

ТЕРМОДИНАМІЧНИЙ АНАЛІЗ ТА МОДЕЛЮВАННЯ

УДК 66.04:517.958

Методичні основи визначення коефіцієнтів перенесення теплоти та вологи у дисперсних матеріалах

I. Л. Бошкова¹✉, Н. В. Волгушева², А. П. Гречановський³, Д. М. Нікітін⁴, Д. М. Тортіка⁵

¹⁻⁵Одеський національний технологічний університет, вул. Канатна, 112, Одеса, 65039, Україна

✉ e-mail: ¹boshkova.irina@gmail.com

ORCID: ¹<http://orcid.org/0009-0009-5599-2709>; ²<http://orcid.org/0000-0002-9984-6502>; ³<http://orcid.org/0000-0002-8257-5769>; ⁴<http://orcid.org/0009-0000-9144-1810>; ⁵<https://orcid.org/0009-0003-2777-8955>

Дослідження коефіцієнтів перенесення вологи та теплоти у різних матеріалах є важливим етапом дослідження процесів сушіння. Дані за цими коефіцієнтами необхідні для розрахунків за аналітичними залежностями розподілів вмісту вологи і температур, а також потоків вологи і теплоти в тілі. Численні дослідження показують, що точне знання коефіцієнтів масопереносу в дисперсних системах є важливим для успішного проектування та енергетичної ефективності роботи технологічних установок. Наведено дані щодо коефіцієнтів тепломасоперенесення для ряду матеріалів і наводиться зіставлення різних аналітичних рівнянь для розрахунку ефективного коефіцієнта дифузії. Наголошується, що аналітичні залежності для розрахунку коефіцієнтів масопереносу не відображають всього різноманіття факторів, що впливають на переміщення вологи в тілі, оскільки в них розглядаються ідеалізовані структури, що враховують лише деякі з механізмів перенесення. Тому наявні аналітичні залежності використовуються в більшості випадків не для розрахунків коефіцієнтів перенесення, а лише для якісної оцінки їх залежності від температури, тиску, властивостей компонентів, у зв'язку з чим першочергового значення набувають експериментальні методи визначення цих коефіцієнтів. У роботі наведено методіку отримання даних за ефективними коефіцієнтами перенесення для щільних шарів дисперсних матеріалів, теоретичною основою якої є система диференціальних рівнянь взаємопов'язаного волого- та теплоперенесення в капілярно-пористих тілах у процесах сушіння А.В. Ликова. Щільний шар дисперсного матеріалу розглядається як квазігомогенне середовище з ефективними коефіцієнтами перенесення. Представлено експериментальну установку та алгоритм обробки експериментальних даних, отримано розподіл вмісту вологи і температури в щільному шарі цеоліту в процесі кондуктивного сушіння.

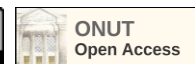
Ключові слова: Сушка; Експериментальна установка; Цеоліт; Температура; Вологовміст; Кондуктивне нагрівання; Щільний шар

doi: <https://doi.org/10.15673/ret.v60i4.3051>

© The Author(s) 2024. 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

Розробка ефективних сушарок для дисперсних матеріалів залишається актуальною для багатьох галузей промисловості. Важливим етапом є отримання даних за коефіцієнтами теплоперенесення у процесі сушіння, що дозволяє реалізувати раціона-

льне проектування сушарок. Відомості про ці коефіцієнти, що характеризують матеріал як об'єкт сушіння, необхідні при розрахунках розподілів вологовмісту і температур у тілі за аналітичними залежностями, потоків вологи і теплоти, що переносяться за допомогою різних механізмів, при узагальненні даних по кінетиці сушіння. Для визна-

