

УДК 621.355.9
DOI <https://doi.org/10.32782/2663-5941/2025.5.1/18>

Бошкова І.Л.

Одеський національний технологічний університет

Волгушева Н.В.

Одеський національний технологічний університет

Гречановський А.П.

Одеський національний технологічний університет

Борець С.О.

Одеський національний технологічний університет

Тортіка Д.М.

Одеський національний технологічний університет

ВИВЧЕННЯ ОСОБЛИВОСТЕЙ СУШІННЯ ЦЕОЛІТІВ 13X У МІКРОХВИЛЬОВОМУ ПОЛІ

Доведено, що цеоліти на даний час мають широку сферу використання завдяки своїм властивостям, таким як доступний пустотний простір і велика площа поверхні пір, особливий інтерес представляють цеоліти для термохімічного накопичення теплоти завдяки можливості забезпечувати високу щільність енергії. Відомо, що для багатократного використання цеолітів необхідно здійснити енерго-ефективну та швидку регенерацію, яка базується на процесі десорбції. Наголошується, що регенерація цеолітів є найважливішою стадією, що визначає ефективність всього процесу, у якому бере участь адсорбція. Визначено, що для здійснення процесу регенерації цеолітів може застосовуватися мікрохвильове нагрівання, яке має безліч переваг у порівнянні з конвективним, наприклад, пряме і об'ємне нагрівання опромінюваного матеріалу, а також вибіркове нагрівання, однак регенерація цеолітів в мікрохвильовому полі вивчена недостатньо, особливо в частині енергетичного ефекту взаємодії мікрохвильового поля з досліджуваним матеріалом. Відомо, що брак знань за тепловим ефектом сушіння цеолітів в мікрохвильовому полі є проблемою, яка не дозволяє здійснити їх промислове впровадження в ряді специфічних областей, зокрема, в технологіях термохімічного накопичення теплоти. Наведена методика проведення експерименту та експериментальна установка для дослідження сушіння цеолітів 13 X, частинки яких були різної форми: циліндричної та сферичної, в мікрохвильовому полі. Аналізується зміна температури та вологовмісту за часом, а також результати розрахунку кількості теплоти випаровування води та нагрівання досліджуваного зразка, які визначають корисний тепловий потік. Представлені дані щодо ККД процесу перетворення мікрохвильової енергії в теплову, який визначається як співвідношення корисного теплового потоку і вихідної потужності магнетрону. Визначена важливість раціонального формування шару цеолітів для підвищення енергоефективності процесу дегідратації.

Ключові слова: енергоефективність, мікрохвильове нагрівання, сушіння, вологовміст, температура, теплота.

Постановка проблеми. Інтерес до підготовки цеолітів визначається широкою сферою застосування. Цеоліти застосовуються як ідеальні матеріали в каталізі, адсорбції та біомедицині завдяки своїм властивостям, таким як доступний пустотний простір і велика площа поверхні пір. [1]. Особливий інтерес представляють цеоліти для

термохімічного накопичення теплоти завдяки можливості забезпечувати високу щільність енергії. В його основі лежать процеси одного з двох типів: оборотні реакції та сорбція. Завдяки здатності сорбційних систем зберігати теплову енергію при температурі навколишнього середовища скільки завгодно без втрат тепла, термохімічне накопи-

чення тепла стало широко досліджуваною технологією для сезонного накопичення енергії при низькій температурі (наприклад, для застосування в будинках). Регенерація цеолітів є найважливішою стадією, що визначає ефективність всього процесу, у якому бере участь адсорбція. Проблема швидкої та ефективної десорбції важлива для ефективності адсорбційних реакторів [2]. Мікрохвильове нагрівання в процесі сушіння призводить до нагрівання тільки цеоліту, що містить адсорбовану воду, без нагрівання навколишнього повітря [3, 4].

