушення повітря. В даних роботах підкреслюється привабливість наведеного способу осушення завдяки протіканню цього процесу ізотермічно, що не потребує теплової енергії, або холоду.

Мета даної роботи полягає у визначенні аналітичним шляхом можливостей застосування напівпроникних мембран для осушення в системах кондиціонування повітря.

Виклад основного змісту дослідження. Для аналізу можливості осушення повітря на мембранах зазвичай розглядають повітря як бінарну суміш сухого повітря та водяної пари. Відділення парів вологи з потоку повітря відбувається за рахунок наявності градієнтів парціальних та надлишкових тисків по різні сторони мембрани. Мембрана в загальному вигляді являє собою молекулярне сито з капілярною структурою. Для аналізу процесів перенесення

водяних парів крізь мембрану для осушення повітря в системах кондиціонування повітря розглянуто напівпроникні супердифузійні ПВХ мембрани, характеристики яких наведено вище.

Процес перенесення речовини крізь мембрану описується з однієї сторони теорією нерівноважної термодинаміки [13], згідно якої його відносять до феноменологічних понять і описують терміном «проникнення». Термін проникнення охоплює багато механізмів перенесення речовини, які можуть бути викликані різними за природою рушійними силами і за присутності градієнтів різних потенціалів - концентрації парів вологи, парціальних тисків вологи, надлишкових тисків по обидві сторони мембрани тощо.

Схема моделі відділення парів вологи через пористу мембрану, яка придатна для систем кондиціонування повітря, зображена рис. 1.

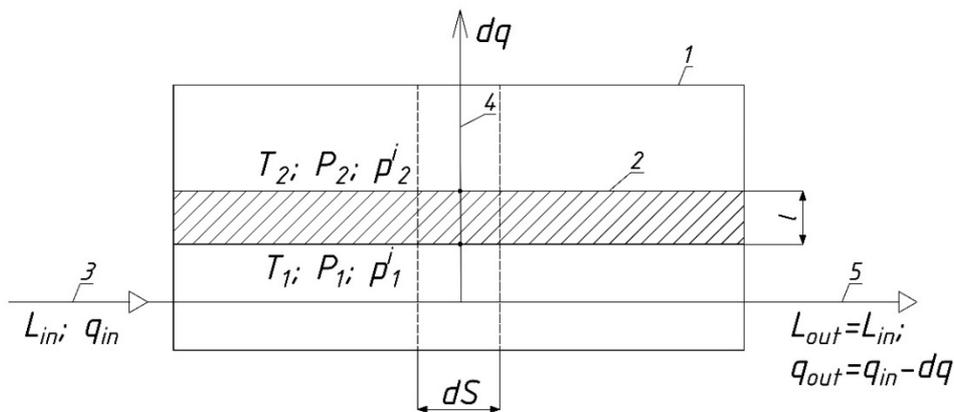


Рис. 1. Схема моделі відділення парів вологи крізь пористу мембрану

1 – умовно мембранна установка; 2 – пориста мембрана; 3 – вхідний потік вологого повітря; 4 – потік парів вологи через елементарну площину мембрани; 5 – вихідний потік осушеного повітря.

Потік вологого повітря L_{in} з вологою q_{in} надходить до секції мембранного осушення, де закріплена мембрана, що розділяє секцію на два ізольовані один від другого об'єми. Під дією градієнтів парціальних тисків парів вологи по різні сторони мембрани $\Delta p_i = p_1^i -$

p_2^j та надлишкових тисків $\Delta P = P_1 - P_2$, утворюється потік вологи крізь мембрану dq , величина якого визначається за формулою

$$-dq = \frac{\partial S \cdot Q_p \cdot (\Delta P \pm \Delta p_i)}{l}, \text{ кг/год} \quad (1)$$

де: dq – кількість вологи яка проходить через елементарну площину мембрани ∂S , кг/год; S – площа мембрани, м²; Q_p – феноменологічний коефіцієнт проникності мембрани, який включає механізми перенесення в пористих та непористих мембранах, кг/м·Па·год; ΔP - градієнт надлишкових тисків по різні сторони мембрани, Па; Δp_i - градієнт парціальних тисків парів вологи по різні сторони мембрани, Па; l – товщина мембрани, м.

