

УДК 621.355.9

**Бошкова І. Л.<sup>1</sup>, Волгушева Н. В.<sup>2</sup>, Гречановський А. П.<sup>3</sup>,  
Крятов А. Г.<sup>4</sup>, Кравченко Є. О.<sup>5</sup>**

*Одеський національний технологічний університет, Одеса, Україна*

*E-mail: boshkova.irina@gmail.com*

ORCID: <sup>1</sup> <https://orcid.org/0000-0001-5989-9223>

<sup>2</sup> <https://orcid.org/0000-0002-9984-6502>

<sup>3</sup> <https://orcid.org/0000-0002-8257-5769>

<sup>4</sup> <https://orcid.org/0009-0005-3371-2885>

<sup>5</sup> <https://orcid.org/0009-0009-3446-4958>

### **Дослідження теплоакумулювальних властивостей цеолітів після мікрохвильової регенерації**

*В роботі проведено дослідження кінетики дегідратації щільного шару цеолітів 13X і 4A, які застосовуються для систем накопичення тепла на основі термохімічних процесів адсорбції та десорбції. Наведено результати аналітичного огляду літературних даних, на підставі якого отримано відомості про ефективність термохімічного накопичення теплоти цеолітами завдяки високій щільності акумулювання енергії, а також можливості тривалого зберігання без втрат енергії. Визначено, що при регенерації цеолітів раціонально застосування методу мікрохвильової дегідратації. Представлено схему експериментальної установки для проведення досліджень мікрохвильового сушіння та методика проведення експериментів. Наведено результати експериментів з дегідратації щільного шару цеолітів 13X та 4A в умовах мікрохвильового нагріву при вихідній потужності магнетрону 800 Вт, початкова маса завантаження — 0,1 кг. Показані криві зміни вологовмісту та температури цеолітів при мікрохвильовому сушінні. Наведено аналіз характеру зміни вмісту вологи і температури для досліджуваних цеолітів. Проведено оцінку властивостей міцності цеолітів за результатами визначення якості зерен після семи циклів сорбції-десорбції. Наведено результати оцінки теплоакумулювальної здатності цеолітів після дегідратації в мікрохвильовому полі. Враховувалося, що теплота адсорбції, що виділяється після додавання води до шару цеолітів, йшла на нагрівання води, експериментальної комірки, шару цеоліту і випаровування вологи. Питома теплота адсорбції досліджуваних цеолітів змінюється в межах 155,5 кДж/кг – 216,4 кДж/кг, при цьому похибка не перевищувала 15,7%. Отримано, що за характеристиками міцності і по теплоакумулювальної здатності переважним для систем термохімічного накопичення тепла є цеоліт 13X, однак остаточний вибір визначається конкретними умовами застосування.*

**Ключові слова:** теплоаккумулятори, термохімічне накопичення тепла, мікрохвильове нагрівання, експеримент, похибка, кінетика сушіння, міцність, теплота адсорбції.

**Вступ.** Одним із заходів щодо скорочення викидів парникових газів та зниження використання викопного палива є оптимізація використання енергоресурсів. Ключову роль досягненні цієї мети можуть зіграти системи теплоакмулювання [1, 2]. Системи накопичення тепла здатні забезпечити стійкіше енергетичне майбутнє, підвищуючи енергоефективність процесів та сприяючи інтеграції відновлюваних джерел енергії. В останні роки відзначається зростаючий інтерес до цеолітових теплоаккумуляторів, відповідно до пошуку оптимального виду цеолітів та дослідження їх властивостей [3]. При порівнянні різних типів систем

накопичення теплової енергії отримано, що термохімічне накопичення теплоти цеолітами здатне забезпечити більш високу енергоефективність щодо систем ємнісного типу [4], при цьому втрати тепла мінімальні і акумульовану теплоту можна зберігати практично «вічно», якщо цеоліт залишається сухим. Однак через складну роботу системи акумулювання з фазами теплової зарядки та розрядки, а також складних експлуатаційних параметрів та порівняно високої вартості, комерційного прориву поки що не вдалося досягти.