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Цеоліти є унікальним класом твердих речовин з різноманітними застосуваннями в промислових процесах і для контролю забруднення навколишнього середовища. [5, 6]. Термін «цеоліт» був запропонований шведським мінералогом Акселем Ф. Кронштедтом в 1756 після того, як він спостерігав утворення піни на поверхні зразка мінералу при нагріванні [7]. Мінерал на вигляд «кипів», тому він назвав його «цеолітом», від грецьких слів *zein* «кипити» і *lithos* «камінь». Дамур у 1840 році продемонстрував оборотну гідратацію та дегідратацію цих матеріалів. Цеоліти відносяться до мінералів тектосилікатного типу, деякі з них зустрічаються в природі. Їх чітко визначений розмір пір, можливість зміни складу, термічна стабільність і комерційна доступність сприяли їх широкому використанню в промисловості та побуті, де використовуються їх унікальні властивості.

Найбільш важлива інформація про властивості, методи синтезу та окремі сфери застосування цієї групи алюмосилікатів представлена в [6]. Автори [7] відзначають, що конформація адсорбенту для поліпшення динаміки процесу і масопереносу – ще одна тема досліджень, що заслуговує на ретельний розгляд. Цеоліти мають поверхнево-активні центри кислотно-основного або окислювально-відновного характеру. Це зумовлює їхню виняткову адсорбційну та каталітичну активність [8]. Характерною особливістю цеолітів є наявність мікропор діаметром від 0,3 до 1,0 нм та об'ємом мікропор від 0,10 до 0,35 см³/г. Зазначається, що популярність цеолітів неухильно зростає, а дослідження їх властивостей, методів синтезу та напрямів використання не втрачають своєї актуальності. Про це свідчить постійно зростаюча кількість відомих структур цеолітів, описаних у базі даних INZA (Міжнародна асоціація з природних цеолітів) [9].

Для використання у технологіях термохімічного накопичення теплоти застосовують цеоліти 13X та 4A. Цеоліт 13X має хімічний склад $\text{Na}_2(\text{AlO}_2)_2(\text{SiO}_2)_2(7/2) \cdot x\text{H}_2\text{O}$, із співвідношенням

кремнезему до глинозему (Si/Al) близько 2,6-3,0, тоді як цеоліт 4A, цеоліт типу A, має формулу $\text{Na}_2(\text{AlO}_2)_2(\text{SiO}_2)_2(2) \cdot x\text{H}_2\text{O}$, із співвідношенням Si/Al близько 2. Обидва є алюмосилікатами лужних металів, але їх різні співвідношення Si/Al приводять до різних кристалічних структур та розмірів пор. Синтетичні цеоліти 3A, 4A, 5A і 13X мають назву молекулярні сита – це пористі матеріали, які діють як хімічний фільтр, поділяючи молекули за розміром завдяки своїй мікропористій структурі з рівномірними отворами. Вони вибірково адсорбують (притягують і утримують) молекули, які менші від діаметра їх пір, пропускаючи більші. Молекулярні сита використовуються як осушувачі для видалення вологи та інших розчинників, а також у процесах поділу газів та рідин. Сита 5A і 13X загалом мають схожі характеристики, з деякими відмінностями в деталях, які можуть зумовити перевагу одного з них іншому у випадках застосування [10]. Відносний вміст компонентів залежить від температури та часу активації.

Цеоліти широко використовуються для осушення у промислових та лабораторних масштабах, що обумовлено їх здатністю оборотно адсорбувати воду. Природні та синтетичні цеоліти з низьким вмістом кремнію мають значну гідрофільність [11]. Цеоліти типу A (з комерційними назвами 3A, 4A та 5A) і X (13X) широко використовуються для осушення газових та рідких потоків, в основному в процесах адсорбції при змінній температурі (TSA), але у випадку 13X також у процесах адсорбції при змінному тиску (PSA) [12]. Сушіння є одним із найраніших застосувань, де цеоліти успішно використовувалися як адсорбенти [13].

