

---

---

## ТЕПЛОМАСООБМІН

---

---

УДК 621.355.9

<https://doi.org/10.18524/0367-1631.2026.64.361467>

**Гречановський А. П.**

Одеський національний технологічний університет, Одеса, Україна

E-mail: [grechanovskey62@gmail.com](mailto:grechanovskey62@gmail.com)

ORCID iD: <https://orcid.org/0000-0002-8257-5769>

### Вплив мікрохвильової дегідратації на теплоту сорбції цеолітів типу А

Представлені нові експериментальні дані щодо кінетики сушіння та енергетичних характеристик цеолітів типу А (3А, 4А, 5А) у процесі мікрохвильової регенерації, що є ключовим етапом функціонування термохімічних акумуляторів теплоти. Отримано, що цеоліт 5А характеризується найвищою швидкістю сушіння ( $6,55 \cdot 10^{-4}$  1/с), темпом нагрівання (1,98 К/с) та ефективністю використання мікрохвильової енергії (0,56), що обумовлено більшим розміром пор та покращеними умовами дифузії водяної пари. Водночас показано, що інтенсифікація процесу сушіння супроводжується зниженням питомої теплоти сорбції (до 87 кДж/кг) та механічною деградацією гранул після першого циклу десорбції–сорбції, що обмежує практичне застосування цього матеріалу в умовах циклічної експлуатації. Отримано, що цеоліт 3А демонструє найвищу питому теплоту сорбції (165 кДж/кг) серед досліджених зразків, що пояснюється ефектом просторового обмеження та більш інтенсивною взаємодією молекул води з поровою структурою. Показано, що збільшення тривалості мікрохвильової обробки до 360 с і досягнення температури близько 400 °С приводить до зростання теплоти сорбції до 204,4 кДж/кг, що свідчить про поглиблену активацію адсорбенту. Проаналізовано вплив структурних характеристик цеолітів на ефективність перетворення мікрохвильової енергії в теплову та на кінетику десорбції. Доведено, що для застосування у термохімічних системах акумулювання теплоти найбільш перспективним є цеоліт 3А, який забезпечує максимальну енергоемність, тоді як цеоліт 5А доцільніше використовувати в процесах, де пріоритетною є швидкість сушіння. Обґрунтовано доцільність оптимізації режимів мікрохвильової регенерації та конструктивного вдосконалення установок (зокрема, шляхом організації продувки шару газом) для підвищення ефективності дегідратації та стабільності адсорбентів.

**Ключові слова:** цеоліти, мікрохвильове сушіння, термохімічна акумуляція теплоти, енергоефективність, експеримент, вологовміст, температура.

**Вступ.** Стійкий розвиток сучасної енергетики передбачає активне впровадження технологій акумулювання теплової енергії, здатних компенсувати нерівномірність надходження енергії з відновлюваних джерел. Серед різноманітних систем накопичення тепла особливу увагу привертають термохімічні акумулятори на основі цеолітів, які вирізняються високою щільністю енергії та принциповою можливістю тривалого, зокрема сезонного, зберігання теплоти без самовільних втрат [1, 2]. В основі роботи таких акумуляторів лежать процеси адсор-

бції та десорбції вологи, при цьому найважливішою стадією, що визначає ефективність усього циклу, є регенерація адсорбенту. Традиційні конвективні та кондуктивні методи сушіння характеризуються низькою енергоефективністю, значною тривалістю та ризиком термічного пошкодження структури цеоліту, що призводить до поступового зниження його сорбційної ємності. У зв'язку з цим, значний науковий і практичний інтерес викликає застосування мікрохвильового випромінювання для дегідратації цеолітів, яке забезпечує об'ємне, селективне та швидке нагрівання матеріалу без нагрівання навколишнього середовища та обладнання.

**Постановка проблеми.** Незважаючи на визнані переваги мікрохвильової регенерації, існує проблема недостатньої вивченості кінетики сушіння та теплових ефектів для широкого класу промислово важливих цеолітів типу А. В літературі представлені обмежені експериментальні дані щодо порівняльного аналізу процесів десорбції в мікрохвильовому полі для цеолітів, що відрізняються розміром пор, таких як 3А, 4А та 5А. Бракує інформації про вплив структурних особливостей цих молекулярних сит на динаміку зміни вологовмісту та температури, а також на ефективність перетворення мікрохвильової енергії в теплову. Визначення цих закономірностей є ключовим для вибору найбільш раціонального типу адсорбенту та оптимізації параметрів процесу регенерації в теплоакмулювальних системах.