Етап регенерації шару цеолітів, суть якого полягає у дегідратації, потребує окремого дослідження. Сучасним і перспективним методом є дегідратація цеолітів у мікрохвильовому полі, цей метод має ряд важливих переваг у порівнянні з традиційними способами: вимагає менших витрат енергії, оскільки енергія передається безпосередньо матеріалу, менше втрат тепла в навколишнє середовище, менший ризик термічного пошкодження цеоліту, появи дрібних тріщин і появи дрібних тріщин. Для розуміння процесу регенерації цеолітів та визначення раціональних режимів мікрохвильового нагріву необхідне дослідження кінетики дегідратації цеолітів, що важливо для їхнього подальшого ефективного використання в різних промислових процесах. Метою роботи є вивчення кінетики мікрохвильової дегідратації цеолітів 13X і 4A та подальша оцінка їх теплоакумулювальної здатності.

**Огляд досліджень особливостей цеолітових теплоаккумуляторів.** Системи накопичення тепла призначені для акумулювання та зберігання теплової енергії для подальшого використання, допомагаючи збалансувати енергосистему, оптимізувати енергоспоживання та знизити залежність від викопного палива. Все більш актуальним стає застосування цеолітових теплоаккумуляторів завдяки унікальним властивостям цеолітів та особливостям термохімічного накопичення теплової енергії. Цеолітові теплоаккумулятори - це хімічні накопичувачі, які дозволяють зберігати енергію практично без втрат протягом сезону [5]. Стверджується [6], що з економічної точки зору такі матеріали з унікальними сорбційними властивостями, як цеоліти, можуть успішно застосовуватися як теплові аккумулятори в промисловості, що представляє великий практичний інтерес. Результати дослідження теплоаккумуляторів та оцінка ключових параметрів, отриманих на основі експериментальних результатів з NaY без сполучної речовини, представлені у роботі [7]. Експерименти показали, що цеолітна адсорбція (термічне розвантаження) води з вологого повітря, що подається в шар цеоліту, призвела до підвищення температури в ємності приблизно на 46 °С. Більшість досліджень адсорбції було проведено на цеолітах 3A, 4A і 5A, поряд з 13X, оскільки вони найчастіше використовуються у промислових процесах, ймовірно, через їхню комерційну доступність і відносно низьку вартість виробництва [8].

Автори [7] визначили, що, на відміну від існуючих систем акумулювання тепла на основі води, цеолітові системи досягають щільності енергії 150-200 кВт·год·м<sup>-3</sup> і дозволяють здійснювати сезонне зберігання практично без втрат тепла. У той час як системи зберігання явного тепла, такі як накопичувачі на основі

води, є передовими у побуті та на електростанціях, системи зберігання прихованого та, особливо, термохімічного тепла все ще перебувають у стадії розробки [9, 10].

Традиційні системи зберігання явного та прихованого тепла широко вивчені та нині доступні на ринку [11, 12]. У той же час матеріали для термохімічного зберігання енергії мають приблизно в 3 – 30 разів більшу щільність зберігання енергії в порівнянні з системами явного зберігання тепла (або ємнісні) і в 2 – 20 разів більш високу, ніж системи прихованого зберігання (використовуються матеріали з фазовим переходом), залежно від властивостей матеріалу [13, 14].

Дослідження [15] показали, що цеоліт 13X є більш придатним для уловлювання та зберігання теплової енергії, ніж природні цеоліти. Автори [16] представили велике експериментальне дослідження мікрохвильової десорбції з використанням декількох типів адсорбентів (кремнезему, активованого оксиду алюмінію, цеолітів NaX і NaY) та різних адсорбатів (води, толуолу, метилциклогексану та н-гептану) при 50 Вт мікрохвильової потужності. Отримано, що поглинена мікрохвильова потужність швидко збільшується для обох цеолітів на початку процесу. Потім, в процесі дегідратації, вона різко зменшується для цеоліту NaY і збільшується трохи для цеоліту NaX.

В [17] наведені експериментальні результати дегідратації цеоліту NaX. Отримано, що в оптимізованій лабораторній системі можливе поглинання не менше 90% падаючої мікрохвильової потужності, дегідратація в процесі мікрохвильового нагріву в порівнянні з класичним процесом адсорбції забезпечує більшу економію енергії при збільшенні щільності мікрохвильової потужності (економія енергії 39.9% при 2.26 кВт/кг). В експериментах з мікрохвильовим нагріванням використовувалися молекулярні сита 13X (1.0:1.0:2.5:х Na<sub>2</sub>O/Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>/SiO<sub>2</sub>/H<sub>2</sub>O) сферичної форми з діаметром 3 – 6 мм. Проте автори зазначають, що метод мікрохвильової дегідратації потребує належної інженерії та ретельного проектування. Ключовими факторами є діелектричні властивості системи (адсорбент та адсорбат), правильна конструкція обладнання з точки зору ефективного проникнення мікрохвиль у тверде тіло адсорбенту та мінімізація відбиття мікрохвиль у системі.