В останні роки відзначається зростаючий інтерес до цеолітових теплоаккумуляторів [14]. Цеолітові теплоаккумулятори – це хімічні накопичувачі, які здатні досягти щільності енергії 150–200 кВт год м⁻³ та практично без втрат енергії протягом сезону [15, 16]. Результати дослідження теплоакмулюючого цеоліту та оцінка ключових параметрів, отриманих на основі експериментальних результатів з NaY, представлені в роботі [16].

Регенерація цеолітів є найважливішою стадією, що відповідає за ефективність багаторазового використання цеолітів та визначається якістю процесу. Для цього необхідно вирішити проблему швидкої та ефективної десорбції. Для здійснення процесу десорбції цеолітів може застосовуватися мікрохвильове нагрівання, яке має безліч переваг у порівнянні з конвективним, наприклад, пряме і об'ємне нагрівання опромінюваного матеріалу, а також вибіркоче нагрівання [17]. Через низьку

теплопровідність цеоліту ($\sim 0,1\text{--}0,2\text{ Вт/м К}$) виникають значні обмеження при нагріванні та охолодженні у кондуктивному та конвективному методі, що призводить до зниження ефективності та збільшення часу зарядки. У разі мікрохвильового нагріву на енергоефективність впливають ККД перетворення електричної енергії на мікрохвилю та ККД перетворення мікрохвиль на тепло. Якщо перший характерний для використовуваного магнетрона та є незмінним, то другий визначається умовами процесу. Природно, що чим вище ККД, тим краще економічні показники мікрохвильового нагріву. Відповідні енергетичні аспекти МХ-регенерації цеолітів розглядалися рядом дослідників [4, 17, 18]. Зазначається [19], що застосування мікрохвильового нагріву дозволяє вести процес набагато швидше, чистіше та з нижчою енергоємністю порівняно з традиційними методами. Результати [20] підтверджують, що мікрохвильове нагрівання не погіршує адсорбційні властивості цеолітів, оскільки наступні випробування виявили ідеальну відтворюваність результатів адсорбції та десорбції.

Аналіз наведених літературних даних показує, що застосування мікрохвильового нагріву для сушіння цеолітів характеризується важливими перевагами в порівнянні з конвективним та кондуктивним методом, проте не вистачає експериментальних даних за кінетикою сушіння та перерозпо-

ділом теплових потоків в процесі МХ обробки для цеолітів, які визнані як раціональні в технологіях термохімічного накопичення теплоти.

Метою статті є визначення ефективності мікрохвильового сушіння щільного шару цеолітів 13X з різною формою зерен на підставі порівняльного аналізу ККД перетворення енергії мікрохвильового електромагнітного поля у внутрішню енергію матеріалу. Для досягнення мети роботи проведені експериментальні дослідження кінетики сушіння шару цеолітів з циліндричною формою зерен $13X_c$ та зі сферичною формою $13X_s$, на підставі теплових розрахунків здійснено порівняння інтенсивності зміни вологовмісту та температури, проведений аналіз перерозподілів теплових потоків на нагрівання матеріалу та випаровування води в процесі сушіння, визначений вплив товщини шару на ефективність перетворення мікрохвильової енергії в теплову.

Виклад основного матеріалу. Експериментальні дослідження проводилися на лабораторній установці, схема якої представлена на рис. 1. Для рівномірного нагрівання матеріалу застосовують його переміщення за об'ємом робочої камери.

У робочу камеру прямокутного перерізу розмірами $306 \times 201 \times 322$ мм надходила енергія через хвилевід від магнетрона з частотою генерації 2,45 ГГц і потужністю 800 Вт. Конструкція мікрохвильової (МХ) камери дозволяла одночасно з під-

