

УДК 66.047.4

**МОДЕЛЮВАННЯ ВНУТРІШНЬОДИФУЗІЙНОГО МАСОПЕРЕНОСЕННЯ
ПІД ЧАС ФІЛЬТРАЦІЙНОГО СУШІННЯ КАПІЛЯРНО ПОРИСТИХ ТІЛ**

Матківська І.Я., Атаманюк В.М., Гнатів З.Я., Данилюк О.М.

**МОДЕЛИРОВАНИЕ ВНУТРЕННЕДИФФУЗИОННОГО МАСОПЕРЕНОСА
ПРИ ФИЛЬТРАЦИОННОЙ СУШКЕ КАПИЛЛЯРНО ПОРИСТЫХ ТЕЛ**

Матківська І.Я., Атаманюк В.М., Гнатів З.Я., Данилюк О.М.

**MODELING OF DIFFUSION MASS TRANSFER DURING FILTRATION DRYING
OF CAPILLARY-POROUS BODIES**

Matkivska I., Atamanyuk V., Hnativ Z., Danyliuk O.

**Національний університет «Львівська політехніка»,
м. Львів, Україна**

iramatkivska@ukr.net

***Анотація.** В роботі представлені теоретичні та експериментальні дослідження з визначення коефіцієнта внутрішньої дифузії вологи із капілярно-пористих тіл під час фільтраційного сушіння. Для знаходження коефіцієнта внутрішньої дифузії використана модель, що базується на розв'язку диференційного рівняння внутрішньої дифузії з відповідними початковими та граничними умовами.*

***Ключові слова:** коефіцієнт внутрішньої дифузії, кінетика сушіння, вологовміст, капілярно-пористі тіла*

***Аннотация.** В работе представлены теоретические и экспериментальные исследования по определению коэффициента внутренней диффузии влаги из капиллярно-пористых тел при фильтрационной сушке. Для нахождения коэффициента внутренней диффузии использована модель, базирующаяся на решении дифференциального уравнения внутренней диффузии с соответствующими начальными и граничными условиями.*

***Ключевые слова:** коэффициент внутренней диффузии, кинетика сушки, влагосодержание, капиллярно-пористые тела*

***Abstract.** The work deals with theoretical and experimental investigations concerning coefficient of moisture pore diffusion from capillary-porous bodies during filtration drying. To determine the coefficient of pore diffusion the model was used based on solution of differential equation according to corresponding initial and boundary conditions.*

***Keywords:** coefficient of pore diffusion, drying kinetics, moisture content, capillary-porous bodies*

Сушіння є складним теплофізичним та масообмінним процесом, який широко застосовується на заключних стадіях багатьох технологічних процесів, і від організації якого в значній мірі залежать якість та собівартість готової продукції. Найголовнішим показником економічного розвитку держави є енергоємність валового продукту. Відомо, що 8-10% всієї енергії в світі витрачається на процеси сушіння. А як свідчить статистика, в більшості випадків на процеси сушіння використовується в 2,5 – 3 рази більше енергії, ніж це потрібно для перетворення вологи у пару.

В промисловості широко використовуються установки конвективного сушіння, проте аналіз найбільш поширених технологій конвективного сушіння [1] показує, що сушильне устаткування щодо енергозбереження, екологічних регламентів, безпеки продукту не зовсім відповідають сучасним вимогам. Тому нами пропонується фільтраційне сушіння (ФС), яке є одним із високо-інтенсивних, низькотемпературних та екологічно безпечних методів [2,3,4].

Як відомо, під час сушіння найважче видалити внутрішню вологу, тому що у внутрішньому масоперенесенні бере участь близько п'ятнадцяти різних видів перенесення маси і теплоти [5]. Тому дослідження внутрішньодифузійного масоперенесення під час фільтраційного сушіння дисперсних матеріалів є актуальною задачею.

Метою роботи є дослідження внутрішньодифузійного масоперенесення під час сушіння дисперсного матеріалу кулястої та циліндричної форми.

Об'єктом дослідження обрано зерно пшениці, що відноситься до частинок циліндричної форми, та сирцеві гранули шлакового гравію – до частинок кулястої форми.

