

ЕНЕРГЕТИКА ТА ЕНЕРГОЗБЕРЕЖЕННЯ

УДК 621.355.9

Аналітичне дослідження процесу сушіння цеолітів у мікрохвильовому полі

І. Л. Бошкова^{1✉}, *Н. В. Волгушева*², *Л. З. Бошков*³, *О. С. Бондаренко*⁴, *А. П. Гречановський*⁵

¹⁻⁴Одеський національний технологічний університет, вул. Канатна, 112, Одеса, 65039, Україна;

⁵Національний університет «Одеська політехніка», просп. Шевченка, 1, Одеса, 65044, Україна

✉ e-mail: ¹boshkova.irina@gmail.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>

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 каталізаторів багатьох процесів нафтохімії і нафтопереробки. Інноваційним застосуванням цеолітів є термохімічна акумуляція теплоти, що дозволяє зробити внесок у вирішення питання енергозбереження та оптимального використання ресурсів. Метод акумуляції тепла із застосуванням цеолітів ґрунтується на використанні тепла, пов'язаного з адсорбцією та десорбцією. Для ефективного застосування цеолітів у термохімічних акумуляторах теплоти необхідно вибрати не тільки правильний тип цеоліту, а й організувати їх регенерацію. Стадія регенерації безпосередньо пов'язана з видаленням вологи з цеолітів, яка здійснюється у процесі сушіння. Сорбційна здатність суттєво зростає під час мікрохвильового сушіння. Використання мікрохвильового нагріву дозволяє проводити процес набагато швидше, чистіше та з меншими енерговитратами порівняно з традиційними методами. Аналітично досліджується процес регенерації цеолітів 4A і 13X при мікрохвильовому сушінні. На підставі аналітичного огляду літератури визначено фізичні та діелектричні характеристики цеолітів, необхідні для проведення розрахунків. Досліджено температурне поле в масиві цеоліту на різній відстані від поверхні, визначено вплив позитивного (потужність мікрохвильового поля) та негативного (зумовленого випаром вологи) джерела теплоти. Встановлено вплив типу цеоліту (NaX, NaA1, NaA2, EST-10, кліноптилоліт) на інтенсивність нагрівання. Показано вплив коефіцієнта тепловіддачі на температуру поверхні масиву. Розрахунки підтверджують, що математична модель чітко відображає вплив фізичних властивостей на розподіл температури у шарі цеоліту.

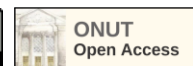
Ключові слова: Діелектричні характеристики; Температура; Тип цеоліту; Шар; Питома потужність

doi: <https://doi.org/10.15673/ret.v59i2.2628>

© 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

Цеоліти знаходять широке застосування у різних галузях промисловості: у водоочисних приладах у якості адсорбентів, іонообмінників, молекулярних сит, у вакуумних насосах сорбційного

типу. Також цеоліти застосовуються як каталізатори багатьох процесів нафтохімії і нафтопереробки. У сучасних умовах особлива увага приділяється питанням енергозбереження та оптимального використання ресурсів. Інноваційним застосуванням цеолітів є термохімічна акуму-

ляція теплоти. В даний час встановлено [1], що з цією метою доцільно застосовувати цеоліти типу А та Х завдяки їх структурі та складу: цеоліти типу А – низькокремністі форми, у них співвідношення $\text{SiO}_2: \text{Al}_2\text{O}_3$ не вище 2, і в кислій середі вони руйнуються. Для цеолітів типу Х це співвідношення дорівнює 2,2-3,3. Є дані щодо щільності накопичення енергії в цеолітах, які свідчать про перспективність їх застосування як акумулятор теплоти. Так, густина накопичення енергії в цеоліті NaA становить 1370 кДж/кг [2].