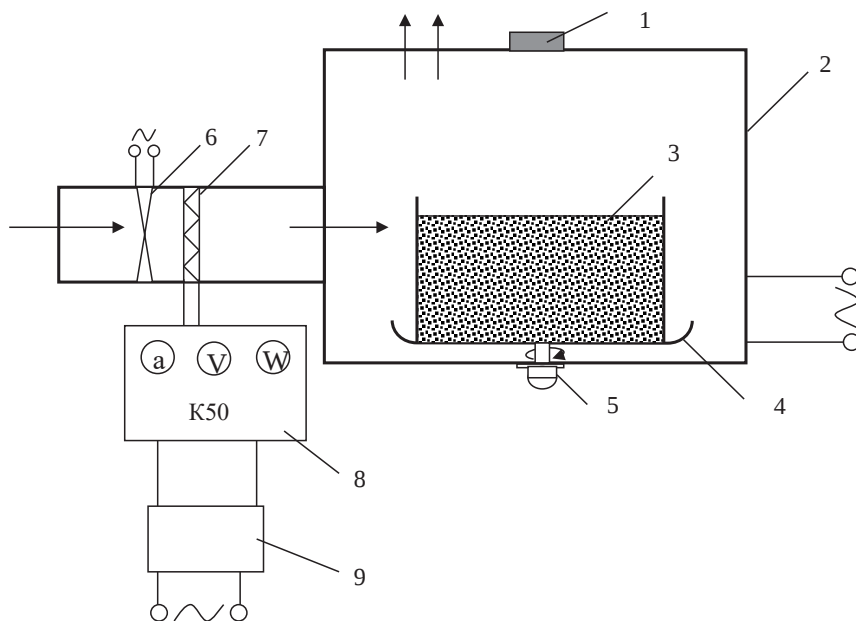


Рис. 1. Схема експериментальної установки для дослідження процесу сушіння в мікрохвильовому полі [18]: 1 – хвилевід; 2 – робоча камера; 3 – експериментальна комірка; 4 – підставка; 5 – механізм приводу; 6 – вентилятор; 7 – нагрівач; 8 – вимірювальний комплект; 9 – регулятор напруги

веденням МХ енергії здійснювати продування повітря над шаром. В експериментальну комірку поміщався досліджуваний матеріал, який оброблявся в мікрохвильовій камері. Через інтервали часу 30 с ваговим методом визначалася поточна маса цеоліту і розраховувалася кількість вологи, що випарувалася, і вологовміст цеоліту.

Вимірювання температури проводилися за допомогою мультиметра АССТА АТ-280, щуп якого розташовувався у шарі цеоліту безпосередньо відразу після вимкнення магнетрону. Похибка визначення середньоінтегрального вологовмісту складала $\pm 2,7\%$, середньої температури шару $\pm 3,5\%$. Дослідження проводилися на цеолітах 13Х, частинки яких були різної форми: циліндричної – 13Х_ц (рис. 2а) та сферичної – 13Х_с (рис. 2б).



а)



б)

Рис. 2. Цеоліти, обрані для проведення експерименту: а – 13Х_ц, частинки циліндричної форми, б – 13Х_с, частинки сферичної форми

При обробці даних визначають такі величини:
– маса вологи, яка випарувалася:

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

– поточний вологовміст:

$$u_i = \frac{m_{\text{вол.}i}}{m_{\text{сух}}}, \text{ кг/кг} \quad (2)$$

де $m_{\text{вол.}i}$ – маса вологи в матеріалі на i -му вимірі, $m_{\text{сух}}$ – маса сухого матеріалу.

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

$$Q_{\text{кор}} = (\Delta m_i \cdot r + m_i \cdot c_{\text{вол.}i} \cdot \Delta t) / \tau_i, \text{ Вт} \quad (3)$$

де r – питома теплота пароутворення, $c_{\text{вол.}i}$ – теплоємність вологого матеріалу, τ_i – час i -ї обробки, Δt – зміна температури цеоліту.

ККД процесу перетворення мікрохвильової енергії в теплову, який визначався як співвідношення корисного теплового потоку і вихідної

потужності магнетрону P , дозволяє оцінити ефективність використання мікрохвильової енергії:

$$\eta = \frac{Q_{\text{кор}}}{P}, \% \quad (4)$$

Результати розрахунку характеристик сушіння цеоліту 13Х_с в мікрохвильовому полі наведена в табл. 1, де u – вологовміст, $c_{\text{вол.}i}$ – теплоємність вологого цеоліту, $m_{\text{ц}}$ – маса вологого цеоліту, Δm – маса води, що випарувалася.

