

ХОЛОДИЛЬНА ТЕХНІКА ТА ЕНЕРГОТЕХНОЛОГІЇ

УДК 621.436.13

Аналіз ефективності роботи охолоджувача повітря з дисперсним проміжним теплоносієм

Б. В. Косой¹, **А. В. Арику²**^{1,2}Одеський національний технологічний університет, вул. Канатна, 112, Одеса, 65039, Україна✉ e-mail: ¹bkosoy@yahoo.comORCID: ¹<https://orcid.org/0000-0001-5353-8881>; ²<http://orcid.org/0000-0002-4043-7667>

Метою роботи є визначення доцільності конструювання охолоджувача повітря з дисперсним проміжним теплоносієм на підставі аналізу теплових розрахунків. Розглядається проблема утворення інею в повітроохолоджувачах, які використовуються в складських приміщеннях, призначених для зберігання плодоовочевої продукції. Обговорені принципи роботи охолоджувачів повітря, що реалізують спосіб запобігання утворення інею за використання псевдозрідженого шару та рухомого щільного шару. Основна увага в роботі приділена способу запобігання утворення інею на поверхні теплообміну за рахунок виключення її безпосереднього контакту з охолоджуючим повітрям. Представлені результати перевіркового розрахунку повітроохолоджувача при стаціонарному режимі за наступними вихідними даними: витрата повітря – 1,6 кг/с, температура повітря на вході – 2,0 °С; вологовміст повітря – 4,3 г/кг; витрата проміжного дисперсного теплоносія (ПДТ) – 1,6 кг/с; еквівалентний діаметр частинок – 0,003 м; матеріал – щебінь, висота камери – 1,3 м, довжина камери – 1,5 м, ширина камери – 0,03 м. За результатами розрахунків визначені локальні температури і вологовміст в різних перерізах та ступінь осушення повітря. Наведений аналіз комплексу ξ , який характеризує відношення термічних опорів міжкомпонентного теплообміну в камері охолодження до теплообміну шару ПДТ з тепловідвідними поверхнями в камері. Запропоновані заходи щодо підвищення комплексу ξ та визначено вплив діаметру часток, швидкості повітря в камері охолодження, швидкості руху шару твердого (дисперсного) матеріалу. Наведені результати зіставлення характеристик повітроохолоджувача з псевдозрідженим шаром з повітроохолоджувачем із щільним шаром. Результати роботи можуть бути використані при проектуванні та оптимізації повітроохолоджувача та аналогічних апаратів із щільним рухомих шаром.

Ключові слова: Утворення інею; Теплообмінник; Камера охолодження; Розподіл температур компонентів; Вологовміст

doi: <https://doi.org/10.15673/ret.v58i4.2572>

© The Author(s) 2022. This article is an open access publication
This work is licensed under the Creative Commons Attribution 4.0 International License (CC BY)
<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



1. Вступ

Одним із способів зберігання плодоовочевої продукції є оснащення складських приміщень установками штучного охолодження. Це дозволяє будь-якої пори року, незалежно від умов навколишнього середовища, підтримувати оптимальну

температуру [1]. Для цього передбачено застосування охолоджувачів повітря, в яких повітря продувається безпосередньо через тепловідвідну поверхню. Охолодження повітря супроводжується випаданням надлишкової вологи на поверхні у вигляді інею, шар якого, наростаючи, погіршує теплотеплопередачу, знижує продуктивність, збільшує ае-

родинамічний опір. Робота охолоджувача повітря набуває циклічного характеру з чергуванням періодів охолодження повітря і відтавання інею з тепловідвідної поверхні, збільшуючи витрати енергії на вироблення холоду. Ключовими факторами, що сприяють утворенню інею, є вологість, температура та витрата повітря. Тому для отримання раціональних умов роботи повітроохолоджувача проводяться дослідження методів, що сприяють зниженню вологості повітря та методів підготування теплообмінної поверхні. Другим напрямком розвитку повітроохолоджувачів є розробка схемних рішень, які передбачають використання проміжного дисперсного теплоносія для запобігання утворення інею. Метою роботи є визначення доцільності конструювання охолоджувача повітря з дисперсним проміжним теплоносієм на підставі аналізу теплових розрахунків.