Рівняння (1) є зручним для розуміння процесу відділення вологи, не вдаючись до реального механізму перенесення речовини, який включає в себе ефекти проникнення речовини в пограничних шарах і в товщі самої мембрани [1]. З рівняння видно що загальна проникність речовини не є постійною характеристикою мембрани і залежить від умов перебігання процесу осушення - перепаду тиску, вхідних та вихідних параметрів тощо [1].

Теорія нерівноважних процесів вдало описує кількісні характеристики процесів перенесення речовини крізь мембрану, проте не дає змоги оцінити механізм транспорту (перенесення речовини) крізь мембрану, що потрібно для розробки конкретних мембран. Тому для аналізу механізму перенесення речовини – парів вологи - використовують термодинамічні моделі руху, які розглядають структуру мембрани. За структурними ознаками мембрани поділяються на пористі та непористі. На сьогодні розроблено декілька транспортних моделей як для пористих так і для непористих мембран для конкретних процесів і потреб [1]. Для пористих мембран найважливішими структурними параметри є пористість та геометрія пор (розмір пор, розподілення по площі та об'єму мембрани). Непористі мембрани

визначаються селективною здатністю молекул речовини розчинятися в мембрані.

Зважаючи на вище сказане, можна зробити наступний висновок - в пористих мембранах перенесення речовин здійснюється конвективним потоком, для непористих мембран - дифузійним потоком.

Конвективний потік для перенесення рідини через пористу мембрану з порами в вигляді тонких капілярів описується рівнянням Хагена-Пуазейля:

$$Q = \frac{\varepsilon \cdot r^2}{8\eta \cdot \tau} \cdot \frac{\Delta P}{\Delta l}, \text{ м}^3/\text{с} \quad (2)$$

де: ε - пористість поверхні мембрани, тобто відношення площі пор до площі мембрани; r - середній радіус пор, м; η - динамічна в'язкість проникаючої рідини, Па·с; τ - фактор протяжності пор, який збільшує тривалість шляху; Δl - товщина мембрани, м; ΔP - різниця тиску по обидві боки мембрани, Па.

Коефіцієнт перенесення речовини через пористу мембрану описують законом Дарсі [9], де рушійною силою процесу перенесення речовини є градієнт тисків, створений по різні боки мембрани. Загальна проникність речовини в даних рівняннях визначається різницею тисків речовини по обидві боки мембрани:

$$k = \frac{2P_0 \cdot Q \cdot \mu \cdot l}{(P_1^2 - P_2^2) \cdot F} \quad (3)$$

де: Q - об'ємна витрата рідини, м³/с; F - площа поверхні фільтрації, м²; P_1, P_2 - значення тисків по різні боки мембрани, Па; μ - динамічна в'язкість рідини, Па·с; l - товщина мембрани, м; P_0 - атмосферний тиск, Па.

Зіставивши рівняння 2 та 3 можна отримати значення проникності Дарсі для капілярної моделі мембрани. Пористість капілярної мембрани є

$$\varepsilon = n \cdot \pi \cdot r^2 \quad (4)$$

де: n – кількість пор; r - середній радіус пор, м.

Рівняння коефіцієнту проникності для капілярної мембрани можна записати

$$k = \frac{\varepsilon \cdot r^2}{8} \quad (5)$$

З закону Дарсі видно що опір руху потоку обумовлюється силами в'язкості, а проникність k відображає всі властивості пористого середовища.

Для розділення газових фаз речовини моделі в'язкісних потоків, які описуються рівняннями Пуазейля та Дарсі, будуть справедливі лише при наявності в мембрані «великих» пор ($r > 10$ мкм). Для пор таких розмірів більш характерний в'язкісний потік, при якому молекули речовини частіше співударяються одна з одною ніж зі стінками мембрани, при цьому не відбувається розділення компонентів газової суміші. Проте, якщо пори в мембрані звужені ($r < 10$ мкм), то при відносно невеликому тиску газової суміші спостерігаються більш часті співударяння молекул газу зі стінками пор, ніж молекул між собою. При цьому потік газів в порах мембрани описується рівнянням Кнудсена, м³/с [1, 13]

$$Q = \frac{8 \cdot \pi \cdot r^3}{3 \cdot (2 \cdot \pi \cdot R \cdot M \cdot T)^{0.5}} \frac{\Delta P}{\Delta l} \quad (6)$$

де: r - середній радіус пор, м; M – молекулярна вага газу, кг/моль; T – абсолютна температура газу, К; ΔP – різниця тиску по обидві боки мембрани, Па; Δl - товщина мембрани, м;

Варто звернути увагу на ряд відмінностей між рівняннями Пуазеля (Дарсі) та Кнудсена. Величина потоку Пуазеля пропорційна в'язкості речовини, а рівняння Кнудсена не має в своєму складі в'язкості. Крім

того, при проходженні суміші газів через трубку потоком Пуазеля її можна розглядати як однотипний газ, який проходить через тонкий капіляр з усередненою в'язкістю, при цьому не відбувається розділення компонентів газової суміші [13]. Для потоку Кнудсена характерно те, що компоненти газової суміші можуть рухатись через капіляр незалежно один від одного, розділення відбувається головним чином за рахунок різниці молекулярних мас компонентів суміші.