чення зазначених характеристик розроблено як розрахункові, так і експериментальні методи. Вологий дисперсний матеріал є гетерогенною багатокомпонентною системою, що містить твердий компонент (частки), вологу в різних станах, газ (повітря). При розрахункових та експериментальних дослідженнях визначають ефективні коефіцієнти перенесення, що характеризують шар вологого матеріалу як квазігомогенне середовище. Такі коефіцієнти залежать не тільки від властивостей матеріалу, вмісту вологи, температури, але і від структурних характеристик шару і його пористості. Існує масив даних по коефіцієнтам дифузії, термодифузії вологи та теплофізичним параметрам (теплопровідності, теплоємності) для ряду матеріалів, таких як активоване вугілля АР 3, український флюс АН 7 та шихта для його плавки, керамічний флюс АН 8, мінеральна вата, кварцовий пісок, ряд зварювальних флюсів АН 15, АН 348 А, АН 60 та флюорит у кінетичних режимах кондуктивного сушіння. Проте в сучасному світі виникла потреба використання більш широкого кола дисперсних матеріалів, зокрема цеолітів, які набувають розповсюдження в нових теплотехнічних технологіях: наприклад, у процесі осушення природного газу або в теплоаккумуляційних установках. Для отримання даних по коефіцієнтам тепломасоперенесення для нових типів дисперсних матеріалів необхідні відпрацьовані методики дослідження в щільних шарах та відповідні експериментальні установки, що дозволяють організувати кондуктивний, конвективний або комбінований спосіб підведення теплоти.

2. Світова практика досліджень коефіцієнтів перенесення вологи та теплоти у дисперсних матеріалах

На основі моделі капілярно-пористого тіла, як системи циліндричних каналів, пов'язаних між собою, отримані теоретичні залежності для коефіцієнтів капілярного перенесення рідкої та пароподібної вологи в ізотермічних та неізотермічних умовах [1]. Аналітичне дослідження коефіцієнтів тепло- і масопереносу наведено в [2]. У цьому дослідженні було проведено чисельне моделювання сушіння ячменю як у масштабі частинок, так і в масштабі купи зерна шляхом вирішення пов'язаного рівняння тепла та вологи. Результати показали, що коефіцієнти тепло- та масообміну зерен ячменю розрізняються по поверхні, нерів-

номірність зерен ячменю призводить до асиметричного розподілу коефіцієнта поверхневої тепловіддачі. Області з нижчою пористістю зернового шару демонстрували нижчі показники тепло- і вологоперенесення, особливо у центральній частині. Перенесення вологи всередині шару зерна переважало над часом сушіння порівняно з теплопровідністю. Також було відмічено, що температура повітря та відносна вологість були основними змінними, що впливають на швидкість сушіння зерна. При збільшенні температури повітря з 45 до 70 °С швидкість сушіння збільшувалася з $6,8 \cdot 10^{-4}$ до $8,5 \cdot 10^{-4}$ хв⁻¹.

Для осушення повітря використовують шари адсорбенту з глинистих частинок, просочених CaCl₂. Для таких пластів розроблено три математичні моделі тепло- та вологоперенесення, а саме: ізотермічна, адіабатична та адіабатична дифузія [3] Моделі вирішуються чисельно шляхом кінцевих різниць. Для перевірки точності розроблених моделей чисельні результати порівнюються з наявними експериментальними даними. Визначено значення коефіцієнта дифузії частинок. Коефіцієнт дифузії води в частинці відповідає значенням $5 \cdot 10^{-10}$, $8 \cdot 10^{-10}$ та $7 \cdot 10^{-9}$ м²/с залежно від співвідношення CaCl₂ та глини. Розробка глинистих частинок з вищим допустимим співвідношенням розчину має вирішальне значення для збільшення адсорбційної здатності шару. Для опису одночасного тепло- та вологоперенесення в пористому ґрунті з сухим поверхневим шаром розроблено математичну модель, в основі якої лежить метод об'ємного осереднення [4]. Теоретичні та експериментальні результати показують, що сухий поверхневий шар надає важливий вплив на міграцію тепла та вологи у ґрунті, а вплив температури на перенесення вологи у ненасиченому ґрунті суттєвий.

У [5] зазначається, що точне знання об'ємних коефіцієнтів масопереносу в багатофазних системах важливе для успішного проектування та ефективної експлуатації технологічних установок. Найбільш поширеним методом визначення об'ємного коефіцієнта масовіддачі є метод динамічної дегазації. Автори [5] досліджували ефект протиточної дифузії з використанням різних газів для віддування для визначення об'ємного коефіцієнта масопереносу. Крім того, ефект контрдифузії досліджується як при звичайній аерації, так і при аерації мікропухирцями. Розроблено модель, що описує зменшення коефіцієнта масовіддачі залежно від

розчинності віддувального газу.