2. Аналіз літературних даних та постановка проблеми

Процес утворення інею відбувається в багатьох типах теплообмінників як небажане явище, оскільки шар інею діє як додатковий шар термічного опору, що знижує ефективність теплопередачі. [2]. Зменшити утворення інею на тепловідвідних поверхнях можна шляхом попереднього осушення повітря за рахунок введення в потік водних розчинів хлористого літію та хлористого кальцію [3], фільтрації повітря через шар силікагелю [4], нанесення на тепловідвідні поверхні спеціальних покриттів [5, 6]. Однак зазначені способи недостатньо ефективні, тому в більшості випадків завдання запобігання утворення інею вирішується, в основному, традиційним методом – шляхом його відтавання. Більш перспективними порівняно з перерахованими вище є способи запобігання утворення інею та забезпечення безперервної роботи охолоджувача повітря з номінальною продуктивністю за допомогою проміжного дисперсного теплоносія (ПДТ). Приклад роботи охолоджувачів повітря, що реалізують спосіб запобігання утворення інею за допомогою псевдозрідженого шару, описаний авторами роботи [7].

Охолоджувач повітря з псевдозрідженим шаром (рис. 1) являє собою теплообмінний канал, всередині якого рухається флюїдизований потік. Удари частинок о поверхню теплообміну руйнують пограничний шар, сприяючи інтенсифікації теплообміну, розбивають і подрібнюють частину

шару інею в дрібні частинки, які потім виносяться повітрям в приміщення, що охолоджується. Повне запобігання утворення інею на тепловідвідній поверхні забезпечується при використанні повітроохолоджувача з щільним рухомим шаром [8, 9].

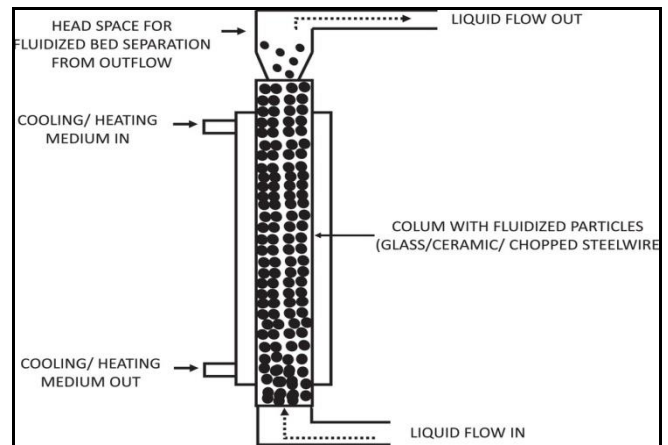


Рисунок 1 – Однострубічний теплообмінник із псевдозрідженим шаром [7]

В інших схемних рішеннях реалізований спосіб запобігання утворення інею на поверхні теплообміну за рахунок виключення її безпосереднього контакту з повітрям, що охолоджується [10]. Повітря продувається через шар насадки, що рухається, попередньо охолодженою при омиванні тепловідвідної поверхні теплообміну. При цьому камери охолодження повітря та дисперсного матеріалу розділені проміжним вузлом, що запобігає перетіканню повітря між ними. Рух ПДТ організується замкненим контуром з регенерацією його перед охолодженням. Проте існуючі схемні рішення мають бути обґрунтовані на підставі теплових конструкторських розрахунків, на що націлені дослідження даної роботи.

3. Принципова схема повітроохолоджувача з проміжним дисперсним теплоносієм

Принципова схема повітроохолодження наведена на рис. 2.

Охолоджувач повітря працює наступним чином. ПДТ з верхнього бункера під дією гравітаційних сил надходить у камеру охолодження. Омиваючи тепловідвідну поверхню, встановлену в камері, дисперсний теплоносієм охолоджується, потім через проміжний вузол надходить у контактний теплообмінник, через бічні перфоровані стінки якого продувається повітря, що охолоджується. Проміжний вузол дозволяє практично виключити

перетікання повітря на камеру охолодження ПДТ. Охолодження повітря супроводжується випаданням надлишкової вологи як інею на поверхні частинок ПДТ.