Дифузійний потік, який присутній за наявності різниці парціальних тисків по різні боки непористої мембрани, в загальному вигляді описується рівнянням дифузії Фіка, м³/с:

$$Q = D \frac{\Delta c}{\Delta l} \quad (7)$$

де: **D** – коефіцієнт дифузії проникаючого компонента в матеріалі мембрани, м; Δc – різниця концентрацій по обидві сторони мембрани, Па; Δl - товщина мембрани, м;

Величина дифузійного потоку, як було зазначено вище, має переважаюче значення для непористих мембран, тоді як для пористих мембран розглядається переважно конвективна складова потоку речовини, однак в деяких випадках виникає необхідність врахування обох складових потоку [1].

Виходячи з аналізу фізичної моделі руху парів вологи через мембрану, варто розглянути фізичну модель потоку повітря через секцію мембранного осушення в системі кондиціонування повітря за моделлю, що на рис.2. Для цього розглянемо сталий рух потоку вологого повітря через елементарну площину поперечного перерізу вздовж ∂x мембранного модуля осушення повітря, Зменшення вологи в потоці повітря $-\partial G$, виходячи з аналізу фізичної моделі руху парів вологи через мембрану, є прямо пропорційним перепаду надлишкових тисків по різні сторони мембрани $\Delta P = (P_1 - P_2)$ та проникності,

віднесеної до площі мембрани (питома проникність) Q_{pF} при сталому діаметрі рукава d [1]

$$-\frac{\partial G}{\partial x} = \pi \cdot d \cdot Q_{pF} \cdot (P_1 - P_2) \quad (8)$$

де: ∂G – кількість води, яка відділяється з потоку повітря та проникає скрізь мембрану через її поверхню на елементарній довжині елементу осушувача ∂x , кг/год; x – довжина елементу осушувача, м; Q_p – питомий коефіцієнт проникності мембрани, віднесений до площі її поверхні, кг/м² · Па · год; $\Delta P = (P_1 - P_2)$ - градієнт надлишкових тисків по різні боки мембрани, Па;

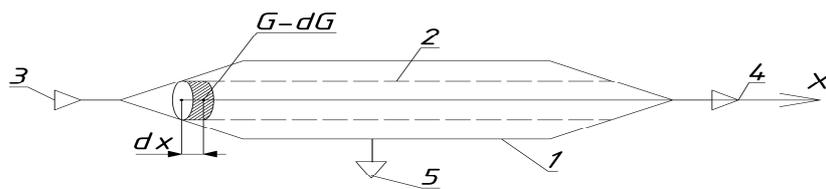


Рис. 2. Схема мембранного модуля осушення повітря
1-камера розрідження; 2-рукав з мембранної тканини; 3-вхід
вологого повітря; 4- вихід осушеного повітря; 5-вихід відділеної
вологи

Інтегрування рівняння (8) дає залежність для визначення потоку відділеної від повітря води при русі повітря вздовж мембранного модуля:

$$-G = \pi \cdot d \cdot Q_{pF} \cdot (P_1 - P_2) x \Big|_0^l \quad (9)$$

де: l – довжина мембранного модуля осушення повітря, м. За даними розрахунків за рівнянням (9) була побудована графічна теоретична

залежність потоку відділеної вологи з повітря при осушенні його по довжині модуля осушення повітря, що на рис. 3.