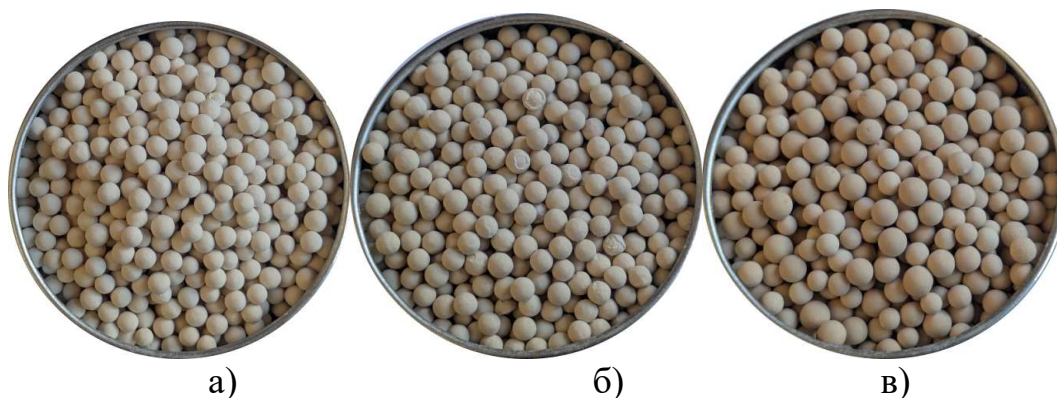
**Аналіз останніх досліджень та публікацій.** Цеоліти завдяки унікальній пористій структурі, наявності регулярного пустотного простору, розвиненій пористій структурі, значній питомій поверхні [3, 4] та високій селективності до молекул води знаходять широке застосування в сучасних технологіях [5]. Досить затребуваними є цеоліти типів 3А, 4А та 5А, які використовуються як ефективні адсорбенти, молекулярні сита, іонообмінники та каталізатори в нафтохімії, газовій промисловості та системах водоочищення [3, 6]. Особливий інтерес представляє використання цих цеолітів у термохімічній акумуляції теплоти, що дозволяє забезпечувати високу щільність зберігання енергії та тривалий час її утримання без втрат. У роботі [1] розглядаються термохімічні матеріали для накопичення енергії на основі сорбції, зосереджуючись на матеріалах у діапазоні низьких та середніх температур. В огляді [2] наведено ключові властивості матеріалів для зберігання тепла, включаючи цеоліти. Основний акцент зроблено на адсорбції в пористих носіях, механізмах та матеріалах для низькотемпературних застосувань. Автори [7] аналізують обмеження (включаючи ефективність та конструкцію) використання цеоліту 13Х у житловому секторі, в роботі зроблено висновок, що для виправдання споживання енергії системою слід визначити та впровадити більш доступні енергетичні ресурси. Загалом, використання цеолітової системи термохімічного акумулювання енергії як системи опалення здається можливим, причому ця система готова стати серйозним конкурентом для сучасних опалювальних приладів на ринку житлового будівництва. Відомо, що ключову роль у таких системах відіграє теплота сорбції, яка виділяється при взаємодії цеоліту з водою, однак її чисельні значення суттєво залежать від типу цеоліту, умов

активації та методики експерименту [8-10]. Ключовим етапом забезпечення ефективного функціонування таких систем є процес регенерації цеолітів, що передбачає видалення адсорбованої вологи шляхом сушіння. Серед сучасних методів дегідратації особливу увагу привертає мікрохвильове нагрівання, яке забезпечує об'ємний характер підведення енергії, інтенсифікацію масо- та теплопереносу, а також скорочення тривалості процесу в порівнянні з традиційними конвективними методами. Разом з тим, питання енергетичної ефективності мікрохвильового сушіння цеолітів та впливу умов обробки на їх подальші сорбційні властивості залишаються недостатньо дослідженими. Особливий інтерес становить визначення питомої теплоти сорбції при взаємодії дегідратованих цеолітів з водою, оскільки цей параметр є визначальним для оцінки їх теплоакумулювальної здатності. При цьому тепловий ефект адсорбції залежить як від типу цеоліту, так і від умов його попередньої підготовки, зокрема режимів сушіння, що впливають на структуру порового простору та доступність активних центрів.