Проте для ефективного застосування цеолітів у термохімічних акумуляторах теплоти необхідно вибрати не тільки правильний тип цеоліту, а й організувати регенерацію. Стадія регенерації безпосередньо пов'язана з видаленням вологи із цеолітів, яка здійснюється у процесі сушіння. За даними [3], необхідно видалити з цеолітів не тільки вільну вологу, а й адсорбційно пов'язану. Як було показано в роботах [4, 5], застосування мікрохвильової енергії для підготовки (стадія гідротермальної кристалізації для термоактивації цеолітів, яку зазвичай проводять при 500-700 °С протягом 3-5 год) та регенерації цеолітів, що дозволяє не тільки видалити адсорбційно-пов'язану вологу, але й отримати унікальну внутрішню структуру матеріалу. Завданням роботи було аналітичне дослідження температурного поля у шарі цеолітів 4А та 13Х при мікрохвильовому сушінні.

2. Застосування мікрохвильового сушіння для регенерації цеолітів

Традиційні способи сушіння, такі як конвекційний та кондуктивний, призводять до споживання великої кількості енергії на регенерацію. В результаті система характеризується низькою ефективністю нагріву. Крім того, надмірне підвищення температури під час десорбції викликає низьку адсорбційну здатність адсорбенту до води у наступному процесі адсорбції. Метод використання мікрохвильового випромінювання як джерело тепла для регенерації адсорбційного матеріалу сприймається як стратегія вирішення вищезгаданих проблем [5, 6]. Мікрохвильове нагрівання призводить до нагрівання тільки адсорбенту, що містить адсорбовану воду, без нагрівання навколишнього повітря. Підтверджено [7], що десорбція в процесі сушіння цеолітів в мікрохвильовому полі ефективніше, ніж при нагріванні гарячим повітрям для будь-яких типів цеолітів.

Також визначено, що сушіння в мікрохвильовому полі сприяє зростанню пористості, при цьому сорбційна ємність значно збільшується [8].

В [7] були оцінені характеристики десорбції водяної пари, обумовлені мікрохвильовим нагріванням, рівноважними характеристиками адсорбції і розміром пір різних типів цеолітів. Для оцінки відповідності отриманої моделі реальним фізичним процесам, що проходять при сушінні щільного шару матеріалу в умовах дії внутрішніх джерел теплоти, проведено розрахунки за різних значень коефіцієнтів тепловіддачі α , питомої потужності магнетронів n_0 (позитивне джерело), коефіцієнта температуропровідності матеріалу a .

Для розрахунку мікрохвильового нагріву наперед необхідно знання діелектричних характеристик. Характер діелектричних властивостей природних, модифікованих та опромінених цеолітів експериментально досліджено у [9]. Досліджено діелектричні параметри природного (S-0) та модифікованого Ba^{2+} (зразок S-70) цеоліту. Виміряна діелектрична проникність $\epsilon' = \epsilon - i\epsilon''$ цеоліту залежно від частоти змінного електричного поля інтервалі значень від 220 Гц до 1 МГц. За результатами даних досліджень, на частоті $f = 1$ МГц для природного кліноптилотиту без домішок $\epsilon'' = 17$, $\text{tg}\delta = 0,8$, для кліноптилотиту з домішками Ba^{2+} : $\epsilon'' = 17$, $\text{tg}\delta = 0,08$. Дані за діелектричними характеристиками, що найбільш близько підходять до умов проведення експериментів у наших дослідженнях ($f = 2,869$ ГГц), наведені у [10]. В [11] зазначається, що здатність цеолітів поглинати мікрохвильову енергію залежить від структури каркасу цеоліту, обмінних катіонів, молярного співвідношення кремній/алюміній (Si/Al) та адсорбованих сполук у цеоліті. Встановлено, що центром мікрохвильового поглинання є не вода або поверхневі гідроксильні групи, не кремнезем в цеолітах, а тетраedr, що містить електрон, AlO_4 . Частота МХ поля – 2450 МГц.