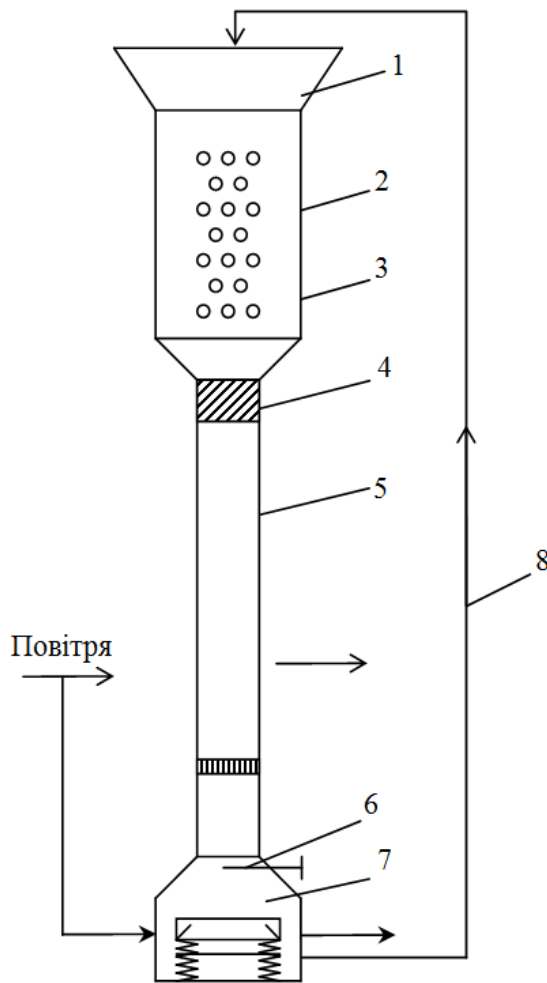


Рисунок 2 – Принципова схема повітроохолоджувача з щільним шаром ПДТ, що рухається:

1 – завантажувальний бункер; 2 – камера охолодження ПДТ; 3 – тепловідвідна поверхня; 4 – проміжний вузол; 5 – контактний теплообмінник для охолодження повітря; 6 – випускний пристрій, 7 – камера регенерації ПДТ; 8 – система транспорту ПДТ

Рух ПДТ у вигляді щільного шару, рівномірний розподіл швидкості перерізу, а також її регулювання забезпечуються випускним пристроєм. З контактного теплообмінника через випускний пристрій дисперсний матеріал надходить у віброкамеру регенерації, в якій, для повного очищення частинок від інею, він подається на горизонтальний стрічковий транспортер, що робить вертикальні коливання. Під дією вібрації транспортера відбувається інтенсивне руйнування та подрібнення

шару інею на поверхні частинок. Дрібні частки інею виносяться повітрям з віброкамери регенерації через отвори в бічних стінках при постійній або періодичній продувці. Насадка, очищена від інею, стрічковим транспортером відводиться з віброкамери регенерації та системою транспорту повертається до бункеру. Дрібні частки інею виносяться повітрям з віброкамери регенерації через отвори в бічних стінках при постійній або періодичній продувці.

4. Розрахунок повітроохолоджувача та аналіз результатів

Розрахунки охолоджувача повітря проводилися в два етапи. На першому етапі, виходячи з наближеної методики, у якій використовувалися середні параметри, виконувався конструкторський розрахунок. В якості вихідних даних приймалися витрата повітря, температури та відносні вологості повітря на вході та виході з апарату, розмір та матеріал частинок ПДТ. Оптимальну витрату ПДТ вибирали за рекомендаціями [11]. Коефіцієнти міжкомпонентного тепло- і масообміну в шарі, що рухається, а також його аеродинамічний опір, розраховували за залежностями [12], ефективні коефіцієнти теплопровідності та дифузії – по [13]. Відповідно до прийнятої моделі, газовий і твердий компоненти розглядаються як взаємодіючі квазігомогенні системи, що характеризуються ефективними коефіцієнтами перенесення. Тепломасообмін між твердим та газовим компонентами, а також між повітрям та бічними поверхнями шару, враховувався за допомогою відповідних коефіцієнтів тепло- та масовіддачі. Опір перенесення всередині елементів шару прийнято дуже малим. Умови теплообміну на бокових межах шару вважалися однаковими. Теплота вологовипаду враховувалася як стік тепла на поверхні частинок. Процес теплообміну шару з охолодженими поверхнями в камері охолодження ПДТ не супроводжується фазовими перетвореннями, тому його опис проводився на підставі однокомпонентної моделі, що не враховує відмінність температур газу та частинок. Оскільки передбачалося, що бічні стінки камери теплоізовані, рівняння енергії формулювалося в одномірному наближенні. Вважалося також, що в обох камерах порізність, швидкість газу та насадки, фізичні характеристики компонентів є постійними. Тепло- та масоперенесення в контактному теплообміннику описується системою рів-

