

АНАЛІЗ РЕЗУЛЬТАТІВ ДОСЛІДЖЕННЯ ПРОЦЕСУ СУШІННЯ ЦЕОЛІТУ

Марчевський В. М., Новохат О. А., Маргарян А. А.

1. Вступ

Цеоліт – поширений матеріал, що використовується в аграрному секторі, харчовій, хімічній та нафтопереробній промисловостях, медицині, будівництві тощо [1]. І перспективи використання цеоліту, зокрема в харчовій галузі, сприятливі [2]. Цеоліт можна віднести до групи капілярно-пористих мінеральних матеріалів. Проте невідомо, чи характерні кінетичні закономірності сушіння цеоліту радіаційним способом типовим кривим сушіння капілярно-пористих тіл. Адже в літературі, зазвичай, описується конвективний та контактний способи сушіння цеоліту [3]. Хоча можна зустріти й відносно нестандартні способи сушіння цеоліту, наприклад, із застосуванням мікрохвильової енергії [4]. Математичні моделі процесу сушіння сорбентів вище наведеними способами сушіння, в тому числі цеоліту, в літературі наявні [5–7]. Також можна знайти опис процесів сушіння різних матеріалів в сушарках з використанням сорбентів [8–10]. Проте відсутні кінетичні закономірності сушіння цеоліту із застосуванням енергії інфрачервоного випромінювання (радіаційний спосіб сушіння) та рекомендації щодо цього процесу. Отже, *об'єктом дослідження* є процес сушіння цеоліту радіаційним способом. А *метою дослідження* є визначення кінетичних закономірностей процесу сушіння цеоліту радіаційним способом.

2. Методика проведення досліджень

Експериментальні дослідження процесу сушіння цеоліту виконані на комп'ютеризованій установці [11]. Вона дає змогу безперервно вимірювати під час процесу сушіння зміну маси зразка. Результати вимірювань з частотою 3 Гц передались на комп'ютер для реєстрації та подальшої обробки. За джерело теплової енергії використано електричний інфрачервоний випромінювач керамічного типу з номінальною електричною потужністю 1 кВт. Для зменшення теплових втрат від випромінювача в навколишнє середовище над випромінювачем встановлено рефлектор.

Для дослідження використано зразки зволоженого цеоліту фракції 0–1 мм з початковим вологовмістом близько 30 %. Частинки цеоліту уклалися щільним шаром висотою 1 мм на металеву підкладку, встановлену на електронні ваги під робочою поверхнею інфрачервоного випромінювача.

3. Результати досліджень та обговорення

Побудовано криві сушіння цеоліту за різної густини теплового потоку q , Вт/м² (рис. 1), форма яких характерна для капілярно-пористих тіл, наприклад, паперу [12]. А сам цеоліт суттєво не впливає на кінетичні закономірності процесу сушіння паперу в якості наповнювача [13].