Коефіцієнт внутрішнього масоперенесення вологи є функцією двох параметрів: градієнта вологи та градієнта температури [6]. За однакових умов різниці внутрішнього вологовмісту температурний фактор буде вирішальним під час визначення коефіцієнту внутрішньої дифузії D_w . Метод визначення коефіцієнта внутрішньої дифузії D_w базується на математичному розв'язку диференційного рівняння внутрішньої дифузії. Для опису процесу дифузії вологи у шарі матеріалу приймаємо наступні допущення:

- кожна частинка у шарі рівномірно омивається тепловим агентом;
- значення вологовмісту на поверхні частинки відповідають значенням вологовмісту у тепловому агенті;
- початкова волога рівномірно розподілена по всьому об'єму частинки.

Для частинок циліндричної форми скінченних розмірів, враховуючи вище наведені допущення задачу звели до граничних умов першого роду, коли вологовміст є функцією трьох змінних (часу τ , радіусу r і координати z), і рівняння дифузії представили у вигляді [7]:

$$\frac{\partial w^c}{\partial \tau} = D_w \cdot \left(\frac{\partial^2 w^c}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \cdot \frac{\partial w^c}{\partial r} + \frac{\partial^2 w^c}{\partial z^2} \right). \quad (1)$$

З відповідними крайовими умовами:

$$\begin{cases} w^c(r, z, 0) = w_n^c \\ w^c(r, \pm \ell, \tau) = w_p^c, \quad w^c(R, z, \tau) = w_p^c \end{cases}, \quad (2)$$

де D_w – коефіцієнт внутрішньої дифузії, м²/с; r , R – радіуси біжучий і частинки відповідно, м; ℓ – довжина частинки циліндричної форми, м; w^c , w_p^c , w_n^c – біжучий, рівноважний та початковий вологовміст дисперсного матеріалу відповідно, кг Н₂О/кг сух. матер.

Розв'язок рівняння (1) з крайовими умовами (2), враховуючи подібність теплових та масообмінних процесів буде мати вигляд [7]:

$$\frac{w_n^c - w_p}{w_n^c - w_p} = \sum_{n=1}^{\infty} \sum_{m=1}^{\infty} B_n \cdot B_m \cdot \exp\left[-\left(\mu_n^2 + \mu_m^2 \cdot K_l^2\right) \cdot Fo\right], \quad (3)$$

де $B_n = 4/\mu_n^2$, $B_m = 2/\mu_m^2$.

Для спрощення розрахунків виділивши регулярний режим скористаємося лише першими коренями характеристичного рівняння. Прологарифмувавши залежність (3) з вказаними спрощеннями, її можна представити у вигляді графічної залежності

$A = f(\tau)$, де $A = \frac{\ln(\Delta w^c / (B_n \cdot B_m))}{\mu_n^2 + \mu_m^2 \cdot K_l^2}$. На рис. 1 представлена залежність величини A

від часу фільтраційного сушіння зерна пшениці за різних температур теплового агента.

Аналізуючи рис. 1 видно, що експериментальні дані можна апроксимувати прямою лінією і за тангенсом кута нахилу прямої до осі абсцис можна визначити коефіцієнт внутрішньої дифузії D_w , тобто:

$$D_w = \operatorname{tg} \alpha \cdot R^2 \quad (4)$$

На рис. 2 наведені значення коефіцієнтів внутрішньої дифузії D_w шару зерна пшениці за різних температур теплового агента. З рис. 2 бачимо, що з ростом температури теплового агента значення коефіцієнту внутрішньої дифузії D_w шару зерна пшениці в навколишнє середовище зростає, що не суперечить фізичній суті процесу. Щоб отримані експериментальні дані можна було використовувати на практиці для інших температур, на рис. 2 наведені експериментально визначені значення коефіцієнтів дифузії залежно від температури апроксимовані степеневою залежністю. Тоді розрахункову залежність для визначення коефіцієнту внутрішньої дифузії можна представити у вигляді:

$$D_w^t = D_w^{293} + 0,39 \cdot 10^{-12} \cdot (T - 293)^2 \quad (5)$$

Отримане рівняння (5) можна використовувати для знаходження коефіцієнту внутрішньодифузійного масоперенесення під час фільтраційного сушіння зерна пшениці.