нянь [14], яка враховує рівняння енергії для газового компонента, рівняння енергії для твердого компонента та рівняння масопереносу в газовому компоненті. Для їх вирішення застосовано чисельний метод кінцевих елементів. В результаті перевірочних розрахунків при стаціонарному і нестационарному режимах визначаються локальні і середні температури і вміст вологи в різних перерізах, у тому числі вихідних, ступінь осушення повітря, кількість інею, що утворився, теплові потоки.

Як ілюстрація, на рис.3 представлені результати перевірочного розрахунку повітроохолоджувача при стаціонарному режимі та наступних вихідних даних: витрата повітря – 1,6 кг/с, його температура на вході – 2,0 °С; вологовміст повітря – 4,3 г/кг, витрата ПДТ – 1,6 кг/с, діаметр частинок – 0,003 м, матеріал – щебінь, висота камери 1 – 1,3 м, довжина камери 2 – 1 м, ширина камери – 0,03 м, питома площа тепловідвідних поверхонь – 60 м²/м³, їх температура (-15) °С.

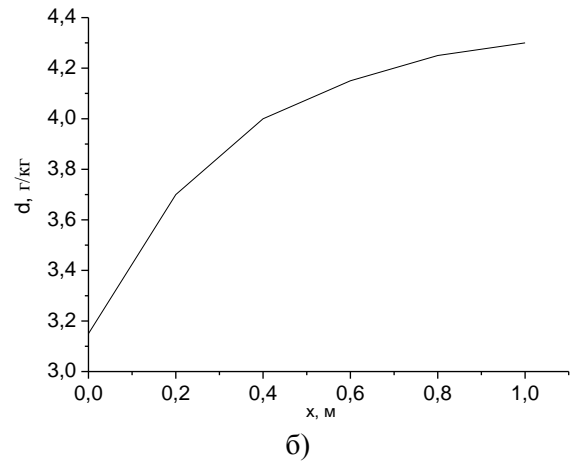
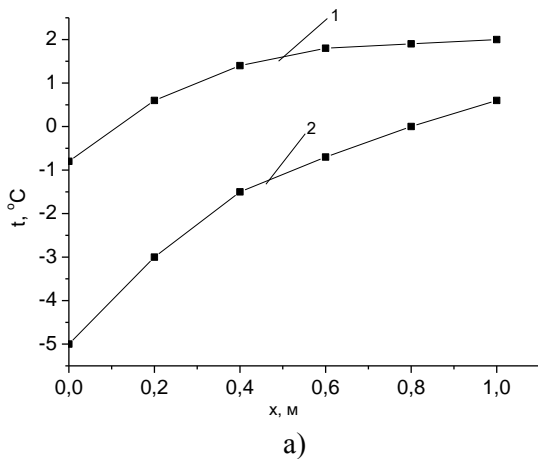


Рисунок 3 – Розподіл температур компонентів (а) та вологовміст повітря (б) по висоті камери охолодження повітря в перерізі $y=0,1$ м; 1 – температура повітря; 2 – температура матеріалу

По висоті камери 1 температура ПДТ знижується в результаті тепловідведення до занурених поверхонь. По висоті камери охолодження 2 температура ПДТ зростає внаслідок теплообміну з повітрям. Температура повітря у верхніх перерізах камери охолодження менше, ніж нижніх, т.к. у мі-

ру віддалення від входу падають локальні температурні тиски між повітрям і частинками і, отже, теплові потоки, що відводяться.

На рис. 4 наведений розподіл температур компонентів і вологовмісту повітря по ширині камери охолодження повітря в перерізі $x=0,4$ м.