В роботі [8] підкреслюється, що 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. В [9] підтверджено, що чисті цеоліти демонструють високу здатність до зберігання тепла та води, а також високу стабільність характеристик зберігання. Авторами [10] запропоновано стратегію перезаряджання рідкою водою для композитних теплоакумулювальних матеріалів на основі цеоліту SAPO-34. Досягнуто рекордну щільність енергії  $>1.6$  кДж/г та стабільність протягом  $>100$  циклів. Системне дослідження цеолітів, імпрегнованих  $MgSO_4$ ,  $MgCl_2$ ,  $LaCl_3$  та  $CaCl_2$  показало, що максимальна щільність зберігання тепла досягає 638.9 Дж/г з 30%  $MgCl_2$  [11]. Композит на основі цеоліту 13X показав сорбційну здатність 0.21 г/г (на 24% вище за чистий цеоліт) і щільність зберігання тепла 438.4 кДж/кг. Додаткові експерименти підтвердили покращення характеристик при додаванні  $MgSO_4$  [12]. Автори [13] експериментально досліджували вплив вологості та витрати повітря на теплову потужність та кінетику адсорбції цеоліту 13X у системах термохімічного зберігання теплоти. Була розроблена числова модель для дослідження кінетики адсорбції цеоліту 13X та води, яка підтверджена експериментами з перепаду тиску та тимчасових змін температури. Збільшення абсолютної вологості та швидкості потоку прискорює адсорбції цеоліту, що призводить до скорочення часу розрядки.

**Метою роботи** є експериментальне дослідження кінетики сушіння в процесі мікрохвильового нагрівання щільного шару сферичних гранул цеолітів 3A, 4A та 5A та оцінка їх сорбційно-енергетичних характеристик, зокрема питомої теплоти сорбції після дегідратації

**Виклад основного матеріалу.** Методика експериментальних досліджень процесу сушіння цеолітів в мікрохвильовому полі та схема лабораторній установки представлені в роботі [8]. Дослідження проводились на цеолітах типу А, виробник цеолітів – Китай, загальний вигляд яких наведено на рис. 1. Вихідна потужність магнетрону в експерименті складала 800 Вт, маса вологого матеріалу



а) б) в)  
**Рис.1.** Фото цеолітів, що досліджувались в роботі  
 а) – 3А; б) – 4А; в) – 5А.

**Таблиця.** Порівняльні характеристики різних типів цеоліту

Тип цеоліту	Діаметр гранул, мм	Насипна щільність, кг/м <sup>3</sup>	Швидкість сушіння, 1/с	Темп нагрівання, К/с	Ефективність	Теплота сорбції, кДж/кг
3А	3.71	758	$3.46 \cdot 10^{-4}$	1.86	0.37	165
4А	4.58	826	$3.59 \cdot 10^{-4}$	1.43	0.41	100.7
5А	4.85	865	$6.55 \cdot 10^{-4}$	1.98	0.56	87

70 г. Досліджуваний матеріал у керамічному тигелі розміщувався в мікрохвильовій камері. В процесі сушіння з інтервалом 15 с зразок діставали з камери та визначали масу втраченої вологи шляхом зважування на електронних вагах ТВЕ-0.5-0. 01. Температуру вимірювали мультиметром АССТА АТ-280, термошуп якого одразу після вимкнення магнетрона занурювали в шар цеоліту.

Ефективність використання мікрохвильової енергії при сушінні цеолітів оцінювалась за формулою:

$$\eta = \frac{Q_{кор}}{P} \tag{1}$$

де  $Q_{кор}$  – кількість мікрохвильової енергії, що пішла на нагрівання вологого цеоліту, експериментальної комірки та випаровування вологи;  $P$  – вихідна потужність магнетрону

