

ЕНЕРГЕТИКА ТА ЕНЕРГОЗБЕРЕЖЕННЯ

УДК 621.355.9

Експериментальне дослідження сушіння цеоліту «4а» у мікрохвильовому полі

І. Л. Бошкова¹✉, Н. В. Волгушева², Л. З. Бошков³, О. С. Бондаренко⁴, А. П. Гречановський⁵¹⁻⁴Одеський національний технологічний університет, вул. Канатна, 112, Одеса, 65039, Україна;⁵Національний університет «Одеська політехніка», просп. Шевченка, 1, Одеса, 65044, Україна✉ e-mail: ¹boshkova.irina@gmail.comORCID: ¹<https://orcid.org/0000-0001-5989-9223>; ²<https://orcid.org/0000-0002-9984-6502>; ³<http://orcid.org/0000-0002-2196-1519>; ⁴<https://orcid.org/0000-0002-0111-0768>; ⁵<https://orcid.org/0000-0002-8257-5769>

Цеоліти широко використовуються у багатьох галузях промисловості: у водоочисних приладах у якості адсорбентів, іонообмінників, молекулярних сит, у вакуумних насосах сорбційного типу. Також цеоліти використовують у якості катализаторів багатьох процесів нафтохімії і нафтопереробки. Для ефективного застосування цеолітів необхідно вибрати не тільки правильний тип цеоліту, а й організувати їх регенерацію, тобто видалення вологи, яка здійснюється у процесі сушіння. В даний час сушіння цеолітів здійснюється за використання гарячого повітря, яке нагрівається від електричного нагрівача, або використовується відпрацьоване тепло промислових підприємств. Застосування мікрохвильового нагрівання якісно змінює процес десорбції. Зазначається, що застосування мікрохвильового нагріву дозволяє вести процес набагато швидше, чистіше та з нижчою енергоємністю порівняно з традиційними методами. Крім того, мікрохвильове сушіння може сприяти зменшенню втрати цеоліту. Проведено дослідження кінетики циклічного та безперервного мікрохвильового сушіння цеоліту 4А з насипною щільністю $\rho = 780 \text{ кг/м}^3$ та рівноважним вологовмістом 13,4 %. Представлено методичку експериментальних досліджень та описано експериментальне обладнання. Наведено результати експериментальних досліджень десорбції цеоліту при мікрохвильовому підведенні енергії до зразків з масою 100, 200 та 300 г. Проведено порівняльний аналіз кривих зміни вологовмісту та температури за часом. Наведено результати розрахунків основних теплових характеристик процесу сушіння: теплоти випаровування вологи, теплоти нагрівання матеріалу, корисного теплового потоку, ККД. Проаналізовано можливі причини перерозподілу теплових потоків на випаровування та нагрівання в процесі сушіння. Хід кривих ККД вказує на зміну діелектричних характеристик цеоліту в процесі сушіння.

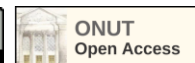
Ключові слова: Щільний шар; Десорбція; Маса; Вологовміст; Температура; Тепловий потік; ККД

doi: <https://doi.org/10.15673/ret.v59i3.2658>

© The Author(s) 2023. 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

При застосуванні традиційних технологій конвективної десорбції цеолітів здійснюється нагрівання не тільки самого матеріалу, а також обладнання, що призводить до додаткових витрат

енергії та зниження енергоефективності. Визначено, що мікрохвильове сушіння має більше переваг, ніж звичайне. Мікрохвильова енергія може швидко і ефективно проникати в матеріал цеоліту, викликаючи молекулярні коливання і підвищуючи температуру. Це дозволяє значно прискорити про-

цес сушіння, порівняно з традиційними методами, такими як природне сушіння або сушіння за допомогою гарячого повітря. Мікрохвильове сушіння може бути більш енергоефективним порівняно з іншими методами сушіння та дозволяє використовувати енергію мікрохвильового випромінювання без значного розсіювання тепла у навколишнє середовище. Крім того, мікрохвильові сушарки можуть бути налаштовані для точного контролю параметрів сушіння, таких як час, потужність і температура. Це дозволяє досягти більш однорідного сушіння і керувати процесом з високою точністю. Наступна перевага – це те, що мікрохвильове сушіння може допомогти зменшити втрати цеоліту під час процесу сушіння. Традиційні методи, такі як сушіння гарячим повітрям, можуть спричинити втрати матеріалу через пил та випаровування. Мікрохвильове сушіння дозволяє зменшити такі втрати. Важливо відзначити, що мікрохвильове сушіння має свої особливості і вимагає спеціального обладнання та навичок для безпечного та ефективного використання. Визначення особливостей кінетики сушіння щільного шару цеоліту важливе для просування мікрохвильової технології на промисловий рівень.