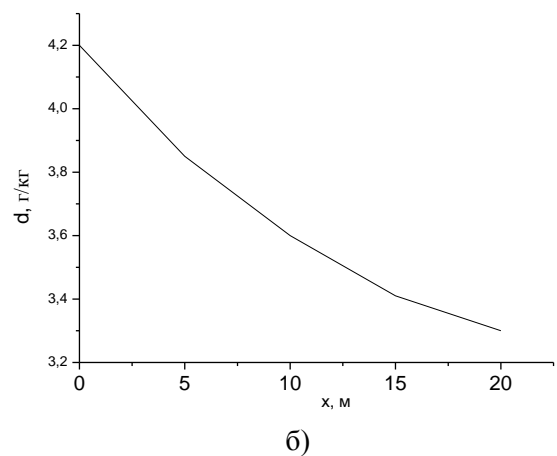
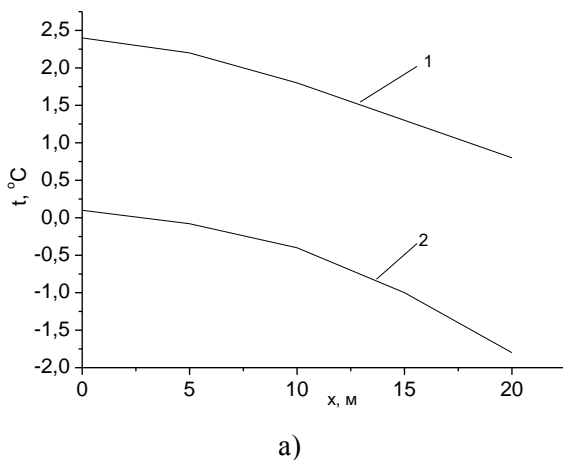


Рисунок 4 – Розподіл температур компонентів (а) і вологовміст повітря (б) по ширині камери охолодження повітря в перерізі $x=0,4$ м. 1 – температура повітря; 2 – температура матеріалу

По ширині камери охолодження температура повітря знижується в результаті теплообміну з

ПДТ. Температура ПДТ у лівій межі шару вище, ніж у правій, що також пояснюється зменшенням

локальних температурних напорів і теплових потоків, що відводяться від повітря в напрямку осі у. Вологовміст повітря по ширині камери охолодження знижується, повітря осушується, причому у верхніх перерізах помітніше.

Аналогічний вигляд мають профілі температур і вологовмісту за інших умов.

Аналіз розрахункових даних показує, що характер перебігу процесу охолодження та осушення повітря визначається значенням комплексу

$$\xi = \frac{\alpha}{\alpha_M} \frac{F_{ст}}{a},$$

що характеризує відношення термічних опорів міжкомпонентного теплообміну в камері охолодження і теплообміну шару ПДТ з тепловідвідними поверхнями в камері 1. Зі збільшенням ξ від 0,1 до 1 ступінь осушення повітря зростає від 8 до 25 %, після чого змінюється незначно (рис. 5).

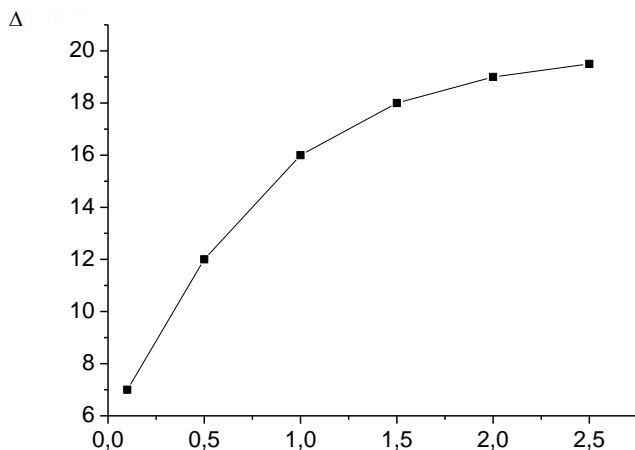


Рисунок 5 – Залежність ступеня осушення повітря від комплексу ξ

Впливаючи на величину ξ , тобто вибираючи відповідним чином режимні та геометричні параметри при конструкторському розрахунку, можна забезпечити необхідний вміст вологи на виході. Підвищення комплексу ξ може бути досягнуто шляхом збільшення швидкості шару в камері 1, розміру частинок ПДТ, застосування компактних охолоджуючих поверхонь (наприклад, пучка орбених труб), зниження швидкості повітря в камері охолодження. У цьому слід брати до уваги вплив зазначених величин на інші характеристики апарата. Так, при збільшенні розміру частинок знижується інтенсивність теплообміну шару з тепловідвідними поверхнями, що призводить до підвищення їх маси та габаритів, зменшуються коефіцієнти міжкомпонентного тепло- та масообміну (при турбулентному режимі перебігу повітря у шарі) та питома поверхня частинок, внаслідок чого зростають необхідна ширина камери охолодження та аеродинамічний опір. З розрахунків обрано раціональне поєднання визначальних параметрів.