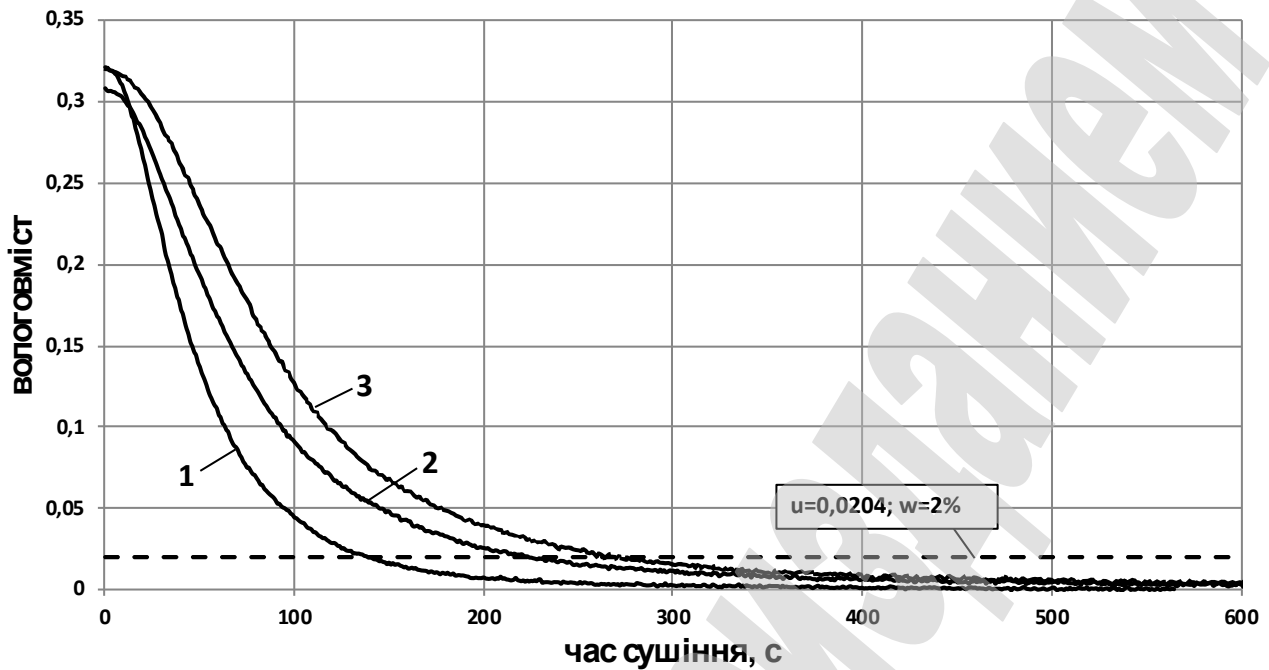


Рис. 1. Залежність вмісту вологи від часу сушіння цеоліту (фракція 0–1 мм) за різної густини теплових потоків: 1 – $q \approx 21 \text{ кВт/м}^2$; 2 – $q = 18 \text{ кВт/м}^2$; 3 – $q = 14 \text{ кВт/м}^2$

Початковий вологовміст u_0 цеоліту, вологовміст на початку u_1 та наприкінці u_{1k} періоду прогріву за часу τ_{np} та τ_{1k} , тривалість сушіння τ_{Σ} до вологості $w = 2\%$ та швидкість сушіння в першому періоді N згідно рис. 1 наведені в табл. 1.

Таблиця 1

Показники сушіння цеоліту згідно рис. 1

$q, \text{ кВт/м}^2$	u_0	u_1	u_{1k}	$\tau_{np}, \text{ с}$	$\tau_{1k}, \text{ с}$	$\tau_{\Sigma}, \text{ с}$ ($w = 2\%$)	$t_{\max}, \text{ }^\circ\text{C}$	$N, \text{ с}^{-1}$
14	0,2	0,3	0,15	22	88	264	240	0,0024
18	0,31	0,29	0,15	16	67	207	310	0,003
21	0,32	0,3	0,15	12	46	131	456	0,0047

Прямолінійні ділянки кривих сушіння (перший період сушіння) відображають випаровування поверхневої вологи і вологи з великих капілярів. Швидкості цих процесів постійні. Зі збільшенням густини теплового потоку пропорційно збільшується швидкість випаровування, а час сушіння зменшується.

Тривалість другого періоду, в якому випаровується волога з мікрокапілярів і адсорбційно-зв'язана вода, зі збільшенням густини теплового потоку також зменшується. До кінцевої вологості 2% сушіння цеоліту триває до 264 с. Проте тривалість сушіння до рівноважного вологовмісту сягає більше 500 с. Наявність приведених кінетичних закономірностей процесу сушіння цеоліту дасть змогу більш точно визначати необхідний час сушіння для розрахунку сушильної установки, що може знизити енерговитрати на пересушування.

Аналіз розподілу часу протікання процесу сушіння в першому і другому періодах показує, що більш тривалим і повільним процесом є другий період.

Істотне збільшення швидкості сушіння в другому періоді спостерігається за максимального збільшення густини теплового потоку. А максимальна температура цеоліту досягається наприкінці сушіння та також зростає зі збільшенням густини теплового потоку.

Також визначено, що вологовміст в кінці першого періоду і, відповідно, на початку другого постійний, не залежить від густини теплового потоку і становить 0,15 кг/кг.

Виконано дослідження сушіння цеоліту фракційного складу 0–1 мм і 0–5 мм за висоти шарів 3 і 5 мм і густині теплового потоку $q=21$ кВт/м².