2. Актуальність експериментальних досліджень сушіння цеолітів

На даний час для переходу на енергоефективні технології сушіння цеолітів вважається інноваційним використовувати гаряче повітря, що нагріте за допомогою сонячного колектора [1]. Проте мікрохвильове сушіння має низьку вагомих переваг. Застосування мікрохвильового нагрівання якісно змінює процес десорбції [2]. Метод використання мікрохвильового випромінювання як джерела тепла для регенерації адсорбційного матеріалу сприймається як стратегія вирішення проблем підвищення енергоефективності [3]. Мікрохвильове нагрівання приводить до нагрівання тільки адсорбенту, що містить адсорбовану воду, без нагрівання обладнання. Відповідно даним [4], використання мікрохвильового нагрівання демонструє ефективність для процесів десорбції. Прожарювання сухих та чистих цеолітів в електромагнітному полі короткохвильового діапазону до температури 300÷400 °С збільшує абсолютне значення їх сорбційної ємності додатково на 10÷15 % (сорбційна ємність цеолітів у вихідному стані становить 20÷25 %); регенерацію цеолітів після їх

використання слід проводити в інтервалі температур 50÷150°C при зниженому тиску (форвакуум, $p \cong 104$ Па); час регенерації цеоліту при встановленій потужності генератора $P = 1$ кВт та масі сорбенту $m = 35-40$ кг становить 7-8 годин [5]. Порівняльні розрахунки щодо маси регенованого сорбенту показують, що застосування мікрохвильового нагріву дозволяє істотно скоротити витрати енергії: у порівнянні з базовим варіантом, економія становить більше 40% [5].

Важливим є метод використання мікрохвильового сушіння у технології твердих лікарських форм природного цеоліту. Техніка вологого гранулювання дуже часто використовується при приготуванні вільно сипких гранулятів при виробництві таблеток та капсул [6]. Важливо, щоб отримані за цією технологією гранули були відповідним чином висушені перед подальшою обробкою. Процес сушіння, спосіб його здійснення та тривалість впливають не тільки на кінцеві властивості гранул, а також на якість кінцевого продукту [7]. Важливо, що при мікрохвильовому сушінні сорбційна ємність значно збільшується.

На відміну від мікроструктури, отриманої при звичайному сушінні, застосування мікрохвиль призводить до отримання більш дрібних зерен. Як правило, це сприяє зростанню пористості та покращенню механічних властивостей, таких як міцність на вигин [8]. Зазначається, що застосування мікрохвильового нагріву дозволяє вести процес набагато швидше, чистіше та з нижчою енергоємністю порівняно з традиційними методами. Цікавість до підготовки цеолітів визначається також широкою сферою застосування, зокрема в харчовій промисловості: для знебарвлення різних мінеральних, рослинних олій та тваринних жирів; очищення від токсинів, мікотоксинів, радіонуклідів та інших ксенобіотиків [8].

Регенерація адсорбенту є найважливішою стадією, що визначає ефективність всього процесу, в якому бере участь адсорбція. Проблема швидкої та ефективної десорбції є важливою для ефективності технологій, що використовують адсорбцію [9]. Ступінь зниження адсорбційної здатності цеоліту автори [10] досліджували після двох та трьох обробок мікрохвильовим нагріванням. Середній ступінь зниження адсорбційної ємності становив 1,4 % за обробку, що значно менше, ніж у використанні традиційних способів регенерації. Аналіз наведених літературних даних показує, що застосування мікрохвильового нагріву для сушіння цео-

літів є перспективним. Метою роботи є дослідження кінетики сушіння цеоліту та оцінка впливу маси завантаження на основні характеристики процесу.

3. Експериментальна установка для дослідження сушіння цеолітів та методика проведення експерименту

Експериментальні дослідження проводилися на лабораторній установці, схема якої представлена на рис.1.

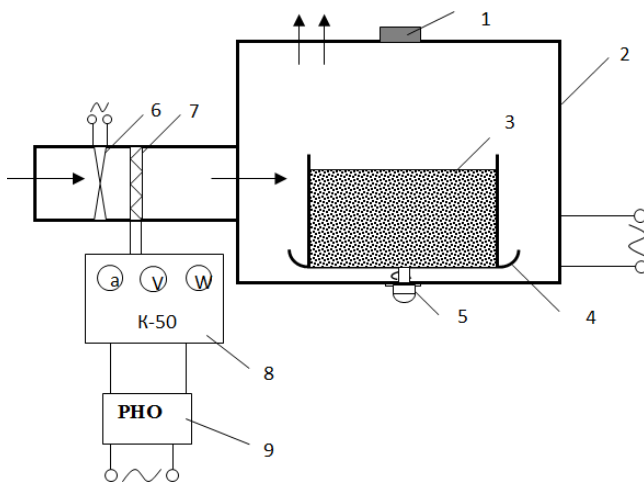


Рисунок 1 – Схема експериментальної установки для дослідження процесу сушіння у мікрохвильовому полі: 1 – хвилевід; 2 – робоча камера; 3 – експериментальний осередок; 4 – підставка; 5 – механізм приводу; 6 – вентилятор; 7 – нагрівач; 8 – вимірювальний комплект; 9 – регулятор напруги.