Розроблені методика розрахунку, алгоритм та програмний комплекс можуть бути використані при проектуванні та оптимізації повітроохолоджувача та аналогічних апаратів із щільним рухомим шаром. Результати розрахунків охолоджувачів повітря з щільним і псевдозрідженим шарами наведені в таблиці.

З таблиці видно, що охолоджувачі повітря з дисперсною насадкою забезпечують прийнятну холодопродуктивність. Для прикладу, застосований у промисловості повітроохолоджувач ВОП-75, подібний за своїми технічними характеристиками до розглянутих в цьому дослідженні, має холодопродуктивність 7,7 кВт.

Таблиця – Зіставлення повітроохолоджувача з псевдозрідженим шаром з повітроохолоджувачем із щільним шаром

Характеристика	Повітроохолоджувач з псевдозрідженим шаром	Повітроохолоджувач з щільним шаром
Холодопродуктивність, кВт	7,17	7,17
Відношення холодопродуктивності до потужності вентилятора, кВт/кВт	2,39	8,58
Відношення об'єму апарату до холодопродуктивності, м ³ /кВт	0,156	0,195
Відношення площі тепловідвідної поверхні до холодопродуктивності, м ² /кВт	1,59	7,96

Однак схеми, що розглядаються, забезпечують можливість безперервної роботи при незмінних значеннях холодопродуктивності і аеродинамічного опору.

5. Висновки

Раціональним способом запобігання утворення інею та забезпечення безперервної роботи охолоджувача повітря є використання в схемі роботи проміжного дисперсного теплоносія.

Перевірочні розрахунки, проведені чисельним методом, демонструють зміну температур газового та твердого компоненту, а також вміст вологи в різних перерізах камери охолодження. Отримано, що по ширині камери охолодження температура повітря знижується в результаті теплообміну з ПДТ. Температура ПДТ у лівій межі шару вище, ніж у правій, що пояснюється зменшенням локальних температурних напорів і теплових потоків, що відводяться від повітря за товщиною шару. Вологовміст повітря по ширині камери охолодження знижується, повітря осушується, причому у верхніх перерізах помітніше.

Характер процесу охолодження та осушення повітря визначається комплексом ξ , що характеризує відношення термічних опорів міжкомпонентного теплообміну в камері охолодження і теплообміну шару ПДТ з тепловідвідними поверхнями. Підвищення комплексу ξ може бути досягнуто шляхом збільшення швидкості шару, зниження розміру частинок ПДТ, застосування компактних охолоджуючих поверхонь (наприклад, пучка оребрених труб), зниження швидкості повітря в камері охолодження.

Охолоджувачі повітря з дисперсною насадкою в режимі псевдозрідженого шару та в режимі щільного шару забезпечують холодопродуктивність 7,17. Застосовуваний у промисловості повітроохолоджувач ВОП-75, подібний за своїми технічними характеристиками, має холодопродуктивність декілька вище – 7,7 кВт, проте схеми з ПДТ забезпечують можливість безперервної роботи при незмінних значеннях холодопродуктивності і аеродинамічного опору.

Особистий внесок авторів CRediT

Косой Б.В.: концептуалізація, методологія, формальний аналіз. **Арику А.В.:** комп'ютерне моделювання, проведення розрахунків.