Отримані криві сушіння цеоліту наведено на рис. 2.

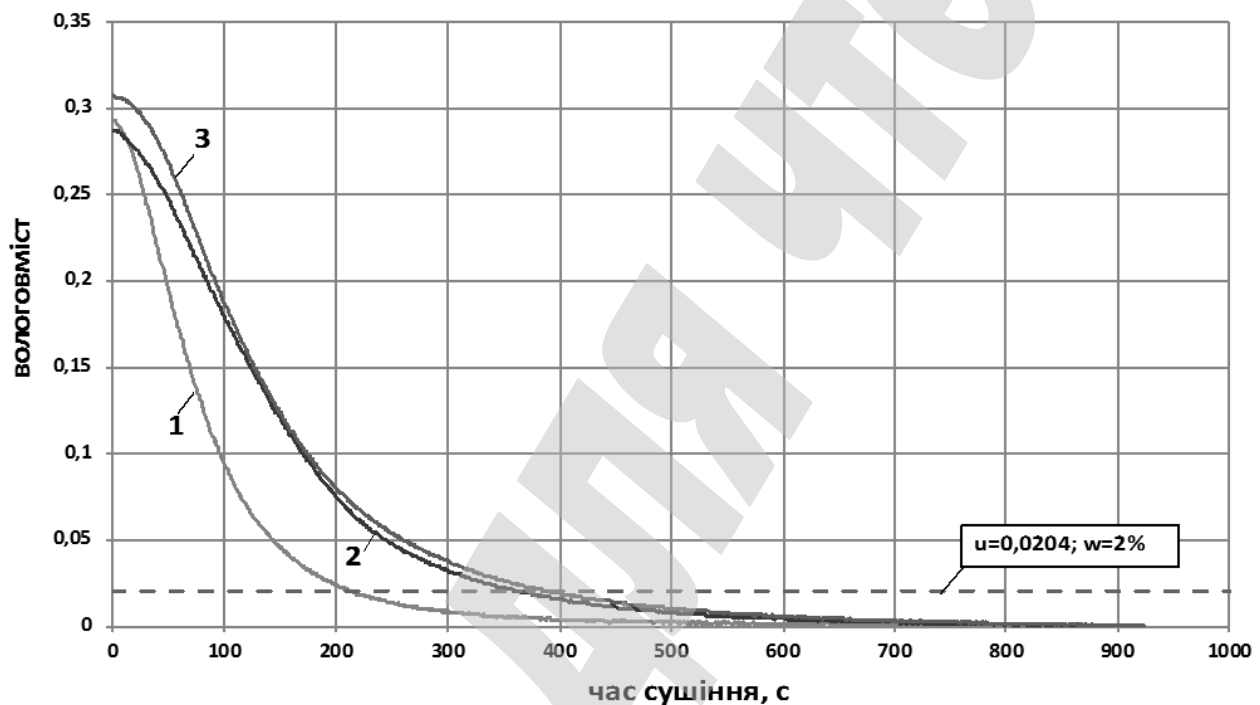


Рис. 2. Залежність вологовмісту шарів цеоліту від часу сушіння за густини теплового потоку 21 кВт/м² в діапазоні 0–1000 с: 1 – фракція 0–1 мм, висота шару 3 мм; 2 – фракція 0–1 мм, висота шару 5 мм; 3 – фракція 0–5 мм, висота шару 5 мм

Для детального аналізу аналогічні криві сушіння цеоліту в діапазоні 0–450 с показано на рис. 3.