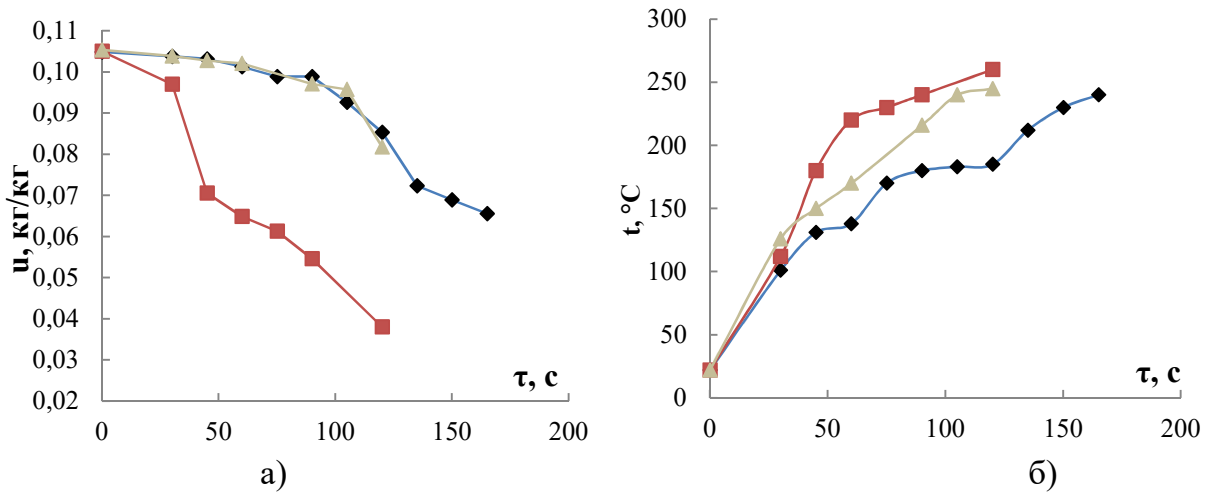
Швидкість сушіння щільного шару цеоліту в періоді постійної швидкості (другий період) розраховувалась за формулою:

$$N = \frac{du}{d\tau} = \frac{u_1 - u_2}{\Delta\tau}, \text{ 1/с} \tag{2}$$

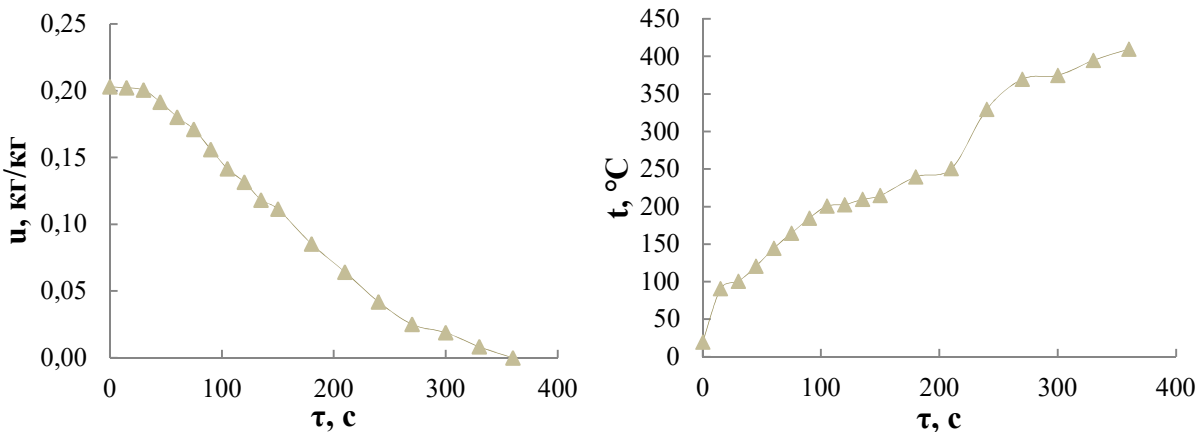
де  $u_1, u_2$  – вологовміст цеоліту на початку та наприкінці періоду постійної швидкості сушіння, кг/кг;  $\Delta\tau$  – тривалість другого періоду, с.

Кількість теплоти, що виділяється при адсорбції води цеолітами, розраховувалась як сума теплоти, що йшла на нагрівання води, цеоліту, експериментальної комірки та незначне випаровування води, що спостерігалось одразу після додавання води до цеоліту.

Характеристики досліджуваних цеолітів та основні результати мікрохвильового сушіння наведено в таблиці.