Діелектричні властивості цеолітів 4А, диспергованих у силіконовому маслі, вимірюються в діапазоні частот від 40 Гц до 110 МГц [12]. Запропоновано можливі механізми діелектричної релаксації, згідно з якими переносному руху іонів натрію в суперкаркасі сприяє низькочастотна релаксація, а релаксація високочастотна виникає за рахунок стрибків іонів натрію, обмежених активними центрами. Діелектричний аналіз показує, що відповідна концентрація, наявність води в порожнині та частота сильно впливають на рух іона

натрію всередині твердотілого каркасу. А також аналіз фазових параметрів пропонує реальну діелектричну проникність частинки цеоліту в електричному полі та забезпечує точний розрахунок електростатичної взаємодії диполя [12]. У роботі [13] вивчено ефективність регенерації модифікованого зразка адсорбцією/мікрохвильовим нагріванням з метою покращення діелектричних властивостей порівняно з регенерацією вихідного цеоліту мікрохвильовим та звичайним нагріванням. Модифікація збільшила більш ніж у 10 разів діелектричну проникність та коефіцієнт втрат цеоліту, що призвело до збільшення швидкості нагріву (~ 10 разів) та поглинання енергії (~ 3 рази) при мікрохвильовому нагріванні. Швидше нагрівання (в 16 і 5 разів) і швидкість десорбції (в 4 і 8 разів) були отримані при мікрохвильовій регенерації модифікованого цеоліту в порівнянні з мікрохвильовою та звичайною регенерацією вихідного цеоліту. Модифікованому цеоліту потрібно менше часу (в 2 рази) та енергії (в 7,4 рази) для повної

мікрохвильової регенерації порівняно з вихідним цеолітом. Крім того, модифікований зразок показав однакову ефективність мікрохвильової регенерації як полярних, так неполярних адсорбатів. Важливо, що сорбційна здатність суттєво зростає під час мікрохвильового сушіння, використання мікрохвильового нагріву дозволяє проводити процес набагато швидше, чистіше та з меншими енерговитратами порівняно з традиційними методами.

3 Аналітичне дослідження температурного поля шару цеоліту при мікрохвильовому нагріві

Для проведення розрахунків температури цеоліту при його нагріванні у мікрохвильовому полі застосовувалися залежності, наведені в [4]. Діелектричні властивості різних цеолітів наведено в [14]. Фізичні властивості цеоліту 13X наведені в [15]. Вихідні дані для розрахунку нагріву цеоліту 13X наведено у табл. 1.

Таблиця 1 – Дані для розрахунку локальної температури цеоліту 13X у МХ полі

Максимальна питома потужність негативного джерела $q_{\nu 0} \cdot 10^{-3}$, Вт/м ³	4,5	Максимальна питома потужність позитивного джерела $n_0 \cdot 10^{-6}$, Вт/м ³	1,14
Коефіцієнт ослаблення інтенсивності випаровування в шарі β , м ⁻¹	1,25	Коефіцієнт ослаблення електромагнітної енергії в шарі γ , м ⁻¹	17
Коефіцієнт тепловіддачі α , Вт/м ² К	15,0	Частота мікрохвильового електромагнітного поля f , МГц	2450
Теплоємність c , кДж/кг	650	Теплопровідність λ , Вт/м·К	0,20
Середній діаметр гранул d , мм	2	Густина ρ , кг/м ³	660
Пористість гранул	0,60	Порізність шару, ϵ	0,35

Розрахунок проведений для маси цеоліту 200 гр (за заданим значенням маси визначалась потужність внутрішнього джерела теплоти, обумовленого мікрохвильовим нагріванням n_0) для різних відстаней від поверхні: $x = 0$, $x = 0,015$, $x = 0,020$, $x = 0,025$ м. Потужність мікрохвильового поля $P = 350$ Вт. Початковий вміст води $u = 0,2$ кг/кг.

Розрахунки проводилися у припущенні, що діелектричні властивості постійні протягом усього періоду нагрівання і є усередненою величиною. Насправді зростання температури та зменшення води призводять до зниження діелектричних властивостей, за оціночними даними – до 16%, як можна бачити за графіком [16] на стор. 7.

Результати розрахунку температури нагрівання цеоліту у мікрохвильовому полі представлені на рис. 1. Для розрахунку прийнято, що початкова температура цеоліту 13X $t_0 = 20$ °С, температура

навколишнього середовища $t_{н.с.} = 25$ °С.