У робочу камеру прямокутного перерізу надходила енергія через хвилевід від магнетрону з частотою генерації 2,45 ГГц і регульованою потужністю 160-1000 Вт. Початковий вологовміст цеоліту 0,134 кг/кг, початкова температура – 24 °С, маса – від 100 до 300 г. В експериментальний осередок поміщався досліджуваний матеріал, який оброблявся в мікрохвильовій камері. Через певні інтервали часу матеріал витягувався і зважувався на електронних вагах ТВЕ-0,5-0,01 для визначення кількості води, що випарувалася. Вимірювання температури проводилися за допомогою термопар ЦММ ELPRIE, які містилися в шар цеолітів безпосередньо відразу після вимкнення магнетрону. Установка забезпечує проведення досліджень при мікрохвильовому, мікрохвильово-конвективному

та конвективному сушінні.

4. Методика обробки експериментальних даних

Рівноважний вміст води визначався шляхом відбору проб масою $m_{вл}$ з партії цеоліту з подальшим його висушуванням до нульового вмісту води і визначенням маси $m_{сух}$. Рівноважний вміст води u_p розраховувався за формулою:

$$u_p = \frac{m_{вл} - m_{сух}}{m_{сух}} \quad (1)$$

При обробці даних визначають такі величини:

- маса води, яка випарувалася:

$$\Delta m = m_i - m_{i+1}, \text{ кг} \quad (2)$$

- поточний вологовміст:

$$u_i = \frac{m_{води}}{m_{сух}}, \text{ кг/кг} \quad (3)$$

де $m_{води}$ – маса води в матеріалі на i -ому вимірі, $m_{сух}$ – маса сухого матеріалу.

Швидкість сушіння в постійному періоді визначається аналітично за зміною вмісту води в часі

$$N = \frac{u_0 - u_k}{\tau_{\Sigma}}, \text{ кг/(кг} \cdot \text{с)} \quad (4)$$

Кількість теплоти, яка пішла на нагрівання досліджуваного зразка та випаровування води (корисний тепловий потік, $Q_{кор}$) визначається залежністю:

$$Q_{кор} = \Delta m \cdot r + \frac{m_0 + m_k}{2} c_{в.л.м} (t_k - t_0), \text{ Дж} \quad (5)$$

де $c_{в.л.м}$ – теплоємність вологого матеріалу, Дж/(кг·К).

Питомий тепловий потік визначається формулою:

$$q_{кор}^m = \frac{Q_{кор}}{m}, \text{ Вт/кг} \quad (6)$$

ККД установки, тобто співвідношення корисного теплового потоку і вихідної потужності магнетрону P , дозволяє оцінити ефективність вико-

ристання мікрохвильової енергії:

$$\eta = \frac{Q_{кор}}{P} \quad (7)$$

5. Результати експериментальних досліджень десорбції цеоліту при мікрохвильовому підведенні енергії

Дослідження проводилися на цеоліті 4А з насипною густиною $\rho = 780 \text{ кг/м}^3$ та рівноважним вмістом води 13,4 %. Товщина шару при масі 300 г – $\delta = 1,5 \text{ см}$, при масі 200 г – $\delta = 1,0 \text{ см}$, при масі 100 г – $\delta = 0,5 \text{ см}$. Фото цеоліту, підготовленого для досліджень, представлено на рис. 2.