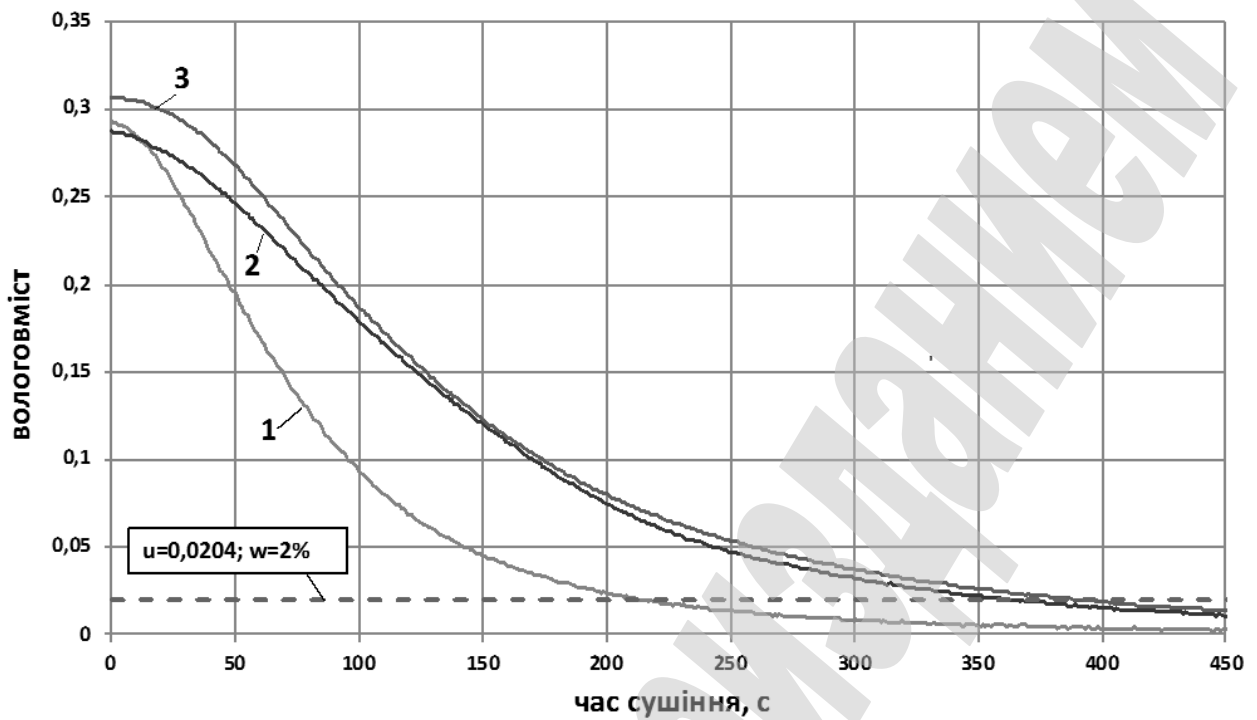


Рис. 3. Залежність вологовмісту шарів цеоліту від часу сушіння в діапазоні 0–450 с за густини теплового потоку 21 кВт/м^2 : 1 – фракція 0–1 мм, висота шару 3 мм; 2 – фракція 0–1 мм, висота шару 5 мм; 3 – фракція 0–5 мм, висота шару 5 мм

Показники сушіння цеоліту за сталої густини теплового потоку та різних фракцій d і висот шару h згідно рис. 3 наведено в табл. 2.

Таблиця 2

Показники сушіння цеоліту згідно рис. 3

q , кВт/м^2	d , мм	h , мм	u_0	u_1	u_{1k}	τ_{np} , с	τ_{1k} , с	τ_{Σ} , с ($w=2\%$)	t_{max} , °C	N , с^{-1}
21	0–1	3	0,29	0,25	0,15	22	71	212	415	0,0025
21	0–1	5	0,29	0,25	0,15	46	125	360	431	0,0013
21	0–5	5	0,31	0,27	0,17	48	112	388	438	0,0016

З табл. 2 видно, що швидкість сушіння цеоліту за однакової товщини шару та густині теплового потоку зростає зі збільшенням величини розміру часток фракції. Це можна пояснити зростанням порозності подрібненого цеоліту. Також збільшення швидкості в першому періоді сушіння зменшує його тривалість. Встановлено, що величина фракцій цеоліту на швидкість сушіння в другому періоді не впливає.

Отримані дані показали, що значення вологовмісту в кінці першого періоду сушіння постійне як при зміні густини теплового потоку, так і при зміні товщини шару. Проте за збільшення величини фракція цей вологовміст зростає.

Також встановлено, що час сушіння цеоліту залежить від товщини його шару. Так, під час сушіння цеоліту однакової фракції та густини теплового потоку зі збільшенням товщини шару швидкість сушіння зменшується, а тривалість кожного періоду сушіння збільшується.