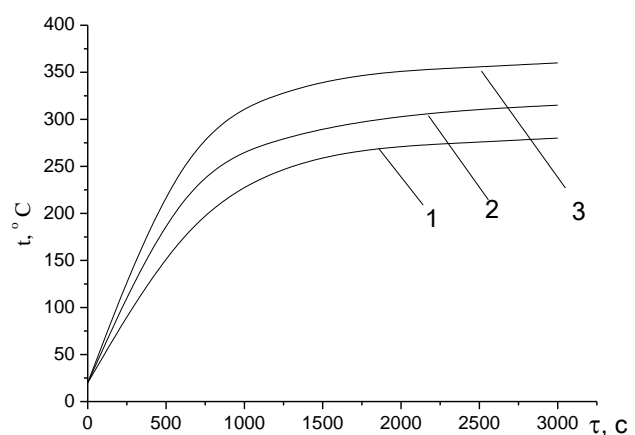


Рисунок 1 – Розрахунок температури нагрівання шару цеоліту при мікрохвильовому сушінні на різній відстані від поверхні: 1 – $x = 0$ м; 2 – $x = 0,015$ м; 3 – $x = 0,02$ м

При фіксованому коефіцієнті тепловіддачі і незначному віддаленні від поверхні температура вище, ніж поверхні. Це пов'язано з тим, що термічний опір теплопровідності R_λ шару цеоліту вище, ніж термічний опір тепловіддачі R_α від поверхні шару в навколишнє середовище: $R_\alpha = 0,067$; $R_\lambda = 0,1 \text{ м}^2\text{К/Вт}$.

4. Оцінка впливу діелектричних характеристик на розподіл температури у шарі

Зниження питомої потужності прямо пропорційно зниженню діелектричних втрат, як впливає із залежності (1) [17], що враховувалося при визначенні цієї величини кожному з цеолітів.

$$P = 5,56 \cdot 10^{-11} \cdot f \cdot \varepsilon'' \cdot E^2, \text{ Вт/м}^3. \quad (1)$$

У роботі прийнято позначення $n_0 = P$.

Величина γ (коефіцієнт ослаблення електромагнітної енергії у шарі) пов'язана з глибиною

проникнення Δ : відповідно до [16]: $\Delta = 1/\gamma$. Тобто зі зростанням зменшується глибина проникнення, що призводить до швидкого згасання електромагнітної енергії. У цьому випадку більшість мікрохвильової енергії поглинеться поверхневими шарами і температура їх буде вищою, ніж при меншому значенні γ . Це відображається результатами розрахунку. Коефіцієнт поглинання розраховується за залежністю (2) [16]:

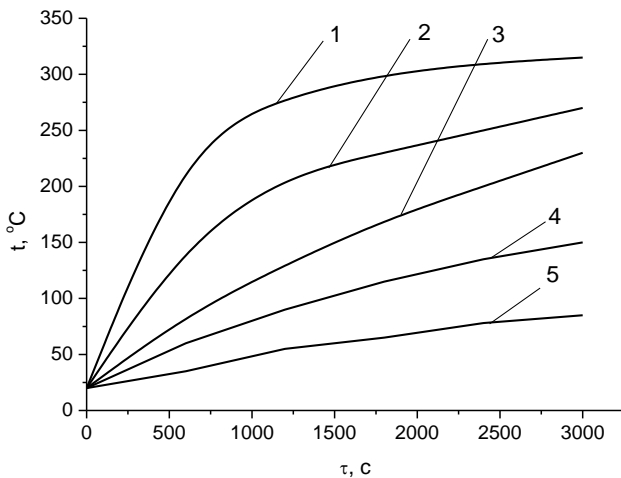
$$\gamma = \frac{2 \cdot \pi}{\lambda_0} \left[\frac{1}{2} \varepsilon' \left(\sqrt{1 + \left(\frac{\varepsilon''}{\varepsilon'} \right)^2} - 1 \right) \right]^{0,5}. \quad (2)$$

Результати розрахунку коефіцієнта поглинання відповідно до літературних даних наведено в табл.2. Довжина хвилі у вакуумі $\lambda_0 = 12,25 \text{ см}$ при $f = 2450 \text{ МГц}$. Зниження питомої потужності прямо пропорційно зниженню діелектричних втрат, що враховувалося щодо цієї величини кожному з цеолітів.