Рисунок 2 – Вид цеоліту 4А

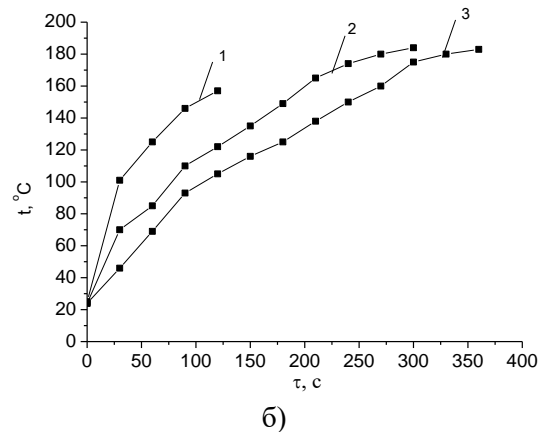
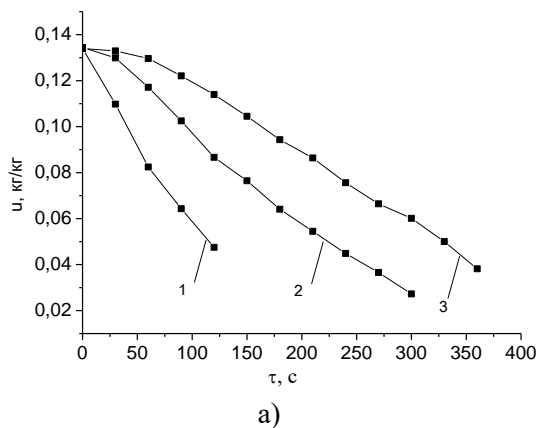


Рисунок 3 – Зміна вмісту води а) і температури б) при циклічному мікрохвильовому сушінні цеоліту 4А

Таблиця – Характеристики сушіння при різних значеннях маси цеоліту 4А

Маса зразка	100	200	300
Тривалість МВ нагріву, с	120	300	360
Теплота на випаровування води, Дж	16132	43680	59550
Теплота на нагрівання матеріалу, Дж	11608	31920	41250
Сумарна теплота, Дж	27740	75600	100800
Відношення теплоти на випаровування до теплоти нагрівання	1,39	1,37	1,44
Корисний тепловий потік, Вт	231	252	280
ККД, %	23,1	25,2	28

Результати дослідження кінетики сушіння цеоліту за різних мас завантаження представлені на рис. 3. Сушіння проходило в циклічному режимі, при якому зразок через кожні 30 с вилучався з мікрохвильової камери. У цей період проводилися вимірювання маси та температури.

Криві зміни вмісту води (рис. 3а) показують, що для всіх значень мас весь процес сушіння протікає в періоді постійної швидкості сушіння, вміст води змінюється лінійно. Швидкість циклічного сушіння N для маси 300 г становила $2,93 \cdot 10^{-4} \text{ кг/(кг} \cdot \text{с)}$, для маси 200 г – $N = 4,42 \cdot 10^{-4} \text{ кг/(кг} \cdot \text{с)}$, для маси 100 г – $N = 7,21 \cdot 10^{-4} \text{ кг/(кг} \cdot \text{с)}$. Вплив способу сушіння (циклічна чи безперервна) суттєво проявляється на малих масах. Так, для безперервного сушіння при масі 200 і 300 г відмінність несуттєва: при $m = 300 \text{ г}$ – $2,97 \cdot 10^{-4} \text{ кг/(кг} \cdot \text{с)}$, при $m = 200 \text{ г}$ – $N = 4,33 \cdot 10^{-4} \text{ кг/(кг} \cdot \text{с)}$. При $m = 100 \text{ г}$ вплив способу сушіння проявляється значніше: для безперервного сушіння $N = 9,66 \cdot 10^{-4} \text{ кг/(кг} \cdot \text{с)}$. Середня питома адитивна теплоємність $c_p = 916 \text{ Дж/(кг} \cdot \text{К)}$, середнє значення питомої теплоти пароутворення $r = 2114,3 \cdot 10^3 \text{ Дж/(кг} \cdot \text{К)}$. Вихідна потужність магнетрону $P = 1000 \text{ Вт}$. Похибка визначення середньоінтегрального вмісту води склала $\pm 2,7 \%$, середньої температури шару $\pm 3,5 \%$.

У таблиці наведено середньоінтегральні значення характеристик сушіння при різних значеннях маси.

Зі зростанням маси зразка корисний тепловий потік збільшується, відповідно, збільшується тепловий ККД мікрохвильової камери. За резу-

льтатами розрахунку теплоти випаровування та теплоти нагрівання цеоліту масою 300 г та ККД при мікрохвильовому нагріванні отриманий рис. 4.