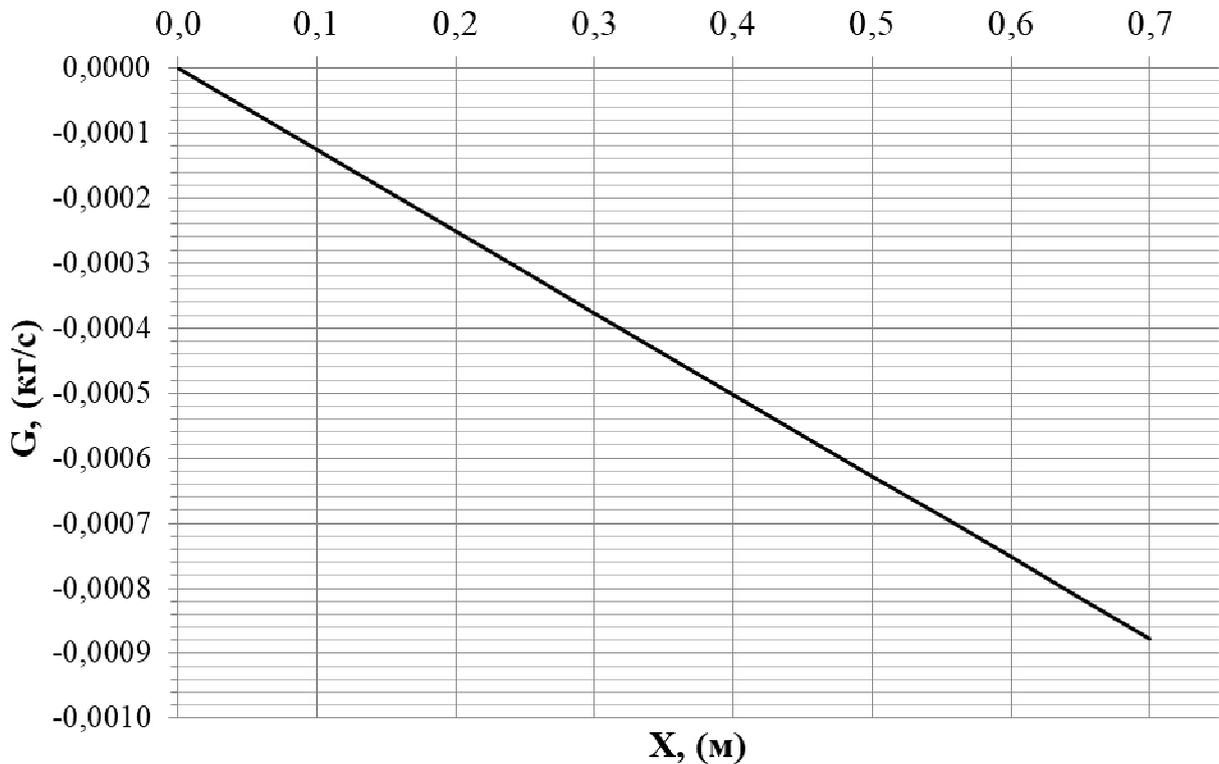


Рис. 3. Теоретична залежність потоку відділеної вологи з повітря в залежності від довжини модуля осушення повітря

Із графіка видно, що із довжиною мембранного модуля осушення повітря суттєво збільшується потік відділеної вологи і при значенні його довжини 0,7 метра потік відділеної вологи збільшується на порядок з 0,0001 кг/с до 0,001 кг/с. При таких значеннях відділення потоку вологи з повітря застосування мембранного способу осушення в системах кондиціонування повітря є доцільним.

Висновки. Представлена теоретична модель відділення вологи з повітря в мембранному модулі осушення може бути покладена в основу дослідження процесу осушення повітря в системах технологічного та комфортного кондиціонування. Отримані теоретичні результати ґрунтуються на значеннях проникності мембрани при стандартних умовах випробувань покрівельних напівпроникних

мембран [5, 14]. Разом з тим, зважаючи на те, що значення коефіцієнту проникності мембрани не постійне і залежить від конкретних параметрів повітря і навколишнього середовища – температури, вологості та тиску, постає задача визначення фактичного значення коефіцієнту проникності ПВХ мембрани для різних об'єктів та умов.

Література:

1. М. Мулдер (1992). Введение в мембранную технологию. Пер. с англ. М. Мир, 513 с., с ил.
2. М.Г. Хмельнюк, Д.И. Важинский, Н.В. Жихарева. (2014). Современные технологии осушения воздуха. Холодильная техника-2014 г. ст. 15-21.
3. Мембранні осушувачі стисненого повітря Hankison серія HMD URL: http://www.megapascal.ru/szhatiy_vozduh/membranniy_osushitel.html (дата звернення 04.03.2019).
4. ДБН В.2.6-220:2017. Покриття будівель і споруд. (2017). Київ: Мінрегіон України, 43с.
5. <https://folnet.pl/towar/membrana-dachowa-strotex-1300-basic>.
6. Подкровельные пленки и мембраны URL: <https://juta-ukraine.com.ua/> (дата звернення 12.07.2018).
7. Сайт компанії "Mizol" URL: <https://mizol.ua/podkrovelnie-plenki-dan-mode-ili-pravila-stroitelstva/> (ата звернення: 12.07.2018).
8. Компания «Прушиньски» Завод по производству материалов для кровель, фасадов и быстромонтируемых зданий URL:<http://www.pruszynski.com.ua/produkcija/plyonkikrovelnye/superdiffuzionnaya-plenka-membrana/> (дата звернення: 12.07.2018).
9. Гамаюнов, Н.И. (2012) Массоперенос в пористых и дисперсных материалах. Вестник ТвГТУ, 128 (Вып. 22). стр. 46-54. ISSN 2224-6363

10. Bergmair, D Daniel. (2015). Design of a system for humidity harvesting using water vapor selective membranes / door Daniel Bergmair. Eindhoven: Technische Universiteit Eindhoven, 149 p.
11. Окунев А.Ю. (2009). Перспективы применения мембранных технологий при эксплуатации зданий. Academia. Архитектура и строительство (Москва). Выпуск № 5, 389-394 с.
12. Левин Е.В., Окунев А.Ю. (2010). Мембранные системы регулировки влажности воздуха. Academia. Архитектура и строительство. Москва. Выпуск № 3, 505-511 с.
13. Хванг С.-Т., Каммермейер К. (1981). Мембранные процессы разделения Пер. с англ. Под ред. проф. Дытнерского Ю.И. М. Химия 464 с., ил.
14. EN 12086:1997 Thermal insulating products for building applications - Determination of water vapour transmission properties.

References:

1. M. Mulder (1992). Introduction to membrane technology. Per. with English M. Mir, 513 p., Ill.
2. М.Г. Хмельнюк, Д.И. Важинский, Н.В. Жихарева. (2014). Modern technologies of air dehumidification. Refrigeration equipment-2014 of Art. 15-21.
3. Membrane dehumidifiers of Hankison compressed air HMD series URL: http://www.megapascal.ru/szhatiy_vozduh/membranniy_osushitel.html (access date 04.03.2019).
4. DBN B.2.6-220: 2017. Covering of buildings and structures. (2017). Kyiv. Ministry of Regional Development of Ukraine, 43p.
5. <https://folnet.pl/towar/membrana-dachowa-strotex-1300-basic>.
6. Roofing films and membranes URL: <https://juta-ukraine.com.ua/> (access date 12.07.2018).

7. Website of the company "Mizol" URL: <https://mizol.ua/podkrovelnie-plenki-dan-mode-ili-pravila-stroitelstva/> (appeal: 12.07.2018).
8. Prushinsky Company Plant for the production of materials for roofs, facades and prefabricated buildings URL: <http://www.pruszynski.com.ua/produkcija/plyonkikrovelnye/superdiffuzionnaya-plenka-membrana/> (access date: 12.07.2018).
9. Gamayunov, N.I. (2012) Mass transfer in porous and dispersed materials. Bulletin of TvSTU, 128 (Issue 22). pp. 46-54. ISSN 2224-6363.
10. Bergmair, D Daniel. (2015). Design of a system for humidity harvesting using water vapor selective membranes / door Daniel Bergmair. Eindhoven: Technical University Eindhoven, 149 p.
11. Okunev A.Yu. (2009). Prospects for the application of membrane technologies in the operation of buildings. Academy. Architecture and construction (Moscow). Issue № 5, 389-394 p.
12. Levin EV, Okunev A.Yu. (2010). Membrane air humidity control systems. Academy. Architecture and construction. Moscow. Issue № 3, 505-511 p.
13. Hwang S.-T., Kammermeyer K. (1981). Membrane separation processes Per. with English Ed. prof. Dytnerky Yu.I. M. Chemistry 464 p., III.
14. EN 12086: 1997 Thermal insulating products for building applications - Determination of water vapor transmission properties.

Citation: 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

Copyright: O. Zadoiannyi, Y. Yevdokymenko ©. 2021. This is an openaccess article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution License (CC BY). The use, distribution or reproduction in other forums is permitted, provided the original author(s) or licensor are credited and that the original publication in this journal is cited, in accordance with accepted academic practice. No use, distribution or reproduction is permitted which does not comply with these terms.