**Рис. 2.** Зміна вологовмісту (а) та температури (б) досліджуваних цеолітів в процесі мікрохвильового сушіння.  
 ▲ – цеоліт 3А; ◆ - цеоліт 4А; ■ – цеоліт 5А



**Рис. 3.** Зміна вологовмісту (а) і температури (б) цеоліту 3А при мікрохвильовому сушінні

Аналізуючи таблицю, ми бачимо, що цеоліт типу 5А має найкращі показники швидкості сушіння, темпу нагрівання та загальної ефективності, однак характеризується найнижчою теплою сорбції. Це може бути перевагою в процесах, де важлива швидкість, а не тепловиділення. Натомість цеоліт 3А вирізняється високою теплою сорбції, але нижчою ефективністю та швидкістю. Для термохімічного акумулятора теплоти найкращим є цеоліт 3А, оскільки головна мета – запасати якомога більше теплоти на кілограм матеріалу. Його відносно низька ефективність ( $\eta = 0.37$ ) може бути компенсована відповідним конструктивним рішенням, наприклад, рекуперацією теплоти.

Кінетика сушіння цеолітів 3А, 4А та 5А наведена на рис.2.

Для цеолітів 3А та 4А зміна вологовмісту за часом відбувається практично однаково, швидкість сушіння відрізняється незначно. Найбільша швидкість сушіння та темп нагрівання характерні для цеоліту 5А, це може пояснюватися більшим розміром пор, що полегшує видалення вологи з матеріалу.

Дослідження кінетики сушіння цеоліту 3А в більш широкому діапазоні зміни параметрів сушіння наведено на рис. 3.

На рис. 3а видно, що в процесі мікрохвильового сушіння можна виділити ділянку, на якій вологовміст змінюється лінійно (період постійної швидкості сушіння або другий період сушіння), що характерно при сушінні капілярно-пористих матеріалів, при цьому матеріал досить інтенсивно нагрівається, тобто на графіку зміни температури другий період відсутній (рис. 3б), що пояснюється діелектричними властивостями та іонним розігрівом матеріалу впродовж всього процесу. Для цеоліту 3А максимальна температура досягала  $410\text{ }^{\circ}\text{C}$  при тривалості сушіння 360 с, що супроводжувалося зниженням вологовмісту до практично нульових значень. Похибка визначення середнього вологовмісту склала 5,4%, температури – 6,8%.

Експерименти показали, що після першого циклу десорбції-сорбції цеоліт 5А зазнав значних пошкоджень, що може бути викликано надмірно високою швидкістю сушіння (рис. 4).

Таким чином, для цього цеоліту необхідно зменшувати потужність, що підводиться, для зниження швидкості сушіння, але це недоцільно з точки зору ефективності та тривалості процесу, що робить його менш привабливим при використанні як теплоакумулювальний матеріал для систем термохімічного зберігання теплоти.

Розрахунки теплоти адсорбції відповідно методики, наведеної в [14], показали, що при однакових умовах активації цеоліт 3А демонструє найвищу питому теплоту сорбції  $165\text{ кДж/кг}$ , тоді як для 4А та 5А цей показник становить відповідно  $100.7$  та  $87\text{ кДж/кг}$ . Така закономірність обумовлена комплексним впливом структурних, енергетичних та електрофізичних властивостей досліджуваних матеріалів. Незважаючи на однаковий тип кристалічної решітки, ці цеоліти відрізняються ефективним розміром пор, який становить приблизно  $3\text{ \AA}$  для 3А,  $4\text{ \AA}$  для 4А та  $5\text{ \AA}$  для 5А. Вказана відмінність визначає характер взаємодії молекул води з поровим простором. У цеоліті 3А розмір пор є співрозмірним із кінетичним діаметром молекули води ( $\sim 2,65\text{ \AA}$ ), що призводить до вираженого ефекту просторового обмеження. У таких умовах молекули води одночасно взаємодіють із кількома стінками пори та обмінними катіонами, що формує більш інтенсивне потенціальне поле і, відповідно, підвищує енергію зв'язування. Для цеолітів 4А та 5А зі збільшенням розміру пор зменшується перекриття потенціалів стінок, знижується щільність адсорбційного поля та зростає частка менш енергетично вигідної об'ємної адсорбції, що в кінцевому підсумку призводить до зменшення питомої теплоти сорбції. Також слід відзначити, що збільшення тривалості мікрохвильової обробки призводить до зростання теплоти сорбції: так, для цеоліту 3А вона зростає з  $165$  до  $204,4\text{ кДж/кг}$  при збільшенні часу сушіння з  $120$  до  $360$



Рис. 4. Пошкодженні гранули цеоліту 5А

с та збільшення температури до 400 °С. Таким чином, цеоліт 3А можна розглядати як перспективний матеріал для застосування в термохімічних системах акумулювання теплоти.