Таблиця 1

Результати експериментального дослідження сушіння цеоліту 13Х_с у мікрохвильовому полі

$\tau, \text{с}$	$m_{\text{ц}}, \text{г}$	$\Delta m, \text{г}$	$t, ^\circ\text{C}$	$u, \text{кг/кг}$	$c_{\text{вол.}i}, \text{кДж/кг}\cdot\text{K}$	ККД
0	100	-	22,8	0,163	1,5216	
30	99	1	61	0,151	1,4832	0,33
60	98	1	85	0,140	1,4464	0,24
90	95	3	99	0,105	1,336	0,36
120	93	2	120	0,081	1,2592	0,29
150	92	1	145	0,070	1,22336	0,31
180	89	3	170	0,035	1,11168	0,38

Середній ККД перетворення МХ енергії в теплову складає 31%. Відносно низький ККД обумовлений малою товщиною шару, яка складала $\delta = 5$ мм. Питома теплоємність шару вологого цеоліту $c_{\text{вол.}i}$ розраховувалася за правилом адитивності з урахуванням вологовмісту u :

$$c_{\text{вол.}i} = c_{\text{сух.ц}}(1-u) + c_{\text{в}} \cdot u, \quad (5)$$

де $c_{\text{сух.ц}}$ – теплоємність сухого цеоліту, $c_{\text{в}}$ – теплоємність води.

На рис. 3 представлена діаграма розподілу теплоти, яка витрачається на випаровування води та нагрівання цеоліту 13Х_с масою 100 г в задані проміжки часу при МХ сушінні. Витрата теплоти на випаровування води з шару цеоліту визначається першим доданком в рівнянні (3), а витрата теплоти на нагрівання другим доданком.

Аналіз діаграми показує, що на початку процесу сушіння більша частка енергії від магнетрону витрачається на нагрівання цеолітів, а менша – на випаровування вологи. При $t \geq 90$ с значно зростає витрата теплоти на випаровування, що пов'язано з ростом температури шару (табл. 1).

Результати розрахунку характеристик сушіння цеоліту 13Х_ц в мікрохвильовому полі наведена в табл. 2.

Середній ККД перетворення МХ енергії в теплову складає 30%. Товщина шару, як і для шару цеоліту 13Х_с, складала $\delta = 5$ мм. Для визначення впливу товщини шару на ефективність

Таблиця 2

Результати експериментального дослідження сушіння цеоліту 13X_ц в мікрохвильовому полі

τ , с	$m_{ц}$, г	Δm , г	t , °C	u , кг/кг	$C_{вол.і}$, кДж/кг·K	ККД
0	100		23,3	0,124	1,3968	
30	99	1	51	0,112	1,3584	0,25
60	98	1	140	0,090	1,288	0,46
90	95	3	150	0,067	1,2144	0,33
120	93	2	165	0,045	1,144	0,25
150	92	1	170	0,034	1,1088	0,21

перетворення МХ енергії в теплову були проведені експерименти з шаром цеолітів з тою же масою (100 г), але з більшою товщиною шару $\delta=22$ мм за рахунок використання експериментальної комірки меншого діаметра. Отримано, що ККД зросло до 50%, тобто в 1,7 рази. Це свідчить

про важливість раціонального формування шару зі створенням умов для вільного виходу вологи в процесі сушіння. Надмірне збільшення товщини шару призводить до погіршення процесу сушіння внаслідок утруднення виходу вологи із шару, тому необхідно знаходити оптимальну товщину шару з урахуванням його діелектричних характеристик.

В процесі сушіння шару цеоліту вологовміст стрімко падає (табл. 1, табл. 2), проте температура цеолітів на протязі всього експерименту зростає, що дозволяє зробити висновок про високий коефіцієнт діелектричних втрат цеоліту 13X.