Для частинок кулястої форми, враховуючи вище згадані допущення, диференційне рівняння внутрішньої дифузії має вигляд [7]:

$$\frac{\partial w^c}{\partial \tau} = D_w \cdot \left(\frac{\partial^2 w^c}{\partial r^2} + \frac{2}{r} \cdot \frac{\partial w^c}{\partial r} \right). \quad (6)$$

Задачу звели до граничних умов першого роду, а рівняння (6) доповнюємо граничними умовами:

$$\begin{cases} w^c(r, \tau = 0) = w_n^c, & w^c(r = R, \tau) = w_p^c, \\ \left(\frac{\partial w^c}{\partial r} \right)_{r=0} = 0 \end{cases}, \quad (7)$$

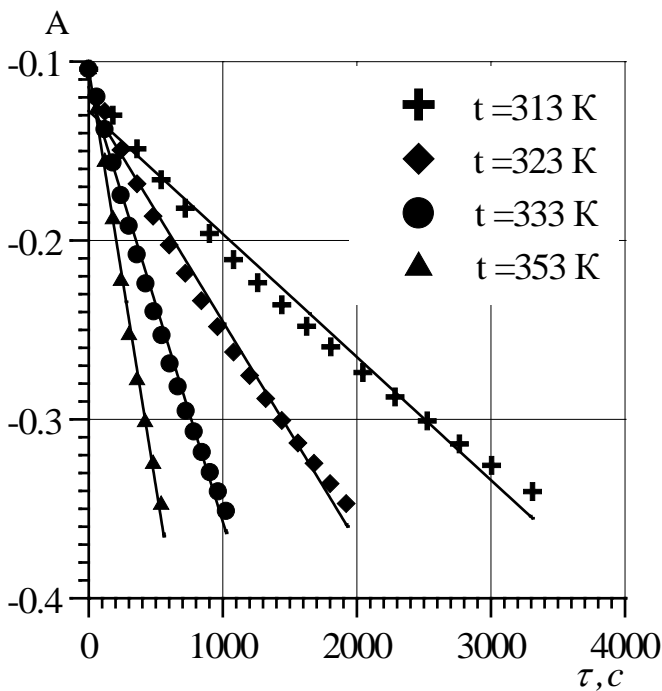


Рис. 1. Залежність величини А від часу фільтраційного сушіння зерна пшениці за різних температур теплового агента

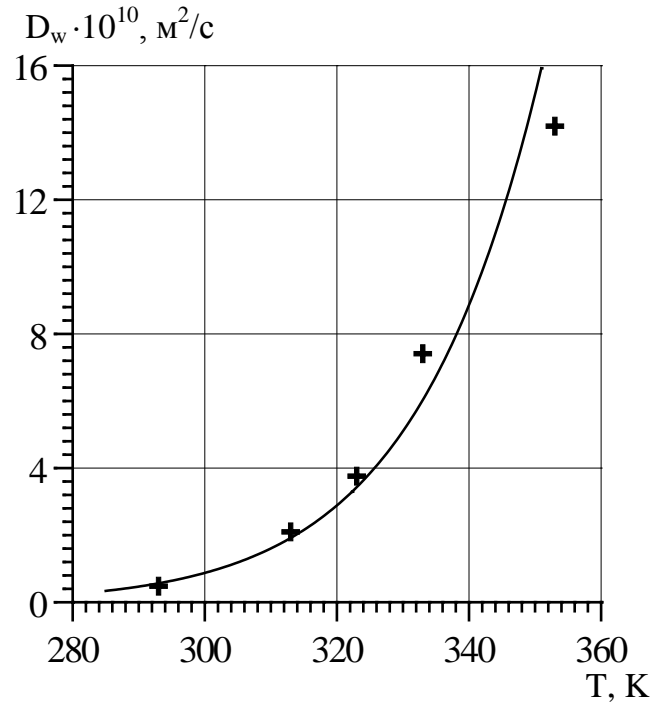


Рис. 2. Залежність коефіцієнту внутрішньої дифузії від температури теплового агента

Розв'язок системи (6), (7) можна представити у вигляді:

$$\frac{\bar{w}^c - w_p}{w_n^c - w_p} = \sum_{n=1}^{\infty} B_n \cdot e^{-\mu_n^2 \cdot Fo} = \sum_{n=1}^{\infty} \frac{6}{\pi^2 \cdot n^2} \cdot e^{-\frac{\pi^2 \cdot n^2 \cdot D_w^* \cdot \tau}{R^2}} \quad (9)$$

За великих чисел Fo (великі значення τ) членами суми $n > 1$ можна знехтувати, а розв'язок (9) з першим членом після логарифмування буде мати вигляд:

$$-\ln\left(\frac{\bar{w}^c - w_p}{w_n^c - w_p}\right) = \ln \frac{6}{\pi^2} - \pi^2 \cdot \frac{D_w^* \cdot \tau}{R^2} \quad (10)$$