Таблиця 2 – Діелектричні характеристики різних типів цеолітів

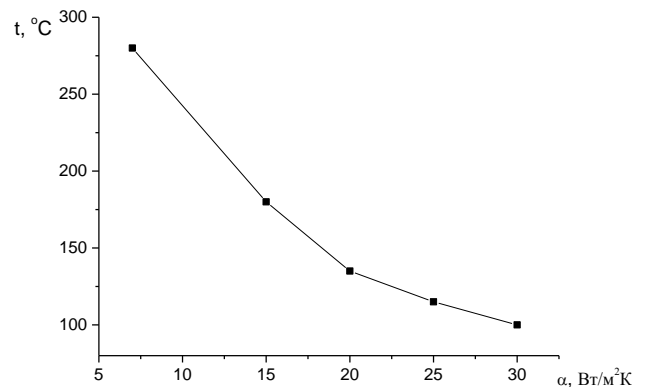
Цеоліт	ε'	ε''	Джерело	γ	$n_{v0} \cdot 10^{-6}, \text{ Вт/м}^3$
NaX	3,5	0,55	(14)	18,65	1,14
NaA1	3,6	0,48	(14)	17,48	0,99
NaA2	3,62	0,36	(10)	15,19	0,75
EST-10	7,3	0,22	(13)	11,97	0,46
Кліноптилоліт	3,66	0,099	(10)	8,04	0,21

Результати розрахунків температури шару для різних типів цеолітів в умовах мікрохвильового нагріву при $x = 0,015 \text{ м}$ наведені на рис.2.



Рисунік 2 – Розрахунок температури шару для різних типів цеолітів в умовах мікрохвильового нагріву при $x = 0,015 \text{ м}$ NaX, NaA1, NaA2, EST-10, кліноптилоліт

Різний темп нагрівання різних цеолітів пов'язаний з їх діелектричними характеристиками, які відображаються в коефіцієнті втрат ε'' .



Рисунік 3 – Вплив коефіцієнта тепловіддачі на температуру поверхні шару цеоліту 13X при $\tau = 1200 \text{ с}$

Так, для NaX $\varepsilon'' = 0,55$; NaA1 – $\varepsilon'' = 0,48$; NaA2 – $\varepsilon'' = 0,36$; EST-10 – $\varepsilon'' = 0,22$; кліноптилоліт – $\varepsilon'' = 0,099$. При цьому NaX характеризується мак-

симальним темпом нагріву 0,35 К/с, а темп нагріву кліноптилоліту становив 0,03 К/с. Таким чином, розрахунки показують суттєвий вплив діелектричних характеристик цеолітів на зростання та розподіл температури у часі, що відповідає фізичній картині процесу. Вплив коефіцієнта тепловіддачі на температуру поверхні демонструється результатами розрахунку, наведеними на рис. 3.

Отримано, що зі збільшенням коефіцієнта тепловіддачі температура поверхні знижується (рис. 3).

Досліджено характер зміни температури поверхні шару цеоліту в умовах дії внутрішнього позитивного джерела теплоти (рис.4).

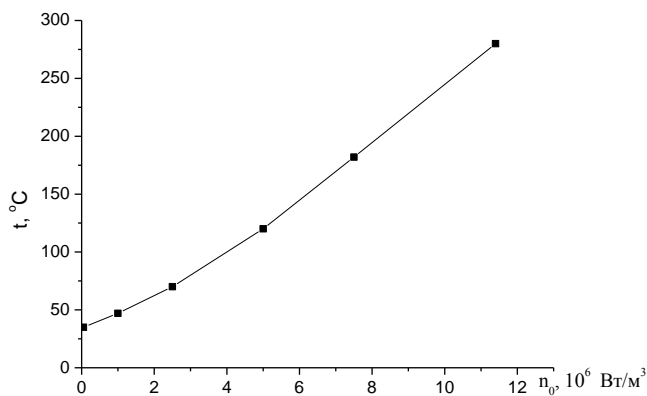


Рисунок 4 – Вплив питомої потужності внутрішнього джерела теплоти (мікрохвильове поле) на температуру цеоліту 13X для $x = 0$, $\alpha = 15 \text{ Вт/м}^2\text{К}$ при $\tau = 1200 \text{ с}$

Розрахунки показали, що збільшення потужності мікрохвильового поля призводить до значного зростання температури цеоліту, що відповідає фізичній картині процесу.