Слід також відзначити, що отримані значення питомої теплоти сорбції є нижчими за типові літературні дані, що пояснюється особливостями експерименту. Сушіння проводилось у тиглі без організації примусової конвекції, що обмежувало відведення водяної пари із зони обробки. У таких умовах у поровому просторі зберігається підвищений парціальний тиск води, що може сприяти частковій реадсорбції та перешкоджати повній дегідратації цеоліту. Це призводить до збереження частини зв'язаної вологи та, відповідно, до зниження експериментально визначеної теплоти сорбції. Таким чином, для підвищення ефективності активації доцільно застосовувати конструкції з продувкою шару газом, що забезпечують безперервне видалення водяної пари та зменшення дифузійних обмежень. Проте отримані дані дозволяють зіставити різні види цеоліту типу А за показниками енергоефективності та характеристикам кінетики сушіння.

**Висновки.** У результаті експериментальних досліджень мікрохвильового сушіння цеолітів типів 3А, 4А та 5А отримано, що найвища швидкість сушіння ( $N=6.55 \cdot 10^{-4}$  1/с), темп нагрівання (1.98 К/с) та загальна ефективність використання мікрохвильової енергії ( $\eta = 0.56$ ) характерні для цеоліту 5А, що пояснюється найбільшим розміром пор, який полегшує дифузію водяної пари.

Для застосування в термохімічних акумуляторах теплоти найбільш перспективним є цеоліт 3А, оскільки він забезпечує найвищу питому енергоємність (165 кДж/кг), а його відносно нижча ефективність мікрохвильової регенерації ( $\eta = 0.37$ ) може бути компенсована оптимізацією конструкції акумулятора (наприклад, застосуванням рекуперації теплоти).

Збільшення тривалості мікрохвильової обробки (від 120 до 360 с) та досягнення температури 400 °С підвищує теплоту сорбції цеоліту 3А до 204,4 кДж/кг. Це свідчить про можливість додаткової активації матеріалу шляхом глибшого видалення вологи, однак потребує врахування енергетичних витрат та термостійкості адсорбенту.

Виявлено, що цеоліт 5А після першого циклу десорбції-сорбції зазнає механічних пошкоджень (розтріскування гранул) при потужності мікрохвильового поля 800 Вт. Зниження потужності для запобігання руйнуванню призводить до збільшення тривалості процесу, що робить цеоліт 5А менш привабливим для тривалого термохімічного теплоакumuлювання.

### Література

1. Heat Release Kinetics upon Water Vapor Sorption Using Cation-Exchanged Zeolites and Prussian Blue Analogues as Adsorbents: Application to Short-Term Low-Temperature Thermochemical Storage of Energy / S. Benzaria et al. *Energies*. 2021. Vol. 14, no. 12. P. 3505. <https://doi.org/10.3390/en14123505>.