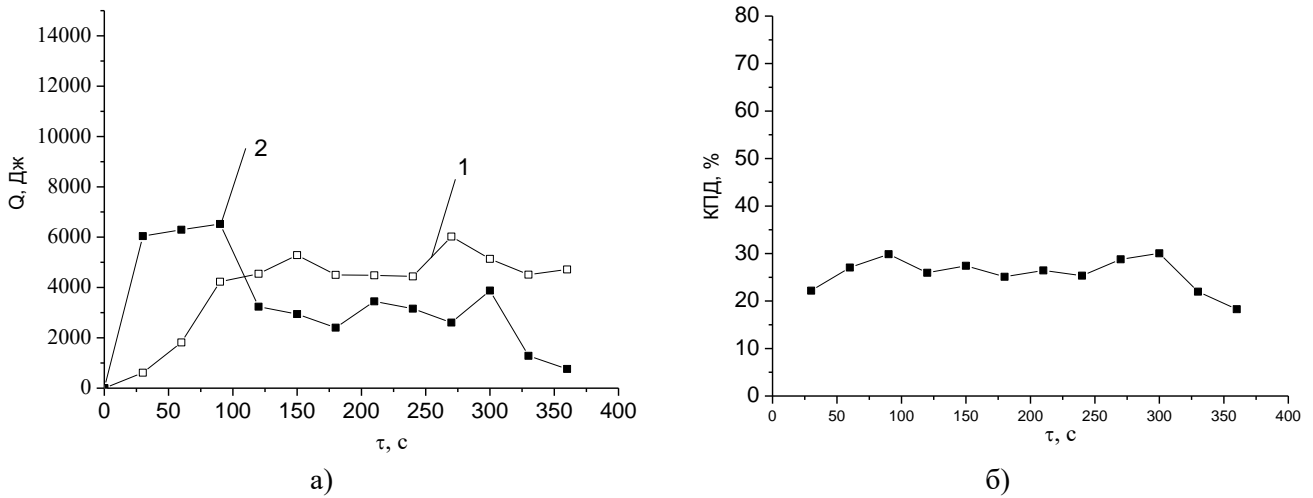


Рисунок 4 – Зміна теплоти випаровування та теплоти нагрівання цеоліту масою 300 г у часі (а) та зміна ККД у часі (б) при мікрохвильовому сушінні: 1 – теплота випаровування, 2 – теплота нагрівання

Рис. 4 показує, що крива теплоти випаровування зростає за часом, що пояснюється зростанням температури. На початку процесу спостерігається інтенсивне зростання температури, енергія від магнетрону переважно йде на нагрівання матеріалу. При $\tau = 120$ спостерігається перерозподіл потоків теплоти. Як бачимо на рис. 3, з цього моменту температура починає перевищувати 80 °С. Можна припустити, що починає діяти

ефект бародифузії, завдяки якому всередині зерен цеоліту інтенсифікується процес перенесення вологи, спрямований до поверхні. Зниження ККД в кінці процесу сушіння (рис. 4б) пов'язане зі зниженням теплоти нагріву (рис. 4 а), що може бути пов'язане з погіршенням діелектричних характеристик. На рис. 5 представлені графіки зміни теплоти випаровування, теплоти нагрівання та ККД для цеоліту масою 200 г.