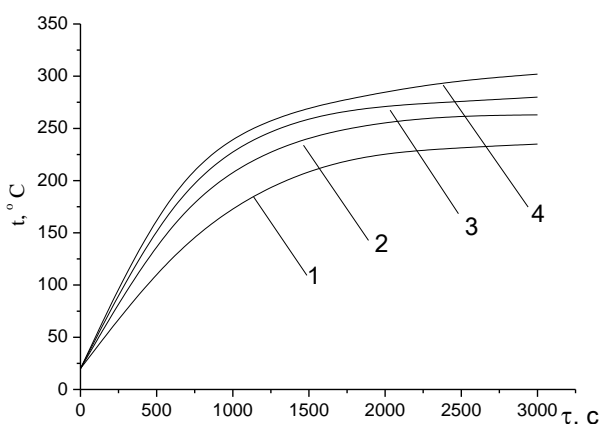


Рисунок 5 – Вплив максимальної потужності негативного джерела на температуру цеоліту 13X для $x=0,015$, $\alpha=\text{Вт/м}^2\text{К}$ при $\tau = 1200 \text{ с}$:
 1 – $q_{v0} = 5,0 \cdot 10^3 \text{ Вт/м}^3$; 2 – $q_{v0} = 4,7 \cdot 10^3 \text{ Вт/м}^3$;
 3 – $q_{v0} = 4,5 \cdot 10^3 \text{ Вт/м}^3$; 4 – $q_{v0} = 4,2 \cdot 10^3 \text{ Вт/м}^3$

Досліджено характер зміни температури в умовах дії негативного джерела теплоти (рис.5). Зі збільшенням його значення температура матеріалу падає, що пов'язано зі втратою енергії за рахунок випаровування.

5. Висновки

Проведена верифікація математичної моделі показала правильне відображення впливу фізичних параметрів на розподіл температури у шарі цеоліту.

Розрахунки показують істотний вплив діелектричних характеристик цеолітів на зростання та розподіл температури у часі, що відповідає фізичній картині процесу. Різний темп нагрівання різних цеолітів пов'язаний з їх діелектричними характеристиками, які відображаються в коефіцієнті втрат ϵ'' . Для NaX $\epsilon'' = 0,55$; NaA1 – $\epsilon''=0,48$; NaA2 – $\epsilon'' = 0,36$; EST-10 – $\epsilon'' = 0,22$; кліноптилоліт – $\epsilon'' = 0,099$. При цьому NaX характеризується максимальним темпом нагріву 0,35 К/с, а темп нагріву кліноптилоліту становив 0,03 К/с.

При фіксованому коефіцієнті тепловіддачі і незначному віддаленні від поверхні температура вище, ніж на поверхні. Це пов'язано з тим, що термічний опір теплопровідності R_λ шару цеоліту вище, ніж термічний опір тепловіддачі R_α від поверхні шару в навколишнє середовище: $R_\alpha = 0,067$; $R_\lambda = 0,1 \text{ м}^2\text{К/Вт}$.

Зі збільшенням потужності негативного джерела теплоти температура матеріалу зменшується, що пов'язано зі втратою енергії за рахунок випаровування.

Особистий внесок авторів CRediT

Бошкова І.Л.: концептуалізація, методологія, формальний аналіз. **Волгушева Н.В.:** методичне забезпечення, комп'ютерне моделювання. **Бошков Л.З.:** аналіз та узагальнення даних. **Бондаренко О.С.:** експериментальні дослідження. **Гречановський А.П.:** інформаційний пошук.

Література

1. **J. Jänchen et al.** Preparation, hydrothermal stability and thermal adsorption storage properties of binderless zeolite beads // International Journal of Low-Carbon Technologies. – 2012. – Vol. 7, No. 4. – P. 275-279.