У [6] наголошується, що в даній час у фундаментальних дослідженнях слід приділити більше уваги гетерогенній структурі шарів, встановити моделювання зв'язків між компонентами структури та перенесенням імпульсу, теплопередачею, масопереносом та хімічними процесами. Показано, що передові комп'ютерні технології дозволяють вирішити складні проблеми взаємопов'язаного тепломасоперенесення та масштабування процесів, що необхідно для проектування обладнання.

Авторами [7] аналітично досліджено процес сушіння анізотропного біологічного продукту (батату) на основі моделі, що включає рівняння тепломасопереносу Ликова в наближеннях кінцевих елементів. Модель використовувалася визначення коефіцієнтів тепло- і масообміну, коефіцієнта дифузії маси нормальних і паралельних волокон зразків батата. Визначено значення коефіцієнта дифузії $4,8 \cdot 10^{-6} \text{ м}^2/\text{с}$ та коефіцієнта конвективного масопереносу $1,8 \cdot 10^{-8} \text{ кг}/(\text{м}^2 \cdot \text{с} \cdot \text{Па})$. Чисельне моделювання показало гарне узгодження з експериментальними значеннями.

Процес сушіння для кладочних глин аналізується в [8] на основі експериментальних даних. Для розрахунку ефективного коефіцієнта дифузії використовувалися аналітичне рішення рівняння Кранка та аналітичне рішення рівняння Єфремова з граничними умовами. На відміну від інших матеріалів, керамічна плитка дає усадку в процесі висихання. З цієї причини поправка на усадку включена в обидва методи розрахунку. Результати розрахунку дають прийнятні результати, що лежать у діапазоні $10^{-7} \dots 10^{-12} \text{ м}^2/\text{с}$, порівняні зі значеннями в інших дослідженнях [9-11].

Аналітичні залежності для розрахунку коефіцієнтів масопереносу не відображають всього різноманіття факторів, що впливають на переміщення вологи в тілі. В них розглядаються ідеалізовані структури, враховуються лише деякі з наявних механізмів перенесення, до них застосовується гіпотеза адитивності без урахування взаємного впливу. Ці залежності містять ряд величин, відомості про які вкрай обмежені або відсутні (наприклад, функція розподілу пір). Тому такі формули використовуються в більшості випадків не для розрахунків коефіцієнтів перенесення, а лише для якісної оцінки їхньої залежності від температури, тиску, властивостей компонентів. У зв'язку з цим першорядне значення набувають експериментальні методи визначення цих коефі-

цієнтів. Відомості про коефіцієнти тепло- і вологопереносу в кінетичних режимах сушіння в літературі наведено лише для обмеженого кола неорганічних і органічних дисперсних матеріалів.

Метою роботи є відпрацювання методики для отримання коефіцієнтів теплоагоперенесення при кондуктивному нагріванні щільного шару дисперсних матеріалів.

3. Методика отримання даних за ефективними коефіцієнтами перенесення для щільних шарів дисперсних матеріалів

Основою запропонованої методики є підхід, наведений у [12] для кондуктивної та кондуктивно-конвективної сушки плоских та циліндричних зразків. Теоретичною основою методики є система диференціальних рівнянь взаємопов'язаного волого- та теплотеренесення в капілярно-пористих тілах у процесах сушіння О.В. Ликова [1] з граничними умовами, що відповідають кондуктивній та комбінованій сушці. Щільний шар дисперсного матеріалу розглядається як квазігомогенне середовище з ефективними коефіцієнтами перенесення. За відсутності фільтраційного перенесення система включає диференціальні рівняння перенесення вологи та теплоти, які для одновимірного процесу мають вигляд (для плоского зразка):

$$\frac{\partial u}{\partial \tau} = \frac{\partial}{\partial x} \left(a_m \frac{\partial u}{\partial x} + a_m \delta \frac{\partial t}{\partial x} \right) \quad (1)$$

$$\rho c \frac{\partial t}{\partial \tau} = \frac{\partial}{\partial x} \left(\lambda \frac{\partial t}{\partial x} \right) + \rho \varepsilon \cdot r \frac{\partial u}{\partial \tau} \quad (2)$$