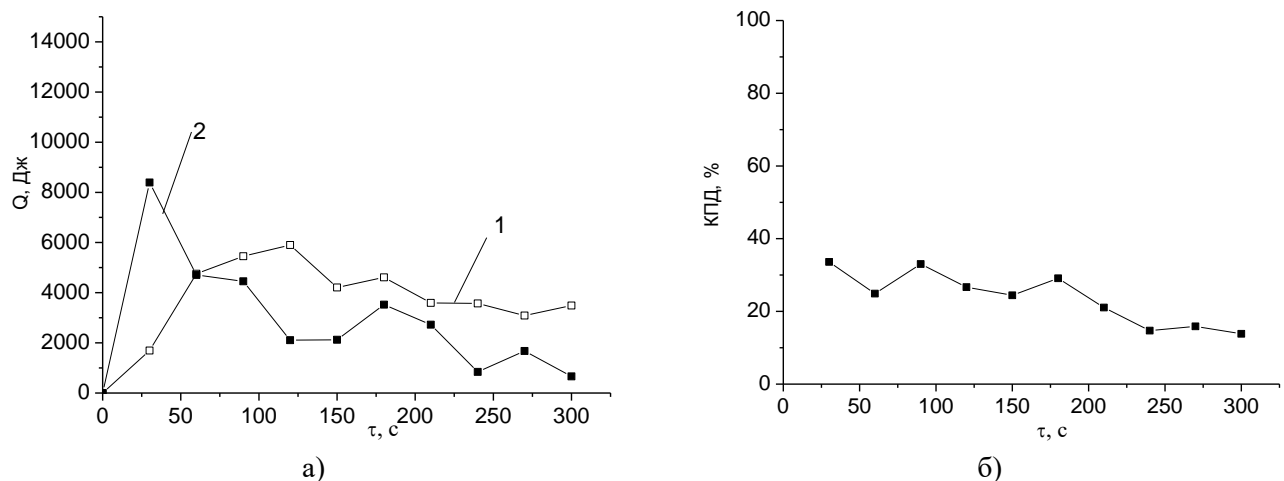


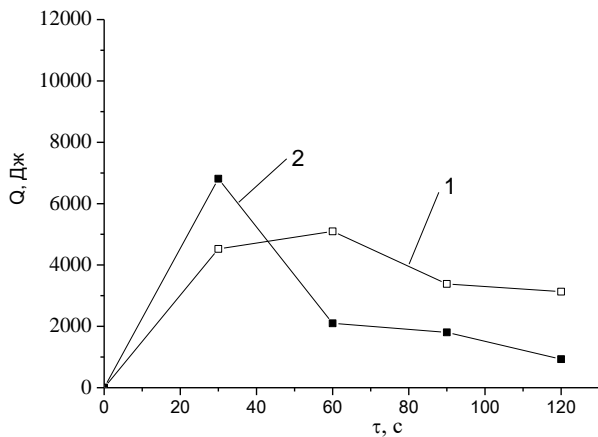
Рисунок 5 – Зміна теплоти випаровування та теплоти нагрівання цеоліту масою 200 г у часі (а) та зміна ККД у часі (б) при мікрохвильовому сушінні: 1 – теплота випаровування, 2 – теплота нагрівання

Хід кривих теплоти нагрівання та випаровування подібний до ходу кривих рис. 4, однак, внаслідок меншої маси, перерозподіл теплових потоків на випаровування та нагрівання спостерігається при меншому часі експозиції в мікрохви-

льовому полі. При цьому температура матеріалу (рис. 3б) досягала 80 °С. Також на заключному етапі сушіння спостерігається зниження ККД, що корелюється зі зниженням теплоти нагріву (рис. 5а).

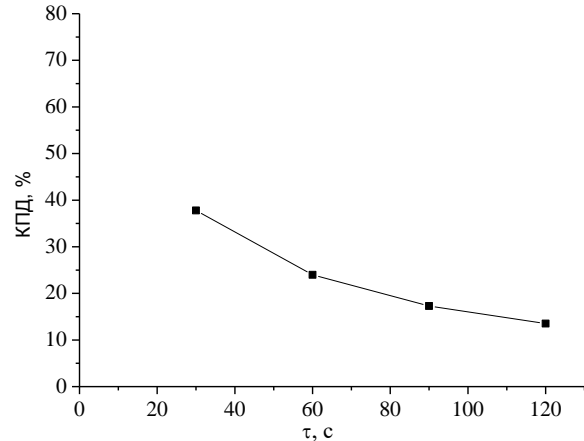
На рис. 6 представлені графіки зміни теплоти

випаровування, теплоти нагрівання та ККД для



а)

цеоліту масою 100 г.



б)

Рисунок 6 – Зміна теплоти випаровування та теплоти нагрівання цеоліту масою 100 г у часі (а) та зміна ККД у часі (б) при мікрохвильовому сушінні: 1 – теплота випаровування, 2 – теплота нагрівання

Перерозподіл теплових потоків (рис. 6а) подібний до того, що спостерігається для мас 200 і 300 г. (рис. 4а, рис. 5а). ККД монотонно знижується (рис. 6б).

Порівняння ККД на різних масах матеріалу представлено на рис. 7.

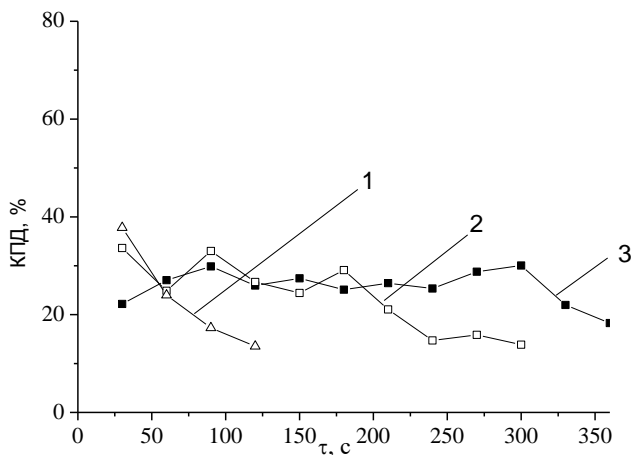


Рисунок 7 – Зміна ККД нагріву цеоліту при мікрохвильовому сушінні:

1 – $m = 100$ г; 2 – $m = 200$ г; 3 – $m = 300$ г

Видно, що наприкінці процесу сушіння ККД для будь-якої маси знижується.