Результати [18] підтвердили, що десорбція при мікрохвильовому нагріванні – це швидкий та ефективний спосіб регенерації адсорбційних шарів, що у деяких випадках призводить до економії енергії порівняно з класичними методами. Результати [19] показали, що правильна оптимізація конфігурації реактора дозволяє провести швидку регенерацію цеолітів 13X за допомогою мікрохвильового випромінювання з енергоефективністю (розраховується як відношення енергії, що поглинається електричною мережею для генерації мікрохвиль, до енергії, що перетворюється цеолітами в тепло) до 75 %, регенерації. Повторюваність результатів адсорбції та десорбції CO<sub>2</sub> свідчить про відсутність змін у цеолітах після мікрохвильового опромінення. Стверджується [19], що метод мікрохвильового нагріву є прийнятною альтернативою традиційної термічної регенерації, зокрема з погляду екологічної безпеки. При цьому електроенергія, необхідна для генерації мікрохвиль, може бути отримана з відновлюваних джерел (вітер, сонце), а не шляхом спалювання копалин, як у випадку традиційної термічної регенерації.

Для перевірки впливу мікрохвильового нагріву (МН) на адсорбційні властивості цеоліту [20] було проведено кілька послідовних циклів адсорбції-десорбції. Результати свідчать, що МН не пошкоджує структуру цеоліту, тоді як присутність  $H_2O$ ,  $N_2O$  та  $O_2$  у потоці газу, що регенерує, знижує адсорбційну ємність, яку можна відновити за допомогою мікрохвильового нагріву при  $350\text{ }^\circ\text{C}$  –  $400\text{ }^\circ\text{C}$ . Більш того, МН забезпечує економію енергії 63 % та продувного газу до 82,5 % порівняно з традиційним процесом регенерації.

Порівняння результатів [21] з результатами, представленими в літературі, продемонструвало, що мікрохвильове нагрівання шару цеолітів може бути більш енергоефективним, ніж конвективне нагрівання (КН). Більше того, з проведеного моделювання випливає, що підтримання однакової температури шару адсорбенту при МН і КН зі збільшенням витрати газу збільшує енергоспоживання при КН і знижує критичні коефіцієнти ефективності, тим самим підвищуючи економічну ефективність МН. Метод використання мікрохвильового випромінювання як джерела тепла для регенерації адсорбційного матеріалу сприймається як стратегія підвищення енергоефективності регенерації цеолітів [22].

Знання кінетики сушіння допомагає передбачити, як швидко система може підготуватися до нового циклу накопичення тепла. Це особливо важливо для систем із сезонним зберіганням, де тривалість циклів та їх швидкість безпосередньо впливають на ефективність. Вивчення кінетики сушіння цеолітів дозволяє визначити оптимальні параметри процесу регенерації, а також вибрати найбільш відповідну конструкцію пристрою. У [23] проведено дослідження кінетики циклічного та безперервного мікрохвильового сушіння цеоліту 4А з насипною щільністю  $\rho=780\text{ кг/м}^3$  та рівноважним вологовмістом 13,4 %. 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.

Аналітичний огляд літературних джерел дозволив зробити висновок, що для теплоакумулювальних систем, що використовують цеоліти, раціонально застосовувати 13Х і 4А, при цьому слід оцінити їх властивості залежно від країни-виробника за теплою адсорбції та характеристиками міцності в залежності від циклів зарядки-розрядки.

**Матеріали та методи проведення досліджень.** Дослідження проводились на цеоліті 4А (виробництво Україна) з насипною щільністю  $\rho=780\text{ кг/м}^3$ , цеоліті 13Х виробництва Китай (далі - цеоліт 13Х<sub>к</sub>) з насипною щільністю  $\rho=680\text{ кг/м}^3$  та на цеоліті 13Х виробництва Україна (далі - цеоліт 13Х<sub>у</sub>), з насипною щільністю  $\rho=726\text{ кг/м}^3$ . Фото досліджуваних цеолітів представлені на рис. 1.