На рис. 3 наведено графічну залежність $\ln\left[\frac{\bar{w}^c - w_p}{w_n^c - w_p}\right]$ від τ для сирцевих гранул шлакового гравію. Як бачимо з рис.3 графічна залежність $\ln\left[\frac{\bar{w}^c - w_p}{w_n^c - w_p}\right] = f(\tau)$ для частинок круглястої форми також має лінійний характер і коефіцієнт внутрішньої дифузії аналогічно можна визначити за рівнянням (4). На рис.4 наведено значення коефіцієнту внутрішньої дифузії вологи з сирцевої гранули за різних температур.

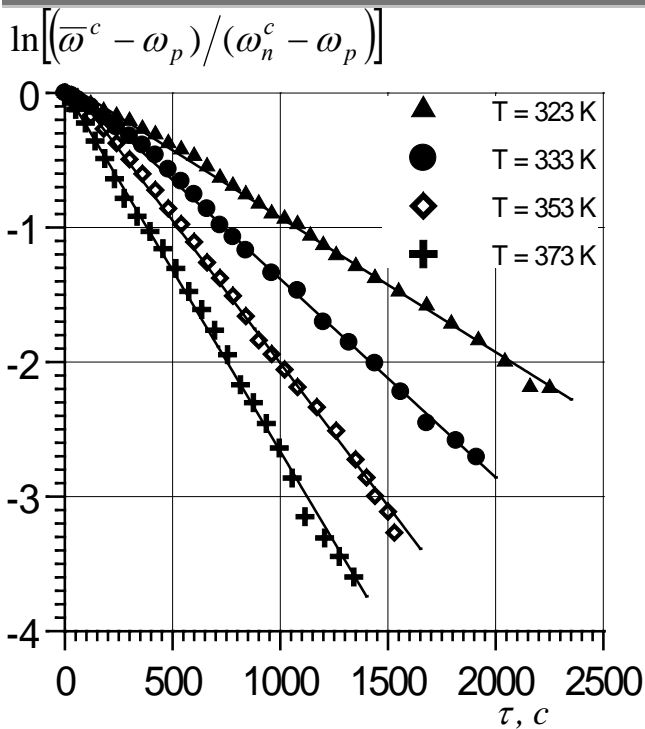


Рис. 3. Залежність

$\ln\left[\frac{\bar{\omega}^c - \omega_p}{(\omega_n^c - \omega_p)}\right]$ від часу сушіння сирцевої гранули

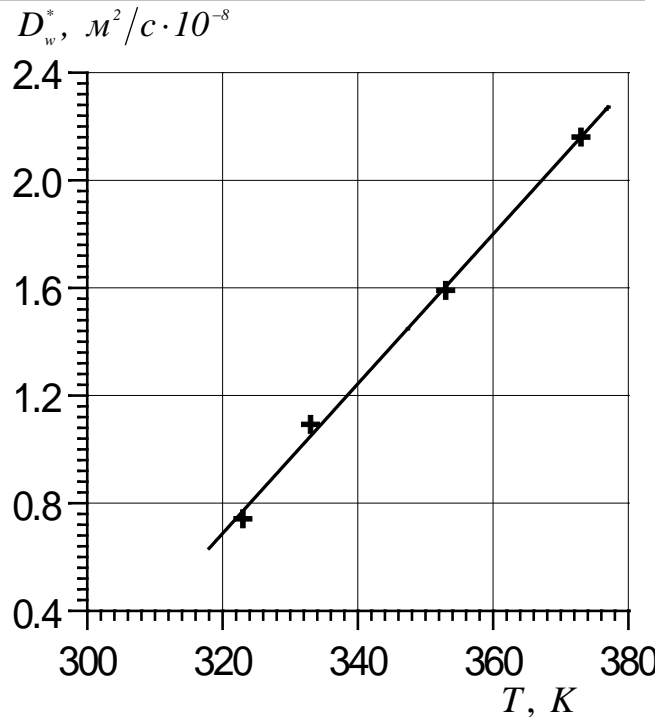


Рис. 4. Залежність коефіцієнту внутрішньої дифузії від температури для сирцевої гранули

З рис.4 бачимо, що з ростом температури теплового агента значення коефіцієнту внутрішньої дифузії D_w^* вологи з сирцевої гранули шлакового гравію в навколишнє середовище зростає лінійно, тому її можна апроксимувати наступною залежністю:

$$D_w^t = D_w^{293} + 2,5 \cdot 10^{-10} \cdot (T - 293). \quad (11)$$

Отримане рівняння (11) можна використовувати для знаходження коефіцієнту внутрішньодифузійного масоперенесення під час фільтраційного сушіння сирцевої гранули шлакового гравію.