ККД нагріву для маси 200 і 300 г в інтервалі часу 60...200 с практично збігаються. Однак при 30 с розходження помітне, яке зменшується при наближенні до $\tau = 60$ с. Період постійної швидкості сушіння характеризується порівнянною швидкістю сушіння. Після 200 с криві знову розходяться, що можна пояснити зміною діелектричних характеристик внаслідок зміни температури та вмісту вологи. Дані експериментів показують, що

спадаюча крива на ККД спостерігається при масі 200 г і часу 180 с і при масі 300 г і часу 300 с, при цьому температури і вологовміст практично збігалися: $u \approx 0,065$ кг/кг; $t \approx 160$ °С.

6. Висновки

Швидкість циклічного сушіння для маси 300 г склала $N = 2,93 \cdot 10^{-4}$ кг/(кг·с), для маси 200 г – $N = 4,42 \cdot 10^{-4}$ кг/(кг·с), для маси 100 г – $N = 7,21 \cdot 10^{-4}$ кг/(кг·с). Вплив способу сушіння (циклічна чи безперервна) суттєво проявляється на малих масах. Так, для безперервного сушіння при масі 200 і 300 г відмінність несуттєва: при $m = 100$ г – $N = 9,66 \cdot 10^{-4}$ кг/(кг·с), при $m = 200$ г – $N = 4,33 \cdot 10^{-4}$ кг/(кг·с), при $m = 300$ г – $N = 2,97 \cdot 10^{-4}$ кг/(кг·с).

Аналіз потоків теплоти, що йдуть на нагрівання матеріалу та випаровування вологи, показав, що при $t \geq 80$ °С спостерігається перерозподіл потоків: теплота випаровування починає перевищувати тепло нагріву. Передбачається, що починає впливати ефект бародифузії, завдяки якому всередині зерен цеоліту інтенсифікується процес перенесення вологи, спрямований на поверхню.

Зниження ККД в кінці процесу сушіння пов'язане зі зниженням теплоти нагріву, що може бути пов'язане з погіршенням діелектричних характеристик. ККД нагріву для маси 200 і 300 г в інтервалі часу 60 ... 200 с практично збігаються.

Особистий внесок авторів CRediТ

Бошкова І.Л.: методологія, формальний аналіз.
Волгушева Н.В.: теплові розрахунки, методичне

забезпечення. **Бошков Л.З.:** аналіз та узагальнення даних. **Бондаренко О.С.:** інформаційний пошук, експериментальні дослідження. **Гречановський А.П.:** обробка експериментальних даних.

Література

1. **Kabeel A. E.** Solar powered air conditioning system using rotary honeycomb desiccant wheel // *Renewable Energy*. – 2007. – Vol. 32. – No. 11. – P. 1842-1857.
2. **Huang H., Ito S., Watanabe F., Hasatani M., Kobayashi N.** Microwave Irradiation Effect in Water-vapor Desorption from Zeolites // Part of the book: *Microwave Heating*. – 2011. – P. 335-350.
3. **Ohgushi T., Nagae M.** Microwave Heating of Hydrated Zeolites and Application of Zeolites as a Domestic Reusable Desiccant through its Technique // *Journal of Metastable and Nanocrystalline Materials*. – 2005. – Vol. 23. – P. 195-198.
4. **Yan C., Jen J., Shih T.** Application of microwave-assisted desorption/headspace solid-phase microextraction as pretreatment step in the gas chromatographic determination of 1-naphthylamine in silica gel adsorbent // *Talanta*. – 2007. – Vol. 71. – No. 5. – P. 1993-1997.
5. **Ф.В. Ківва, В.М. Горобець, М.І. Головка, С.М. Зотов, Ю.В. Гончаренко, О.Л. Коворотний, А.І. Говорищев.** Пристрій для регенерації сорбентів електромагнітним полем // *Наука та інновації*. – 2010. – Т. 6. – № 3. – С. 12-19.
6. **Корнієнко Б.Я.** Система керування процесом зневоднення та гранулювання у псевдозрідженому шарі // *Хімічна промисловість України*. – 2011. – № 6. – С. 63-68.
7. **Рибачук В.Д.** Дослідження мікрохвильової сушки гранул цеоліту природного та її впливу на технологічні властивості // *Літопис інституту ім. Мечникова*. – 2016. – № 2. – С. 59-64.
8. **Пругульська Н. В., Бондаренко Є. В.** Дослідження перспектив використання цеолітів в харчовій галузі // *Східно-Європейський журнал передових технологій*. – 2015. – № 5/11 (77). – С. 4-9.
9. **Cherbanski R., Molga E.** Intensification of Desorption Processes by Use of Microwaves – An Overview of Possible Applications and Industrial Perspectives // *Chemical Engineering and Processing: Process Intensification*. – 2009. – Vol. 48. – No. 1. – P. 48-58.