Література

1. Industrial refrigerators for storing vegetables. Refrigerated chambers for storing vegetables and fruits. Mini chamber for storing vegetables and fruits. – URL: <https://rt82.ru/en/fireprotection/promyshlennye-holodilniki-dlya-hraneniya-ovoshchei-holodilnyekamery-dlya/> (дата звернення 31.10.2022).
2. **P. Jakończuk et al.** Image-Analysis-Based Approach for Identification of Air Cooler Heat Transfer Degradation during Frosting Process // *Sustainability*. – 2022. – Vol. 14. – No. 21. – P. 13731.
3. **Conde M. R.** Properties of aqueous solutions of lithium and calcium chlorides: formulations for use in air conditioning equipment design // *International Journal of Thermal Sciences*. – 2004. – Vol. 43. – No. 4. – P. 367–382.
4. **Al-Obaidi, A. S. M., Peterson, S., & Hui, K. J. L. N.** Desiccant-based air dehumidifier and cooling system // *Journal of Physics: Conference Series*. – 2022. – Vol. 2222(1). – P. 012012.
5. **Ye H.-Y., Park J.-S., & Lee K.-S.** Critical operating conditions for prevention of frost formation in fin-tube heat exchangers // *International Journal of Heat and Mass Transfer*. – 2014. – Vol. 76. – P. 279–285.
6. **Kumala E. F., Priramadhi R. A., Pangaribuan P.** Frost Preventive Control System of Freezer // *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*. – 2018. – Vol. 434. – P. 012216.
7. **Prestes A. A. et al.** Freeze concentration techniques as alternative methods to thermal processing in dairy manufacturing: A review // *Journal of Food Science*. – 2022. – Vol. 87. – No. 2. – P. 488–502.
8. **Habib B., Farid M.** Heat transfer and operating conditions for freeze concentration in a liquid-solid fluidized bed heat exchanger // *Chemical Engineering and Processing: Process Intensification*. – 2006. – Vol. 45. – No. 8. – P. 698–710.
9. **Bai H. Y. et al.** A review of heat recovery technologies and their frost control for residential building ventilation in cold climate regions // *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. – 2022. – Vol. 162. – P. 112417.
10. **Календер'ян В.А., Гаппасов В.Р., Левицький В.А.** Запобігання випаданню інею на теплопередаючій поверхні повітроохолоджувача // *Холодильна техніка*. – 1993. – №2. – С.16–17.
11. **Горбіс З.Р., Календер'ян В.О.** Теплообмінники із проточними дисперсними теплоносіями – К: Енергія. – 1975. – 294 с.
12. **R. Holyst et al.** Evaporation of freely suspended

single droplets: experimental, theoretical and computational simulations // Reports on Progress in Physics. – 2013. – Vol. 76. – No. 3. – P. 034601..

13. **Zhang X. M., Zhang X. X.** Impact of Compression on Effective Thermal Conductivity and Diffusion Coefficient of Woven Gas Diffusion Layers in Poly-

mer Electrolyte Fuel Cells // Fuel Cells. – 2014. – Vol. 14. – No. 2. – P. 303-311.

14. **Календер'ян В. А. Бошкова І. Л.** Тепломасоперенесення в апаратах із щільним шаром дисперсного матеріалу: монографія. – Київ: Слово, 2011. – 184 с.

Отримана в редакції 24.09.2022, прийнята до друку 07.12.2022

Analysis of the working efficiency of the air cooler with dispersed intermediate heat carrier

Boris Kosoy¹, **Antonina Aryku²**

^{1,2}Odesa National University of Technology, 112 Kanatnaya Str., Odessa, 65039, Ukraine

✉ e-mail: ¹bkosoy@yahoo.com

ORCID: ¹<https://orcid.org/0000-0001-5353-8881>; ²<http://orcid.org/0000-0002-4043-7667>

The purpose of the work is to determine the expediency of designing an air cooler with a dispersed intermediate coolant based on the analysis of thermal calculations. The problem of frost formation in air coolers used in warehouses intended for storage of fruit and vegetable products is considered. The principle of operation of air coolers, which implement a method of preventing frost formation using a fluidized layer and a moving dense layer, is presented. The main attention in the work is given to the method of preventing frost formation on the heat exchange surface by excluding its direct contact with the cooling air. The results of the verification calculation of the air cooler in the stationary mode are presented according to the following initial data: air consumption – 1.6 kg/s, temperature and moisture content of the air at the entrance – 2.0 °C and 4.3 g/kg, consumption of intermediate dispersed coolant PDT – 1.6 kg/s, equivalent particle diameter – 0.003 m, material – crushed stone, chamber height – 1.3 m, chamber length – 1.5 m, chamber width – 0.03 m. According to the results calculations determined local temperatures and moisture content in different cross-sections and the degree of air drying. The analysis of the complex ξ is presented, which characterizes the ratio of thermal resistances of intercomponent heat exchange in the cooling chamber to the heat exchange of the PDT layer with heat-dissipating surfaces in the chamber. Measures to increase the complex ξ are proposed and the influence of particle diameter, air speed in the cooling chamber, speed of movement of the layer of solid (dispersed) material is determined. The results of comparing the characteristics of a fluidized bed air cooler with a dense bed air cooler are given. The results of the work can be used in the design and optimization of the air cooler and similar devices with a dense moving layer.