Граничні умови на гріючій масонепроникній поверхні ($x = 0$):

$$t = t_{cm}(\tau); \quad \frac{\partial u}{\partial x} + \delta \frac{\partial t}{\partial x} = 0 \quad (3)$$

на вільній поверхні ($x = 1$):

$$-\lambda \left(\frac{\partial t}{\partial x} \right) = \alpha(t_n - t_e) + (1 - \varepsilon_n^*) r \cdot \beta^*(u_n - u_e) \quad (4)$$

$$-\rho \left[a_m \left(\frac{\partial u}{\partial x} + \delta \frac{\partial t}{\partial x} \right) \right] = \beta^*(u_n - u_e) \quad (5)$$

Тут a_m – коефіцієнт дифузії вологи в шарі, $\text{м}^2/\text{с}$; λ – ефективний коефіцієнт теплопровідності

шару, Вт/(м·К); ε^* – коефіцієнт сушіння (критерій фазового перетворення); β^* – коефіцієнт масовіддачі, віднесений до різниці вологовмістів, кг/(с·м²).

Граничні умови відповідають кондуктивному (від поверхні, що гріє) і комбінованому кондуктивно-конвективному (від поверхні, що гріє, і сушильного агента, що омиває вільну поверхню зразка) способам підведення теплоти.

Після ряду перетворень із системи рівнянь отримані наступні залежності для коефіцієнтів теплопровідності, дифузії вологи та відносного коефіцієнта термодифузії [12]:

$$\lambda = \frac{\rho \cdot l^2}{(K_{ni} - K_{cmi})} \left(c \frac{d\bar{t}}{d\tau} - r \frac{d\bar{u}}{d\tau} \right) \quad (6)$$

$$a_m = \frac{l^2 \left[\left(\frac{d\bar{u}}{d\tau} \right)_I \Delta t_{iI} - \left(\frac{d\bar{u}}{d\tau} \right)_{II} \Delta t_{iII} \right]}{K_m \bar{u}_{I,II} (\Delta t_{iII} - \Delta t_{iI})} \quad (7)$$

$$\delta = \frac{K_m \bar{u}_{I,II} \left[\left(\frac{d\bar{u}}{d\tau} \right)_I - \left(\frac{d\bar{u}}{d\tau} \right)_{II} \right]}{K_{ni} \left[\left(\frac{d\bar{u}}{d\tau} \right)_{II} \Delta t_{iI} - \left(\frac{d\bar{u}}{d\tau} \right)_I \Delta t_{iII} \right]} \quad (8)$$

У формулах (6)-(8): u, t – середні за висотою вміст вологи і температура шару; Δt_i – характерний перепад температур; K_{ni}, K_{cmi} – безрозмірні коефіцієнти; l – висота шару; I, II – номери парних дослідів.

Коефіцієнт K_m залежить від закону розподілу вмісту вологи в шарі, K_{ni}, K_{cmi} – від розподілу температур та того, який перепад температур Δt_i обраний як характерний.

Як видно з формули (6) коефіцієнт теплопровідності може бути визначений за даними кожного з парних дослідів.

Для обґрунтованого визначення K_m, K_{ni} необхідно в попередніх дослідях визначити поля потенціалів за різних режимних умов та способів теплопідведення.

За експериментальними значеннями a_m, δ може бути розрахований коефіцієнт термодифузії вологи:

$$a_m^T = a_m \delta, \quad (9)$$

а за наявності відомостей про масомісткість – також коефіцієнт вологопровідності:

$$\lambda_m = \rho \cdot c_m a_m. \quad (10)$$

Ефективні коефіцієнти враховують сумарне перенесення рідкої та пароподібної вологи.

4. Експериментальна установка та алгоритм обробки експериментальних даних

Для реалізації методики розроблено експериментальні установки, що дозволяють із двох парних дослідів знаходити λ, a_m, δ та їхні залежності від температури та вологовмісту при кондуктивному, конвективному та кондуктивно-конвективному сушінні щільного шару дисперсних матеріалів при різних режимних параметрах (температурах гріючої поверхні, температурах і вологостях сушильного агента, початкових вологовмістах зразка) [13]. З цих же дослідів отримують відомості про кінетику сушіння.