2. Materials for thermochemical energy storage and conversion: Attributes for low-temperature applications / S. Kiyabu et al. *Materials Horizons*. 2025. <https://doi.org/10.1039/d5mh01794g>.
3. Mancinelli M., Martucci A. Exploring the Potential of Zeolites for Sustainable Environmental Applications. *Sustainable Chemistry*. 2025. Vol. 6, no. 1. P. 9. <https://doi.org/10.3390/suschem6010009>.
4. Progress in zeolite–water adsorption technologies for energy-efficient utilization / F. Saadat et al. *Energy*. 2024. P. 133001. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2024.133001>.
5. Comparison of Desorption Characteristics of Water Vapor on the Types of Zeolites / S.-W. Lee et al. *Journal of Environmental Science International*. 2012. Vol. 21, no. 12. P. 1463–1468. <https://doi.org/10.5322/jes.2012.21.12.1463>.
6. Comparative simulation study of methanol production by CO<sub>2</sub> hydrogenation with 3A, 4A and 5A zeolites as adsorbents in a PSA reactor / J. A. D. Dobladez et al. *Separation and Purification Technology*. 2021. Vol. 262. P. 118292. <https://doi.org/10.1016/j.seppur.2020.118292>.
7. Banaei A., Zanj A. A Review on the Challenges of Using Zeolite 13X as Heat Storage Systems for the Residential Sector. *Energies*. 2021. Vol. 14, no. 23. P. 8062. <https://doi.org/10.3390/en14238062>.
8. Експериментальне дослідження сушіння цеоліту «4а» у мікрохвильовому полі / І. Л. Бошкова та ін. *Refrigeration Engineering and Technology*. 2023. Т. 59, № 3. С. 197–204. <https://doi.org/10.15673/ret.v59i3.2658>.
9. Investigation of the impact of zeolite shaping and salt deposition on the characteristics and performance of composite thermochemical heat storage systems. / Q. Touloumet et al. *Journal of Materials Chemistry A*. 2023. <https://doi.org/10.1039/d2ta07615b>.
10. Overcoming thermal energy storage density limits by liquid water recharge in zeolite-polymer composites / S. Chakravarty et al. *Matter*. 2024. <https://doi.org/10.1016/j.matt.2024.06.038>.
11. Study on Binary Hydrated Salt Composite Zeolite as Materials for Improving Thermochemical Energy Storage Performance / W. Ji et al. *SSRN Electronic Journal*. 2022. <https://doi.org/10.2139/ssrn.4017399>.
12. Preparation and thermal properties of zeolite/MgSO<sub>4</sub> composite sorption material for heat storage / S.-Y. Li et al. *Renewable Energy*. 2024. P. 120166. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2024.120166>.
13. Exploration adsorption characteristics of zeolite 13X depending on humidity and flow rate in sorption thermal energy storage applications / H. Kim et al. *International Journal of Heat and Mass Transfer*. 2024. Vol. 221. P. 125049. <https://doi.org/10.1016/j.ijheatmasstransfer.2023.125049>.
14. Бошкова І.Л., Волгушева Н.В., Гречановський А.П., Крятов А.Г., Кравченко Є.О. Дослідження теплоакумулявальних властивостей цеолітів після мікрохвильової регенерації. *Фізика аеродисперсних систем*. Випуск 63. 2025. 63–71. <https://doi.org/10.18524/0367-1631.2025.63.338084>.

Дата надходження: 21.02.2026

Дата прийняття до друку: 27.04.2026

Дата публікації: 28.05.2026

*A. P. Hrechanovskyi*

## Effect of microwave dehydration on the heat of sorption of type A zeolites

### Summary

*The study presents new experimental data on the drying kinetics and energy characteristics of A-type zeolites (3A, 4A, 5A) during microwave regeneration, which is a key stage in the operation of thermochemical heat storage systems. It was found that zeolite 5A exhibits the highest drying rate ( $6.55 \times 10^{-4} \text{ s}^{-1}$ ), heating rate (1.98 K/s), and microwave energy efficiency (0.56), which is attributed to its larger pore size and improved conditions for water vapor diffusion. At the same time, it is shown that intensification of the drying process is accompanied by a decrease in the specific heat of sorption (down to 87 kJ/kg) and mechanical degradation of the granules after the first desorption–sorption cycle, which limits the practical application of this material under cyclic operation conditions. It was determined that zeolite 3A demonstrates the highest specific heat of sorption (165 kJ/kg) among the studied samples, which is explained by the spatial confinement effect and stronger interaction of water molecules with the pore structure. It is shown that increasing the microwave treatment time to 360 s and reaching a temperature of about 400 °C leads to an increase in the heat of sorption up to 204.4 kJ/kg, indicating deeper activation of the adsorbent. The influence of the structural characteristics of zeolites on the efficiency of microwave energy conversion into thermal energy and on desorption kinetics has been analyzed. It is proven that zeolite 3A is the most promising for application in thermochemical heat storage systems due to its maximum energy capacity, whereas zeolite 5A is more suitable for processes where drying rate is the priority. The feasibility of optimizing microwave regeneration modes and improving the design of installations (in particular, by introducing gas flow through the layer) to enhance dehydration efficiency and adsorbent stability is substantiated.*

**Keywords:** zeolites 3A, 4A, 5A; microwave drying; thermochemical heat storage; energy efficiency; experiment; moisture content; temperature.