Keywords: Frost formation; Heat exchanger; Cooling chamber; Temperature distribution of components; Moisture content

References

1. Industrial refrigerators for storing vegetables. Refrigerated chambers for storing vegetables and fruits Mini chamber for storing vegetables and fruits. Retrived 31 October 2022 from <https://rt82.ru/en/fire-protection/promyshlennye-holodilniki-dlya-hraneniya-ovoshchei-holodilnye-kamery-dlya/>.

2. **Jakończuk, P., Śmierciew, K., Gagan, J., Butrymowicz, D.** (2022). Image-Analysis-Based Approach for Identification of Air Cooler Heat Transfer Degra-

ation during Frosting Process. *Sustainability*, 14(21), 13731.

3. **Conde, M. R.** (2004). Properties of aqueous solutions of lithium and calcium chlorides: formulations for use in air conditioning equipment design. *International Journal of Thermal Sciences*, 43(4), 367-382.

4. **Al-Obaidi, A. S. M., Peterson, S., & Hui, K. J. L. N.** (2022). Desiccant-based air dehumidifier and cooling system. *Journal of Physics: Conference Series*, 2222(1), 012012.

5. **Ye, H.-Y., Park, J.-S., & Lee, K.-S.** (2014). Criti-

cal operating conditions for prevention of frost formation in fin-tube heat exchangers. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 76, 279-285.

6. **Kumala, E. F., Priramadhi, R. A., & Pangaribuan, P.** (2018). Frost Preventive Control System of Freezer. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 434, 012216.

7. **Prestes, A. A., Helm, C. V., Esmerino, E. A., Silva, R., da Cruz, A. G., Prudencio, E. S.** (2022). Freeze concentration techniques as alternative methods to thermal processing in dairy manufacturing: A review. *Journal of Food Science*, 87(2), 488–502.

8. **Habib, B., Farid, M.** (2006). Heat transfer and operating conditions for freeze concentration in a liquid–solid fluidized bed heat exchanger. *Chemical Engineering and Processing: Process Intensification*, 45(8), 698-710.

9. **Bai, H. Y., Liu, P., Justo Alonso, M., & Mathisen, H. M.** (2022). A review of heat recovery technologies and their frost control for residential building ventilation in cold climate regions. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 162, 112417.

10. **Kalenderyan, V.A., Gappasov, V.R., Levitsky, V.A.** (1993). Prevention of frost on the heat transfer surface of the air cooler. *Refrigeration technology*, 2, 16-17.

11. **Gorbis, Z. R., Kalenderyan, V.A.** (1975) Heat exchangers with flowing dispersed heat carriers. *Energy*, 294.

12. **Holyst, R., Litniewski, M., Jakubczyk, D., Kolwas, K., Kolwas, M., Kowalski, K., Migacz, S., Palesa, S., Zientara, M.** (2013). Evaporation of freely suspended single droplets: experimental, theoretical and computational simulations. *Reports on Progress in Physics*, 76(3), 034601.

13. **Zhang, X. M., Zhang, X. X.** (2014) Impact of Compression on Effective Thermal Conductivity and Diffusion Coefficient of Woven Gas Diffusion Layers in Polymer Electrolyte Fuel Cells. *Fuel Cells*, 14, 2, 303-311.

14. **Kalenderyan, V. A., Boshkova, I. L.** (2011) Heat and mass transfer in apparatuses with a dense layer of dispersed material: monograph. *Kyiv: Slovo*, 187.

Received 24 September 2022

Approved 07 December 2022

Available in Internet 30 December 2022