Схема однієї з таких установок представлена на рис. 1. Вона містить розізмкнену аеродинамічну трубу, в робочій ділянці якої встановлюється вимірювальна касета з досліджуванним матеріалом. Касета має електронагрівач, потужність якого може регулюватися. Для створення одномірних полів вологовмістів та температур у шарі бічні поверхні касети виконані з вологонепроникного матеріалу та теплоізовані.

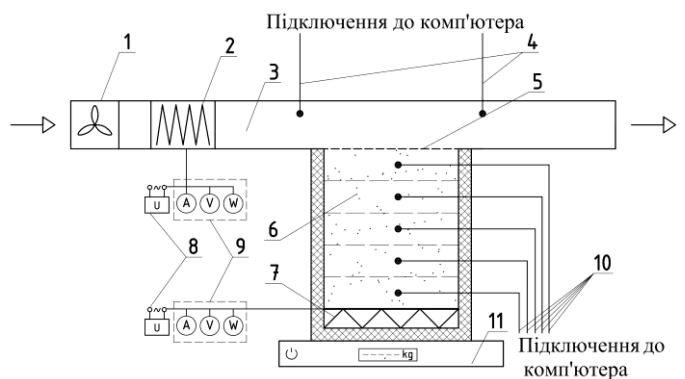


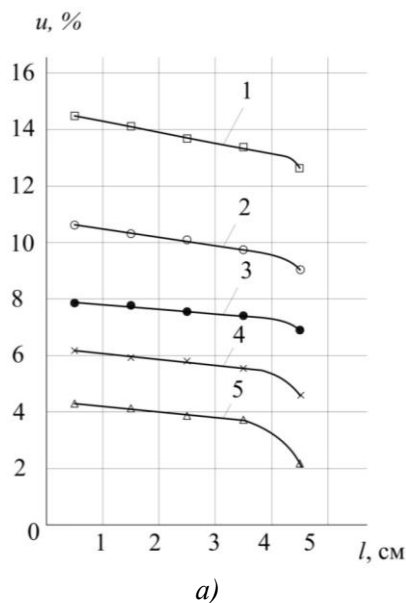
Рисунок 1 – Схема експериментальної установки визначення коефіцієнтів перенесення теплоти і вологи в дисперсних матеріалах: 1 – вентилятор; 2 – калорифер; 3 – робоча ділянка; 4 – термопари для повітроводу; 5 – вологопроникне покриття; 6 – шар з дисперсним матеріалом; 7 – електронагрівач; 8 – регулятор напруги; 9 – вимірювальний комплект (амперметр, вольтметр, ватметр); 10 – термопари; 11 – ваги

Установка забезпечена приладами та пристроями для вимірювання під час дослідів наступних величин: ваги касети, температури поверхні, на якій розміщений досліджуваний матеріал, темпе-

ратури шару в різних перерізах по висоті, на його вільній поверхні та на поверхні, що гріє біля основи, температури та відносної вологості повітря над вільною поверхнею шару, витрати повітря (вимірюється лише при конвективно-кондуктивному сушінні). При кондуктивному сушінні теплота до шару підводиться тільки від електронагрівача касети, циркуляція повітря в трубі відсутня. При комбінованій сушці теплота підводиться і від електронагрівача касети, і від повітря, що продувається над касетою, підігрітого електронагрівачем 2.

Експериментальний осередок є збіркою конструкцією, розділеною на 5 шарів товщиною 1 см. Дно кожного шару 6 являє собою сітчасту поверхню. Конструкція передбачає можливість поетапного вилучення кожного шару. Після вилучення кожного шару проводиться зважування на вагах 11 всіх шарів, що залишилися в експериментальному осередку, і по різниці показань визначається кінцева маса конкретного шару. Термопари встановлюються всередину кожного шару і можуть бути вилучені за необхідності.

Процес сушіння розбивають на невеликі проміжки часу, протягом яких вміст води змінюється незначно ($\Delta u \approx 0,005$ кг/кг). За результатами вимірювань розраховують середні за висотою вміст води і температуру шару, швидкості сушіння і нагріву, характерний перепад температур. Підставляючи ці величини, отримані при однакових поточних вмістах води в зразках в обох дослідках, у формули (6-8), обчислюють λ , a_m , δ , відносячи їх до значень u , t у цьому проміжку



часу. Дані, отримані для різних проміжків часу, дозволяють визначити зміну коефіцієнтів перенесення в процесі сушіння, яке обумовлене зміною вмісту води і температури шару.