На рис. 4 представлена діаграма розподілу теплоти, яка витрачається на випаровування води та нагрівання цеоліту 13X_ц масою 100 г в задані проміжки часу при МХ сушінні.

Отримано, що ККД мікрохвильового сушіння цеолітів 13X_с та 13X_ц практично не відрізняється,

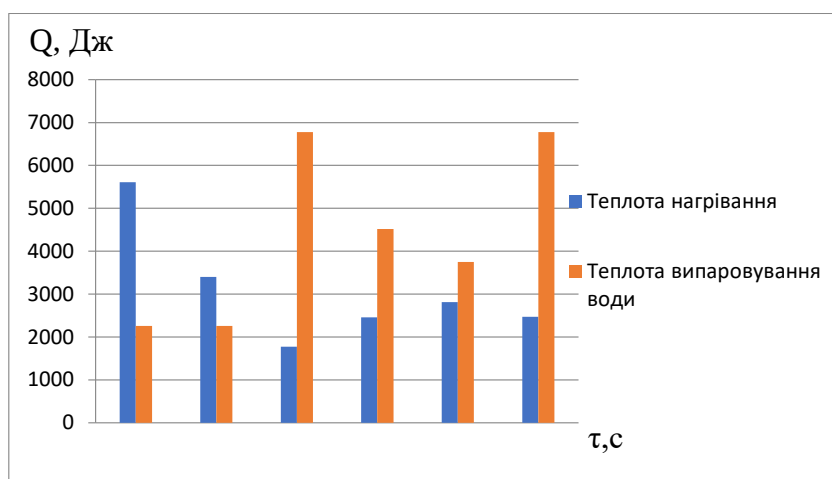


Рис. 3. Діаграма розподілу теплоти випаровування води та нагрівання цеоліту 13X_с масою 100 г в задані проміжки часу при сушінні в МХ полі

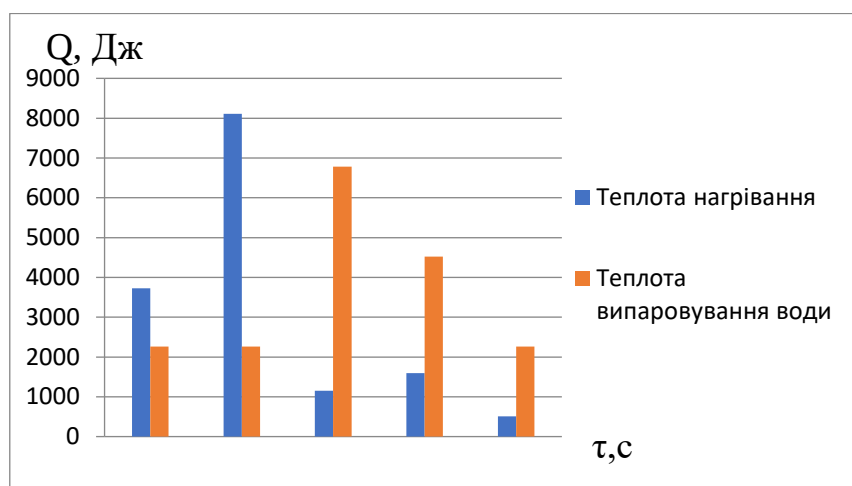


Рис. 4. Діаграма розподілу теплоти випаровування води та нагрівання цеоліту 13X_ц масою 100 г в задані проміжки часу при сушінні в МХ полі

внаслідок чого можна зробити висновок, що форма зерен не впливає на інтенсивність сушіння.

В ході досліджень спостерігалось, що цеоліт $13X_c$ характеризується більшою міцністю в порівнянні з $13X_{ц}$. В результаті багаторазового сушіння в МХ полі не виявлено руйнування зерен $13X_c$, в той же час в шарі цеоліту $13X_{ц}$ було виявлено наявність пилу, що свідчить про деяке руйнування зерен. Це пов'язано з різними виробниками та різними технологічними режимами виробництва.