Важливе значення для вибору режимів сушіння має залежність температури цеоліту різних фракцій та товщини шару від часу сушіння, що представлена на рис. 4.

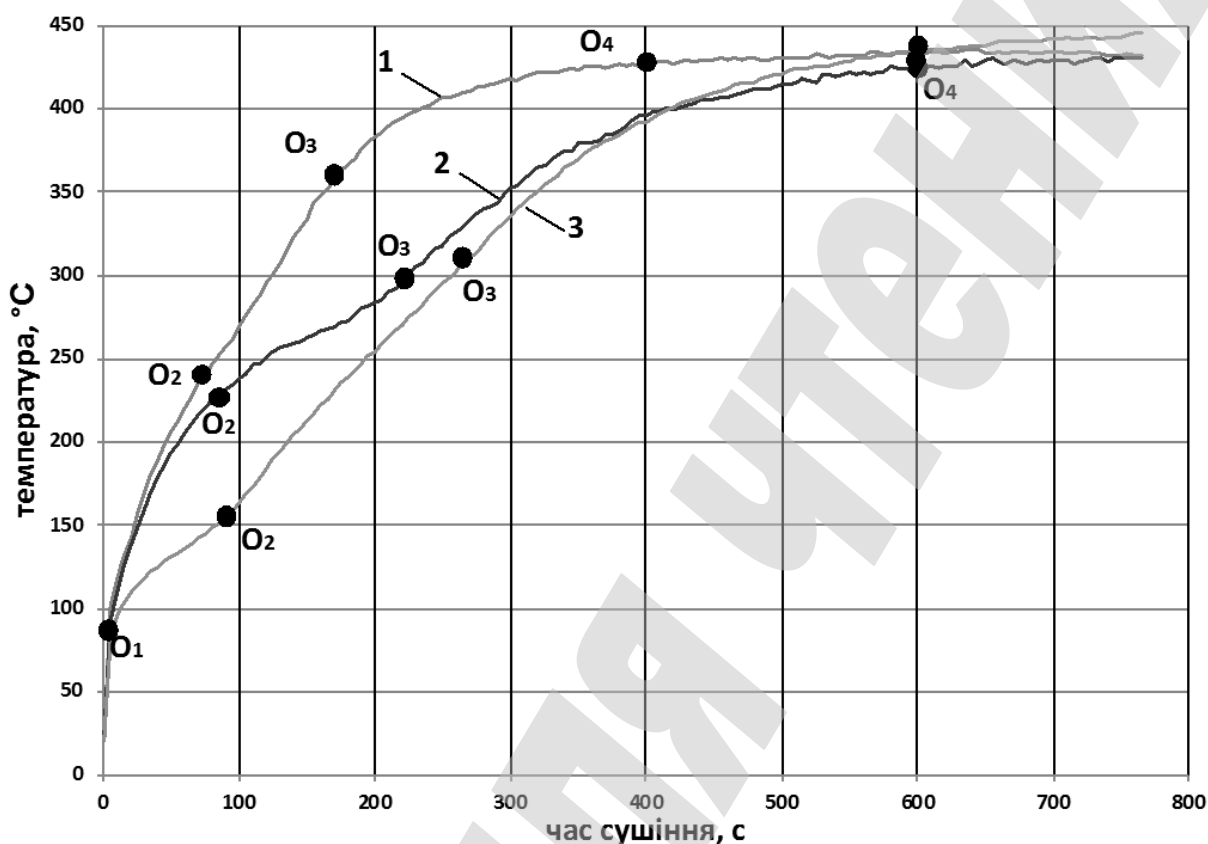


Рис. 4. Залежність температури поверхні цеоліту від часу сушіння: 1 – фракція 0–1 мм, висота шару 3 мм; 2 – фракція 0–1 мм, висота шару 5 мм; 3 – фракція 0–5 мм, висота шару 5 мм

З графіків на рис. 5 видно, що всі шари фракції нагріваються дуже швидко до температури 90 °C (O₁), після якої починається випаровування поверхневої вологи і темп зростання температури знижується до точок прогину кривих O₂. Від точок O₂ до точок O₃ здійснюється випаровування вологи з великих і дрібних капілярів і прогрівання шарів, а також зниження кількості надходження теплоти в результаті зменшення різниці температур між випромінюючою поверхнею і поглинаючою поверхнею шару. Від точок перегину O₃ і до O₄ здійснюється випаровування адсорбційно-зв'язаної та, частково, хімічно-зв'язаної води до практично повного зневоднення. Зростання температури в першому періоді сушіння свідчить, що швидкість випаровування в цьому періоді не лімітується швидкістю підведенням теплоти.