Режимні умови парних дослідів слід вибирати так, щоб параметри, від яких суттєво залежать коефіцієнти перенесення, відрізнялися незначно. Для досліджених умов таким параметром є температура.

На установці (рис. 1) були отримані дані щодо розподілу вмісту води і температури в шарі цеоліту, фото якого представлено на рис. 2, що необхідно для вивчення їх впливу на коефіцієнти теплоперенесення в кінетичних режимах сушіння. Особливістю кінетичних режимів сушіння є взаємозалежна зміна вологовмісту і температури, яка і визначає зміну коефіцієнтів перенесення.



Рисунок 2 – Фото цеоліту 13X кульки

Зміна вологовмісту і температури в шарі цеоліту представлені на рис. 3.

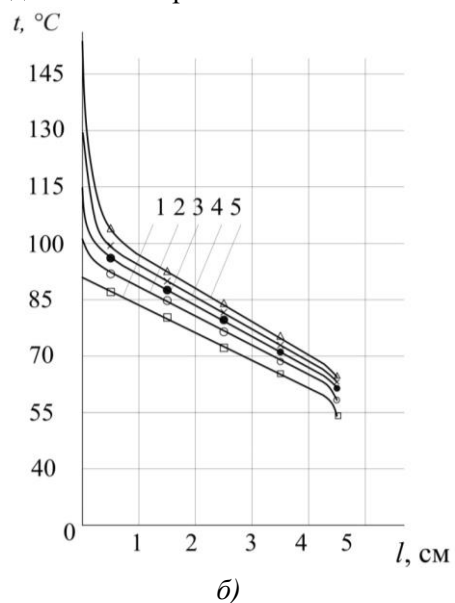


Рисунок 3 – Розподіли вмісту води (а) і температур (б) у зразку цеоліту ($\rho = 682$ кг/м³, $d = 2,2$ мм) при кондуктивному сушінні: 1 – хв; 2 – хв; 3 – хв; 4 – хв; 5 – хв.

Для шару цеоліту товщиною 5 см (рис. 3) профілі вологовмістів близькі до лінійних крім ділянки біля вільної поверхні, профілі температур демонструють лінійний характер лише для внутрішніх шарів. Результати експериментів, проведених при різних вологовмістах і температурах для дисперсних матеріалів, дозволяють встановити вплив зазначених факторів на ефективні коефіцієнти переносу.

5. Висновки

Представлена методика отримання даних за ефективними коефіцієнтами перенесення для щільних шарів дисперсних матеріалів у наближенні плоского зразка: площа теплопідведення та тепловідведення постійні, бічна поверхня теплоізована. Зміни температур і вмісту вологи враховується тільки за висотою експериментального осередку.

Досліджено кінетичні режими сушіння, що характеризуються взаємопов'язаною зміною вологовмісту та температури, які визначають зміну коефіцієнтів перенесення.

Отримано дані щодо розподілу вологовмісту і температури в шарі цеоліту товщиною 5 см при часі сушіння від 60 до 180 хв з інтервалом 30 хв.

Профілі вологовмісту близькі до лінійних за винятком ділянки біля вільної поверхні, профілі температур демонструють лінійний характер тільки для внутрішніх шарів. Дані щодо розподілу вологовмісту і температури необхідні для визначення коефіцієнтів теплоперенесення в процесі сушіння.

Особистий внесок авторів CRediT

Бошкова І.Л.: методичне забезпечення, планування експерименту; **Волгушева Н.В.:** створення методологічних основ роботи, експериментальні дослідження; **Гречановський А. П.:** експериментальні дослідження, узагальнення експериментальних даних; **Нікітін Д.М.:** алгоритм обробки експериментальних даних, інформаційний пошук; **Тортіка Д. М.:** аналітичний огляд літературних даних, обробка результатів експерименту.