Висновки. При мікрохвильовому сушінні цеолітів сферичної форми зерен $13X_c$ та зерен циліндричної форми $13X_{ц}$ не виявлено суттєвих відмінностей в інтенсивності зміни вологовмісту та температури.

При товщині шару $\delta=5$ мм цеолітів $13X_c$ та $13X_{ц}$ масою 100 г середній ККД перетворення

МХ енергії в теплову складає 30%. Зі збільшенням товщини шару до $d=22$ мм ККД зросло до 50%, тобто в 1,7 рази. Це свідчить про важливість раціонального формування шару зі створенням умов для вільного виходу вологи в процесі сушіння.

Надмірне збільшення товщини шару призводить до погіршення процесу сушіння внаслідок утруднення виходу вологи з шару, тому необхідно знаходити оптимальну товщину шару з урахуванням його діелектричних характеристик.

Цеоліт $13X_c$ характеризується більшою міцністю в порівнянні з $13X_{ц}$. В результаті багаторазового сушіння в МХ полі не виявлено руйнування зерен $13X_c$, в той же час в шарі $13X_{ц}$ було виявлено наявність пилу внаслідок часткового руйнування зерен цеоліту.

Список літератури:

1. Microwave synthesis of zeolites and their related applications / X. Zeng et al. *Microporous and Mesoporous Materials*. 2021. Vol. 323. P. 111262. URL: <https://doi.org/10.1016/j.micromeso.2021.111262>
2. Cherbański 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. URL: <https://doi.org/10.1016/j.ccep.2008.01.004>.
3. The Development and Application of Microwave Heating / ed. by W. Cao. InTech, 2012. 226 p. URL: <https://doi.org/10.5772/2619>.
4. Intensification of TSA processes using a microwave-assisted regeneration step / E. Meloni et al. *Chemical Engineering and Processing – Process Intensification*. 2021. Vol. 160. P. 108291. URL: <https://doi.org/10.1016/j.ccep.2020.108291>.
5. Rhodes C. J. Properties and applications of Zeolites. *Science Progress*. 2010. Vol. 93, no. 3. P. 223–284. URL: <https://doi.org/10.3184/003685010x12800828155007>.
6. Kordala N., Wyszowski M. Zeolite Properties, Methods of Synthesis, and Selected Applications. *Molecules*. 2024. Vol. 29, no. 5. P. 1069. URL: <https://doi.org/10.3390/molecules29051069>.
7. Pérez-Botella E., Valencia S., Rey F. Zeolites in Adsorption Processes: State of the Art and Future Prospects. *Chemical Reviews*. 2022. P. 17647–17695. URL: <https://doi.org/10.1021/acs.chemrev.2c00140>.
8. Modification of Gold Zeolitic Supports for Catalytic Oxidation of Glucose to Gluconic Acid / A. Walkowiak et al. *Materials*. 2021. Vol. 14, no. 18. P. 5250. URL: <https://doi.org/10.3390/ma14185250>.
9. The International Natural Zeolite Association (INZA). URL: <https://www.inza.it/>.
10. Cowper C. J. Gas analysis: gas chromatography. *Encyclopedia of Separation Science*. 2000. P. 2925–2932. URL: <https://doi.org/10.1016/b0-12-226770-2/00491-9>.
11. Sircar S. Drying Processes. *Handbook of Porous Solids*. Weinheim, Germany. P. 2533–2567. URL: <https://doi.org/10.1002/9783527618286.ch32>.
12. Zeolites and Other Adsorbents / E. Pérez-Botella et al. *Nanoporous Materials for Gas Storage*. Singapore, 2019. P. 173–208. URL: https://doi.org/10.1007/978-981-13-3504-4_7.
13. MgBemere, H.E.; Ekpe, I.C.; Lawal, G.I. Zeolite synthesis, characterizations, and application areas: A review. *Int. Res. J. Environmental Sci.* 2017. Vol. 6(10). P. 45–59.
14. Adsorption performance and thermodynamic analysis of SAPO-34 silicone composite foams for adsorption heat pump applications / L. Calabrese et al. *Materials for Renewable and Sustainable Energy*. 2018. Vol. 7, no. 4. URL: <https://doi.org/10.1007/s40243-018-0131-y>.
15. Erprobung eines thermochemischen Langzeitwärmespeichers auf Basis eines Zeolith/Salz-Komposits / T. Nonnen et al. *Chemie Ingenieur Technik*. 2016. Vol. 88, no. 3. P. 363–371. URL: <https://doi.org/10.1002/cite.201500136>.
16. Zeolite Heat Storage: Key Parameters from Experimental Results with Binder-Free NaY / S. Rönsch et al. *Chemical Engineering & Technology*. 2020. Vol. 43, no. 12. P. 2530–2537. URL: <https://doi.org/10.1002/ceat.202000342>.