Отримана в редакції 14.07.2023, прийнята до друку 18.09.2023

Experimental study of drying of zeolite "4a" in a microwave field

Iryna Boshkova¹✉, Natalya Volgusheva², Leonid Boshkov³, Oksana Bondarenko⁴, Andrii Hrechanovskiy⁵

¹⁻⁴Odesa National University of Technology, 112 Kanatnaya Str., Odesa, 65039, Ukraine;

⁵National University "Odesa Polytechnic", 1, Shevchenko Ave., Odesa, 65044, Ukraine

✉ e-mail: ¹boshkova.irina@gmail.com

ORCID: ¹<https://orcid.org/0000-0001-5989-9223>; ²<https://orcid.org/0000-0002-9984-6502>; ³<http://orcid.org/0000-0002-2196-1519>; ⁴<https://orcid.org/0000-0002-0111-0768>; ⁵<https://orcid.org/0000-0002-8257-5769>

Zeolites are widely used in many industries: in water purification devices as adsorbents, ion exchangers, molecular sieves, in vacuum pumps of the sorption type. Also, zeolites are used as catalysts for many petrochemical and oil refining processes. For the effective use of zeolites, it is necessary to choose not only the right type of zeolite, but also to organize their regeneration, i.e. moisture removing from zeolites, which is carried out in the drying process. Currently, drying of zeolites is carried out using hot air, which is heated by an electric heater, or waste heat from industrial enterprises is used. The use of microwave heating qualitatively changes the desorption process. It is noted that the use of microwave heating allows the process to be conducted much faster, cleaner and with lower energy consumption compared to traditional methods. In addition, microwave drying can help reduce zeolite loss. The kinetics of cyclic and continuous microwave drying of 4A zeolite with bulk density $\rho = 780 \text{ kg/m}^3$ and equilibrium moisture content of 13.4% was studied. The methodology of experimental research is presented and the experimental equipment is described. The results of experimental studies of zeolite desorption during microwave energy supply to samples with a mass of 100, 200, and 300 g are given. A comparative analysis of the curves of changes in moisture content and temperature over time is carried out. The

results of calculations of the main thermal characteristics of the drying process are given: heat of moisture evaporation, heat of heating the material, useful heat flow, efficiency. The possible reasons for the redistribution of heat flows into evaporation and heating in the drying process are analyzed. The course of the efficiency curves indicates a change in the dielectric characteristics of the zeolite during the drying process.

Keywords: Dense layer; Desorption; Mass; Moisture content; Temperature; Heat flow; Efficiency

References

1. **Kabeel, A.E.** (2007). Solar Powered Air Conditioning System Using Rotary Honeycomb Desiccant Wheel. *Renewable Energy*, 32(11), 1842-1857.
2. **Huang, H., Ito, S., Watanabe, F., Hasatani, M., Kobayashi, N.** (2011). Microwave Irradiation Effect in Water-vapor Desorption from Zeolites. *Part of the book: Microwave Heating*, 335-350.
3. **Ohgushi, T., Nagae, M.** (2005). Microwave Heating of Hydrated Zeolites and Application of Zeolites as a Domestic Reusable Desiccant through its Technique. *Journal of Metastable and Nanocrystalline Materials*, 23, 195-198.
4. **Yan, C.T., Jen, J.F., & Shih, T.S.** (2007). Application of Microwave-Assisted Desorption/Headspace Solid-Phase Microextraction as Pretreatment Step in the Gas Chromatographic Determination of 1-Naphthylamine in Silica Gel Adsorbent. *Talanta*, 71(5), 1993-1997.
5. **Kivva, F. V., Gorobets, V. M., Golovko, M. I., Zotov, S. M., Goncharenko, Y. V., Kovorotniy, O. L., & Govorischev, O. I.** (2010). Equipment for Sorbent Regeneration in the Electromagnetic Field. *Nauka ta innovacii*, 6(3), 12-19.
6. **Korniyenko, B. YA.** (2011). Control system for the process of dehydration and granulation in a fluidized bed. *Chemical industry of Ukraine*, 6, 63-68.
7. **Rybachuk, V.D.** (2016). Study of microwave drying of natural zeolite granules and its effect on technological properties. *Annals of Mechnikov Institute*, 2, 59-64.
8. **Prytul's'ka, N. V., Bondarenko, Ye. V.** (2015). Research on the prospects for the use of zeolites in the food industry. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*, 5/11 (77), 4-9.
9. **Cherbanski, R., Molga, E.** (2009). Intensification of Desorption Processes by Use of Microwaves – An Overview of Possible Applications and Industrial Perspectives. *Chemical Engineering and Processing: Process Intensification*, 48(1), 48-58.

Received 14 July 2023

Approved 18 September 2023

Available in Internet 30 September 2023