2. **D. I. Tchernev.** Natural Zeolites in Solar Energy Heating, Cooling, and Energy Storage // *Reviews in Mineralogy and Geochemistry.* – 2001. – Vol. 45(1). – P. 589-617.
3. **E. Gabruś, K. Witkiewicz, J. Nastaj.** Modeling of regeneration stage of 3A and 4A zeolite molecular sieves in TSA process used for dewatering of aliphatic alcohols // *Chemical Engineering Journal.* – 2018. – Vol. 337. – P. 416-427.
4. **І. Бошкова, Н. Волгушева, І. Мукмінов, О. Бондаренко, О. Паскаль.** Вивчення перспектив застосування цеолітів для теплових акумуляторів // *Холодильна техніка та технологія.* – 2021. – Т. 57(3). – С. 196-205.
5. **T. Ohgushi, M. Nagae.** 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.
6. **D. E. Clark, W. H. Sutton.** Microwave processing of materials // *Annual Review of Materials Science.* – 1996. – Vol. 26. – P. 299-331.
7. **T. Ohgushi, M. Nagae.** 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.
8. **J. R. Ugal, K. H. Hassan, I. H. Ali.** Preparation of type 4A zeolite from Iraqi kaolin: Characterization and properties measurements // *Journal of the Association of Arab Universities for Basic and Applied Sciences.* – 2010. – Vol. 9, No. 1. – P. 2-5.
9. **P. Zarrintaj et al.** Zeolite in tissue engineering: Opportunities and challenges // *MedComm.* – 2020. Vol. 1 (1). – P. 5-34.
10. **Ш.В. Хачатрян, Т.А. Геворгян.** Характер діелектричних властивостей природних, модифікованих та опромінених цеолітів // *Журнал технічної фізики.* – 2010. – Т. 80(5). – С. 140-142.
11. **І.С. Єфименко, В.А. Валенкевич, Л.В. Каницька.** Вимірювання діелектричних втрат природних та синтетичних цеолітів // *Сучасні наукові технології.* – 2005. – № 11. – С. 40-41.
12. **J. Dong, L. Xie, X. Jing, H. Xu, F. Wu, J. Hao.** 11-P-13 – Another study on the microwave heating of zeolite without special loading materials // *Studies in Surface Science and Catalysis.* – 2001. – Vol. 135. – P. 210.
13. **W. Zhou, K. S. Zhao.** The study of dielectric properties of 4A zeolites dispersed in silicone oil // *Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects.* – 2008. – Vol. 317, No. 1-3. – P. 10-16.
14. **Pooya Shariaty.** Tailoring Molecular Sieves' Dielectric and Electric Properties for Efficient Microwave and Resistive Heating Regeneration // A thesis submitted in partial fulfillment of the requirements for the degree of Doctor of Philosophy in Environmental Engineering. – 2018. – 235 p.
15. **B. Legras, I. Polaert, L. Estel, M. Thomas** Mechanisms Responsible for Dielectric Properties of Various Faujasites and Linde Type A Zeolites in the Microwave Frequency Range // *Journal of Physical Chemistry C.* – 2011. – Vol. 115, No. 7. – P. 3090-3098.
16. **E. Meloni et al.** MW-Assisted Regeneration of 13X Zeolites after N₂O Adsorption from Concentrated Streams: A Process 17. Intensification // *Energies.* – 2022. – Vol. 15, No. 11. – P. 4119.
17. **X. H. Yang, J. Tang.** *Advances In Bioprocessing Engineering.* – World scientific, 2002. – 184 p.

Отримана в редакції 12.03.2023, прийнята до друку 12.06.2023

Analytical study of the drying process of zeolites 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. An innovative application of zeolites is the thermochemical accumulation of heat, which makes it possible to contribute to solving the issue of energy saving and optimal use of resources. For the effective use of zeolites in thermochemical heat accumulators, it is necessary to choose not only the right type of zeolite, but also to organize their regeneration. The stage of