Література

1. **Lykov A. V.** Theory of heat and mass transfer. – Jerusalem: Israel Program for Scientific Translations, 1965. – 558 p.
2. **X. Li et al.** Numerical study of heat and mass transfer during drying process of barley grain piles based on the pore scale // *Journal of Food Process Engineering.* – 2023. – Vol. 46, Is. 11. – e14433. doi: <https://doi.org/10.1111/jfpe.14433>
3. **Ramzy A., El Awady W. M., AbdelMeguid H.** Modelling of heat and moisture transfer in desiccant packed bed utilizing spherical particles of clay impregnated with CaCl₂ // *Applied Thermal Engineering.* – 2014. – Vol. 66, No. 1-2. – P. 499-506. doi: <https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2014.02.031>
4. **Liu B. C., Liu W., Peng S. W.** Study of heat and moisture transfer in soil with a dry surface layer // *International Journal of Heat and Mass Transfer.* – 2005. – Vol. 48, No. 21-22. – P. 4579-4589. doi: <https://doi.org/10.1016/j.ijheatmasstransfer.2005.06.004>
5. **S. Matthes et al.** Influence of counterdiffusion effects on mass transfer coefficients in stirred tank reactors // *Chemical Engineering Journal Advances.* – 2021. – Vol. 8. – P. 100180. doi: <https://doi.org/10.1016/j.ceja.2021.100180>
6. **Li H.** Important relationship between meso-scale structure and transfer coefficients in fluidized beds. *Particology.* – 2010. – Vol. 8, No. 6. – P. 631-633. doi: <https://doi.org/10.1016/j.partic.2010.07.018>
7. **Abalone R., Gastón A., Lara M. A.** Determination of mass diffusivity coefficient of sweet potato // *Drying Technology.* – 2000. – Vol. 18, No. 10. – P. 2273-2290. doi: <https://doi.org/10.1080/07373930008917842>
8. **Vasić M., Grbavčić Ž., Radojević Z.** Determination of the moisture diffusivity coefficient and mathematical modeling of drying // *Chemical Engineering and Processing: Process Intensification.* – 2014. – Vol. 76. – P. 33-44. doi: <https://doi.org/10.1016/j.ccep.2013.12.003>
9. **Telljohann U., Junge K., Specht E.** Moisture Diffusion Coefficients for Modeling the First and Second Drying Sections of Green Bricks. *Drying Technology.* – 2008. – Vol. 26, No. 7. – P. 855-863. doi: <https://doi.org/10.1080/07373930802136053>
10. **Sander A., Skansi D., Bolf N.** Heat and mass transfer models in convection drying of clay slabs // *Ceramics International.* – 2003. – Vol. 29, No. 6. – P. 641-653. doi: [https://doi.org/10.1016/s0272-8842\(02\)00212-2](https://doi.org/10.1016/s0272-8842(02)00212-2)
11. **W. P. da Silva et al.** Determination of effective diffusivity and convective mass transfer coefficient for cylindrical solids via analytical solution and inverse method: Application to the drying of rough rice // *Journal of Food Engineering.* – 2010. – Vol. 98,

No. 3. – P. 302-308. doi: <https://doi.org/10.1016/j.jfoodeng.2009.12.029>

12. **Рева Н.В.** Розробка методики та дослідження коефіцієнтів масо- та теплоперенесення капілярно-пористих матеріалів у процесі сушіння. Дис. канд.

техн. наук. – Одеса, 1982. – 220 с.

13. **Бу З. Т.** Тепловологоперенесення у дисперсних матеріалах при кондуктивному сушінні: автореф. дис. канд. техн. наук. – Одеса, 1992. – 17 с.

Отримана в редакції 14.10.2024, прийнята до друку 28.11.2024

Methodological bases for determining heat and moisture transfer coefficients in dispersed materials

Iryna Boshkova¹, **Natalya Volgusheva²**, **Andrii Hrechanovskiy³**, **Dmitry Nikitin⁴**, **Dmitry Tortika⁵**

¹⁻⁵Odesa National University of Technology, 112 Kanatnaya Str., Odessa, 65039, Ukraine;

✉ e-mail: ¹boshkova.irina@gmail.com

ORCID: ¹<http://orcid.org/0009-0009-5599-2709>; ²<http://orcid.org/0000-0002-9984-6502>; ³<http://orcid.org/0000-0002-8257-5769>; ⁴<http://orcid.org/0009-0000-9144-1810>; ⁵<https://orcid.org/0009-0003-2777-8955>