4. Висновки

Встановлено кінетичні закономірності процесу сушіння цеоліту різних фракцій радіаційним способом за різних густин теплових потоків. Визначено важливі параметри процесу сушіння та вибрано фракцію 0–5 мм як більш перспективну для сушіння.

Література

1. Цеолит природный. URL: <https://www.zeolite.com.ua>
2. Притульська Н. В., Бондаренко Є. В. Дослідження перспектив використання цеолітів в харчовій галузі // Восточно-Европейский журнал передовых технологий. 2015. № 5/11 (77). С. 4–9. doi: <http://doi.org/10.15587/1729-4061.2015.51067>
3. Zeolite characterization and catalysis / ed. Chester A. W., Derouane E. G. Springer, 2009. 360 p. doi: <http://doi.org/10.1007/978-1-4020-9678-5>
4. Рибачук В. Д. Дослідження мікрохвильової сушки гранул цеоліту природного та її впливу на технологічні властивості // Анналі Мечниковського інституту. 2016. Вип. 2. С. 59–64.
5. Оптимізація параметрів процесу регенерації шару сорбенту адсорбційного теплоакумулятора / Корінчук Д. М. та ін. // Наукові праці Одеської національної академії харчових технологій. 2012. Вип. 41 (1). С. 197–201.
6. Никитенко Н. И., Снежкин Ю. Ф., Сороковая Н. Н. Математическая модель и метод расчета динамики непрерывной сушки // Наукові праці Одеської національної академії харчових технологій. 2011. Вип. 39 (2). С. 10–16.
7. Никитенко Н. И., Снежкин Ю. Ф., Сороковая Н. Н. Математическое моделирование диффузионно-фильтрационного тепломассопереноса при регенерации твердых сорбентов в адсорбере с развитой поверхностью теплоподвода // Промышленная теплотехника. 2009. Т. 31, № 5. С. 20–28.
8. Process Integration for Food Drying with Air Dehumidified by Zeolites / Djaeni M., Bartels P., Sanders J., Straten G. van, Boxtel A. J. B. van. // Drying Technology. 2007. Vol. 25, Issue 1. P. 225–239. doi: <http://doi.org/10.1080/07373930601161096>
9. Multistage Zeolite Drying for Energy-Efficient Drying / Djaeni M., Bartels P., Sanders J., van Straten G., van Boxtel A. J. B. // Drying Technology. 2007. Vol. 25, Issue 6. P. 1053–1067. doi: <http://doi.org/10.1080/07373930701396535>
10. Assessment of a Two-Stage Zeolite Dryer for Energy-Efficient Drying / Djaeni M., Bartels P. V., van Asselt C. J., Sanders J. P. M., van Straten G., van Boxtel A. J. B. // Drying Technology. 2009. Vol. 27, Issue 11. P. 1205–1216. doi: <http://doi.org/10.1080/07373930903263210>
11. Marchevsky V., Novokhat O., Tsepka O. Paper drying process for corrugation (fluting) using radiant energy // Ukrainian Journal of Food Science. 2015. Issue 2. P. 310–321.
12. Karvatskii A., Marchevsky V., Novokhat O. Numerical modeling of physical fields in the process of drying of paper for corrugating by the infrared radiation // Eastern-European Journal of Enterprise Technologies. 2017. Vol. 2, Issue 5 (86). P. 14–22. doi: <http://doi.org/10.15587/1729-4061.2017.96741>
13. Марчевський В. М., Новохат О. А., Телестакова В. В. Кінетичні закономірності сушіння картону, наповненого цеолітом // Інтернаука. 2018. № 8. URL: <https://www.inter-nauka.com/issues/2018/8/3725>