Висновки

Математично описано процес внутрішньодифузійного масоперенесення під час сушіння дисперсного матеріалу. на основі диференціального рівняння внутрішньої дифузії (1), (6). Досліджено залежність коефіцієнта внутрішньої дифузії від температури. Отримано розрахункові залежності (5), (11) для визначення коефіцієнту внутрішньої дифузії вологи для частинок циліндричної та кулястої форми відповідно. Розраховані значення коефіцієнту внутрішньої дифузії зерна пшениці під час фільтраційного сушіння за залежністю (5) та сирцевих гранул шлакового гравію (11) добре узгоджується із експериментально визначеними значеннями, а максимальна відносна похибка не перевищує 12,1% та 8 % відповідно.

Література

1. *Бурдо О.Г.* Электромагнитные технологии обезвоживания сырья / Бурдо О.Г., Терзиев С.Г., Яровой И.И., Борщ А.А. // Problemele Energeticii Regionale 1(18), 2012. – С. 36-41.
2. *Атаманюк В.М.* Наукові основи фільтраційного сушіння дисперсних матеріалів: монографія / В.М. Атаманюк, Я.М. Гумницький. // Львів: Видавництво Львівської політехніки, 2013. – 276 с.
3. *Кіндзера Д.П.* Сушіння паливних матеріалів різнодисперсного складу у щільному шарі: Автореф. дис. на здобуття ступеня канд. техн. наук: 05.17.08 / Діана Петрівна Кіндзера. – Львів, 2003. – 20с.
4. *Барна І.Р.* Гідродинаміка і тепломасообмін під час фільтраційного сушіння сировинних матеріалів шлакового гравію: дис. ... канд. техн. наук: 05.17.08 / Ірина Романівна Барна. – Львів, 2013. – 161 с.
5. *Фролов В.Ф.* Макрокинетический анализ сушки дисперсных материалов / В.Ф. Фролов // Современные энергосберегающие тепловые технологии (сушка и термовлажностная обработка материалов): I Междунар. научно-практическая конференция, 25-31 мая 2002 г.: тезисы докл. – Москва, 2002. – Т. 2, – С. 7 – 17.
6. *Atamanjuk V., Gumnitsky Ya.* Mass exchange dynamics during second filtration drying period Chemistry & Chemical Technology // Lviv: Vol. 3, No 2, 2009. – P.129-137.
7. *Лыков А.В.* Теория теплопроводности / А.В. Лыков. // М.: Высшая школа, 1967. – 600 с.

УДК 66.041: 666.902

**USING CFD-MODELING FOR SIMULATION OF LIMESTONE
CALCINATION PROCESS IN THE INDUSTRIAL CYCLONE-CALCINER
FURNACE**

Havryliv R., Maistruk V., Filias S.

**ВИКОРИСТАННЯ МЕТОДУ CFD ДЛЯ МОДЕЛЮВАННЯ ПРОЦЕСУ
ДЕКАРБОНІЗАЦІЇ ВАПНЯКУ В ПРОМИСЛОВІЙ ЦИКЛОННІЙ ПЕЧІ-
ДЕКАРБОНІЗАТОРІ**

Гаврилів Р.І., Майструк В.В., Філяс С.Р.

**ИСПОЛЬЗОВАНИЕ МЕТОДА CFD ДЛЯ МОДЕЛИРОВАНИЯ ПРОЦЕССА
ДЕКАРБОНИЗАЦИИ ИЗВЕСТНЯКА В ПРОМЫШЛЕННОЙ ЦИКЛОННОЙ
ПЕЧИ-ДЕКАРБОНИЗАТОРЕ**

Гаврылив Р.И., Майструк В.В., Филяс С.Р.

**Lviv Polytechnic National University, Lviv, Ukraine,
Національний університет «Львівська політехніка», Львів, Україна
romanhavriliv@gmail.com
vmaistruk@gmail.com**