17. Cherbański R. Calculation of Critical Efficiency Factors of Microwave Energy Conversion into Heat. *Chemical Engineering & Technology*. 2011. Vol. 34, no. 12. P. 2083–2090. URL: <https://doi.org/10.1002/ceat.201100405>.
18. Експериментальне дослідження сушіння цеоліту «4а» у мікрохвильовому полі / І. Л. Бошкова та ін. *Refrigeration Engineering and Technology*. 2023. Т. 59, № 3. С. 197–204. URL: <https://doi.org/10.15673/ret.v59i3.2658>.
19. Microwave-induced regeneration of activated carbons polluted with phenol. A comparison with conventional thermal regeneration / C. O. Ania et al. *Carbon*. 2004. Vol. 42, no. 7. P. 1383–1387. URL: <https://doi.org/10.1016/j.carbon.2004.01.010>.
20. Experimental and Numerical Assessment of a Novel All-In-One Adsorption Thermal Storage with Zeolite for Thermal Solar Applications / M. Di Palo et al. *Applied Sciences*. 2020. Vol. 10, no. 23. P. 8517. URL: <https://doi.org/10.3390/app10238517>.

Boshkova I.L., Volgusheva N. V., Hrechanovskyi A.P., Borets S.O., Tortika D.M. STUDY OF THE DRYING FEATURES OF ZEOLITES 13X IN A MICROWAVE FIELD

It is proven that zeolites currently have a wide range of applications due to their properties, such as available void space and large pore surface area, zeolites are of particular interest for thermochemical heat storage due to the ability to provide high energy density. It is known that for repeated use of zeolites, it is necessary to carry out energy-efficient and fast regeneration, which is based on the desorption process. It is emphasized that the regeneration of zeolites is the most important stage that determines the efficiency of the entire process in which adsorption is involved. It is determined that microwave heating can be used to carry out the regeneration process of zeolites, which has many advantages compared to convective heating, for example, direct and volumetric heating of the irradiated material, as well as selective heating, however, the regeneration of zeolites in a microwave field has not been studied sufficiently, especially in terms of the energy effect of the interaction of the microwave field with the material under study. It is known that the lack of knowledge about the thermal effect of drying zeolites in a microwave field is a problem that does not allow their industrial implementation in a number of specific areas, in particular, in technologies of thermochemical heat storage. The experimental methodology and experimental setup for studying the drying of zeolites 13 X, the particles of which were of different shapes: cylindrical and spherical, in a microwave field are presented. The change in temperature and moisture content over time is analyzed, as well as the results of calculating the amount of heat of moisture evaporation and heating of the sample under study, which determine the useful heat flux. Data are presented on the efficiency of the process of converting microwave energy into heat, which is defined as the ratio of the useful heat flux and the output power of the magnetron. The importance of rational formation of the zeolite layer for increasing the energy efficiency of the dehydration process is determined.

Key words: energy efficiency, microwave heating, drying, moisture content, temperature, heat.

Дата надходження статті: 05.09.2025

Дата прийняття статті: 16.09.2025

Опубліковано: 16.12.2025