regeneration is directly related to the removal of moisture from zeolites, which is carried out in the drying process. The sorption capacity increases significantly during microwave drying, the use of microwave heating allows the process to be carried out much faster, cleaner and with lower energy consumption compared to traditional methods. The regeneration process of 4A and 13X zeolites during microwave drying is analytically investigated. On the basis of an analytical review of the literature, the physical and dielectric characteristics of zeolites, necessary for calculations, were determined. The temperature field in the zeolite massif at different distances from the surface was studied, and the influence of a positive (power of the microwave field) and a negative (caused by moisture vapor) heat source was determined. The influence of the type of zeolite (NaX, NaA1, NaA2, EST-10, clinoptilolite) on the intensity of heating was determined. The influence of the heat transfer coefficient on the surface temperature of the array is shown. Calculations confirm that the mathematical model clearly reflects the influence of physical properties on the temperature distribution in the zeolite layer.

Keywords: Dielectric characteristics; Temperature; Type of zeolite; Layer; Specific power

References

1. **Jänchen, J. et al.** (2012) Preparation, hydrothermal stability and thermal adsorption storage properties of binderless zeolite beads. *International Journal of Low-Carbon Technologies*, 7 (4), 275-279.
2. **Tchernev, D. I.** (2001) Natural Zeolites in Solar Energy Heating, Cooling, and Energy Storage. *Reviews in Mineralogy and Geochemistry*, 45(1), 589-617.
3. **Gabruś, E., Witkiewicz, K., Nastaj, J.** (2018) Modeling of regeneration stage of 3A and 4A zeolite molecular sieves in TSA process used for dewatering of aliphatic alcohols. *Chemical Engineering Journal*, 337, 416-427.
4. **Boshkova, I., Volhusheva, N., Mukminov, I., Bondarenko, O., Paskal, O.** (2021). Studying the perspectives of zeolites application for heat accumulators. *Refrigeration Engineering and Technology*, 57(3), 196-205.
5. **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.
6. **Clark, D. E., Sutton, W. H.** (1996) Microwave processing of materials. *Annual Review of Materials Science*, 26, 299-331.
7. **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
8. **Ugal, J. R., Hassan, K. H., Ali, I. H.** (2010) Preparation of type 4A zeolite from Iraqi kaolin: Characterization and properties measurements. *Journal of the Association of Arab Universities for Basic and Applied Sciences*, 9 (1), 2-5.
9. **Zarrintaj, P. et al.** (2020) Zeolite in tissue engineering: Opportunities and challenges. *MedComm*, 1 (1), 5-34.
10. **Hachatrian, SH.V., Gevorgyan, T.A.** (2010) The nature of the dielectric properties of natural, modified and irradiated zeolites. *Journal of technical physics*, 80 (5), 140-142.
11. **Efimenko, I.S., Valenkevich, V.A., Kanickaya, L.V.** (2005) Measurement of dielectric losses of natural and synthetic zeolites. *Modern high technologies*, 11, 40-41.
12. **Dong, J., Xie, L., Jing, X., Xu, H., Wu, F., Hao, J.** (2001) 11-P-13 – Another study on the microwave heating of zeolite without special loading materials. *Studies in Surface Science and Catalysis*, 135, 210.
13. **Zhou, W., Zhao, K. S.** (2008) The study of dielectric properties of 4A zeolites dispersed in silicone oil. *Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects*, 317 (1-3), 10-16.
14. **Pooya Shariaty.** (2018) Tailoring Molecular Sieves' Dielectric and Electric Properties for Efficient Microwave and Resistive Heating Regeneration. A thesis submitted in partial fulfillment of the requirements for the degree of Doctor of Philosophy in Environmental Engineering, 235.
15. **Legras, B., Polaert, I., Estel, L., Thomas, M.** (2011) Mechanisms Responsible for Dielectric Properties of Various Faujasites and Linde Type A Zeolites in the Microwave Frequency Range. *Journal of Physical Chemistry C*, 115 (7), 3090-3098.
16. **Meloni, E. et al.** (2022) MW-Assisted Regeneration of 13X Zeolites after N₂O Adsorption from Concentrated Streams: A Process Intensification. *Energies*, 15 (11), 4119.
17. **Yang, X. H., Tang, J.** (2001) Advances In Bioprocessing Engineering. *World scientific*, 184.

Received 12 March 2023

Approved 12 June 2023

Available in Internet 30 June 2023