The investigation of moisture and heat transfer coefficients in various materials is an important stage in the study of drying processes. Data on these coefficients are necessary for conducting calculations based on analytical relationships describing moisture content and temperature distributions, as well as moisture and heat fluxes in the material. Numerous studies demonstrate that accurate knowledge of mass transfer coefficients in dispersed systems is crucial for successful design and for improving the energy efficiency of industrial equipment. Data on heat and mass transfer coefficients for a range of materials are presented, along with a comparison of various analytical equations used to determine the effective diffusion coefficient. It is noted that analytical relationships for calculating mass transfer coefficients do not capture the full spectrum of factors influencing moisture transport within a material, as they typically consider idealized structures that account for only some of the existing transport mechanisms. Therefore, in most cases, these analytical dependencies are used not for the direct calculation of transfer coefficients, but rather for a qualitative assessment of their dependence on temperature, pressure, and component properties. Hence, experimental methods of determining these coefficients acquire primary importance. This work describes a methodology for obtaining data on effective transfer coefficients for dense layers of dispersed materials. The theoretical basis of this methodology is a system of differential equations for coupled moisture and heat transfer in capillary-porous bodies during drying processes, as formulated by A.V. Lykov. A dense layer of dispersed material is treated as a quasi-homogeneous medium with effective transfer coefficients. An experimental unit and an algorithm for processing the obtained experimental data are presented. The resulting moisture content and temperature distributions in a dense layer of zeolite are reported for the conductive drying process.

Keywords: Drying; Experimental unit; Zeolite; Temperature; Moisture content; Conductive heating; Dense layer

References

1. **Lykov, A. V.** (1965) Theory of heat and mass transfer. Jerusalem: Israel Program for Scientific Translations, 558.
2. **Li, X. et al.** (2023) Numerical study of heat and mass transfer during drying process of barley grain piles based on the pore scale. *Journal of Food Process Engineering*, 46, 11, e14433.
3. **Ramzy, A., El Awady, W. M., AbdelMeguid, H.** (2014). Modelling of heat and moisture transfer in

desiccant packed bed utilizing spherical particles of clay impregnated with CaCl₂. *Applied Thermal Engineering*, 66, 1-2, 499-506.

4. **Liu, B. C., Liu, W., Peng, S. W.** (2005). Study of heat and moisture transfer in soil with a dry surface layer. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 48, 21-22, 4579-4589.

5. **Matthes, S. et al.** (2021) Influence of counterdiffusion effects on mass transfer coefficients in stirred tank reactors. *Chemical Engineering Journal Advances*, 8, 100180.

6. **Li, H.** (2010) Important relationship between meso-scale structure and transfer coefficients in fluidized beds. *Particuology*, 8, 6, 631-633.
7. **Abalone, R., Gastón, A., Lara, M. A.** (2000) Determination of mass diffusivity coefficient of sweet potato. *Drying Technology*, 18, 10, 2273-2290.
8. **Vasić, M., Grbavčić, Ž., Radojević, Z.** (2014) Determination of the moisture diffusivity coefficient and mathematical modeling of drying. *Chemical Engineering and Processing: Process Intensification*, 76, 33-44.
9. **Telljohann, U., Junge, K., Specht, E.** (2008). Moisture Diffusion Coefficients for Modeling the First and Second Drying Sections of Green Bricks. *Drying Technology*, 26, 7, 855-863.
10. **Sander, A., Skansi, D., Bolf, N.** (2003). Heat and mass transfer models in convection drying of clay slabs. *Ceramics International*, 29, 6, 641-653.
11. **da Silva, W. P. et al.** (2010) Determination of effective diffusivity and convective mass transfer coefficient for cylindrical solids via analytical solution and inverse method: Application to the drying of rough rice. *Journal of Food Engineering*, 98, 3, 302-308.
12. **Reva, N.V.** (1982), Development of the methodology and investigation of coefficients of heat transfer of capillary-porous materials during the drying process. dis. Ph.D. tech. sciences, *Odessa*, 220.
13. **Wu, Z. T.** (1992). Heat transfer in dispersed materials during conductive drying: abstract. dis. cand. tech. sci. *Odessa*, 17.

Received 14 October 2024

Approved 28 November 2024

Available in Internet 30 December 2024