Експериментальні дослідження процесу дегідратації цеолітів проводили на лабораторній установці, схема якої представлена на рис. 2. Установка містить такі основні елементи: 1 – дверцята; 2 – магнетрон; 3 – вентилятор системи охолодження магнетрону; 4 – експериментальна комірочка з матеріалом для досліджень; 5 – робоча камера; 6 – електронагрівач; 7 – вентилятор.

У камеру прямокутного перерізу подавалась мікрохвильова енергія від магнетрона з частотою генерації 2,45 ГГц і регульованою потужністю. Досліджуваний матеріал засипався в експериментальну комірочку, виготовлену з сітчастого

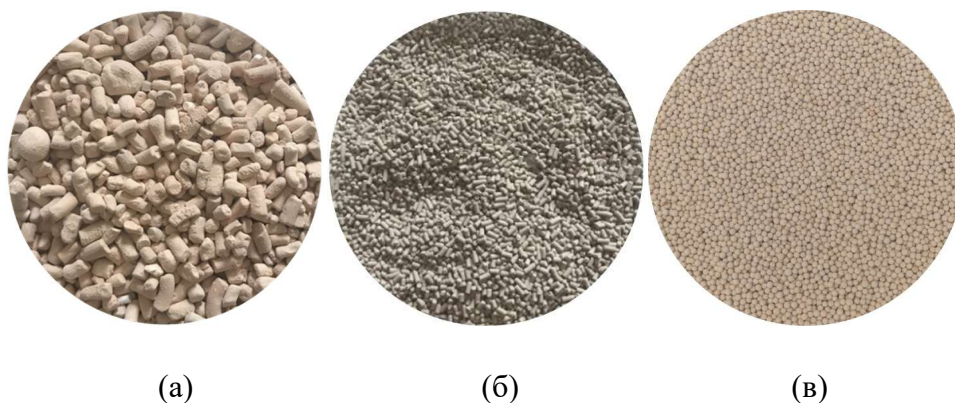


Рис. 1. Фотографії цеолітів, що досліджувались у роботі  
а – 4А, б – 13Х<sub>у</sub>, в – 13Х<sub>к</sub>

радіопрозорого матеріалу і розташовувався в мікрохвильову камеру, після чого включався магнетрон. Через задані проміжки часу матеріал витягували і зважували на електронних вагах ТВЕ-0,5-0,01 для визначення кількості води, що випарувалася. Вимірювання температури проводилися за допомогою мультиметра АССТА АТ-280, щуп якого поміщався в шар цеоліту відразу після вимкнення магнетрона. Установка забезпечує проведення досліджень у режимах мікрохвильового та мікрохвильово-конвективного сушіння.

Отримані первинні дані були основою для побудови кривих кінетики сушіння. Початковий вологовміст цеолітів розраховували як рівноважний шляхом відбору проби масою  $m_{вл}$  з партії цеоліту з подальшим висушуванням її до нульового вмісту води і визначенням маси  $m_{сух}$ . Рівноважну вологість  $u_p$  розраховували за такою формулою:

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

Під час обробки даних визначаються такі значення:

- маса води, що випарувалася:

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

- поточний вміст води:

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

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

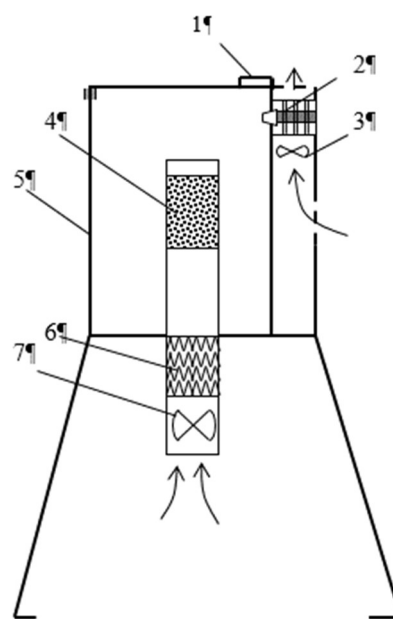
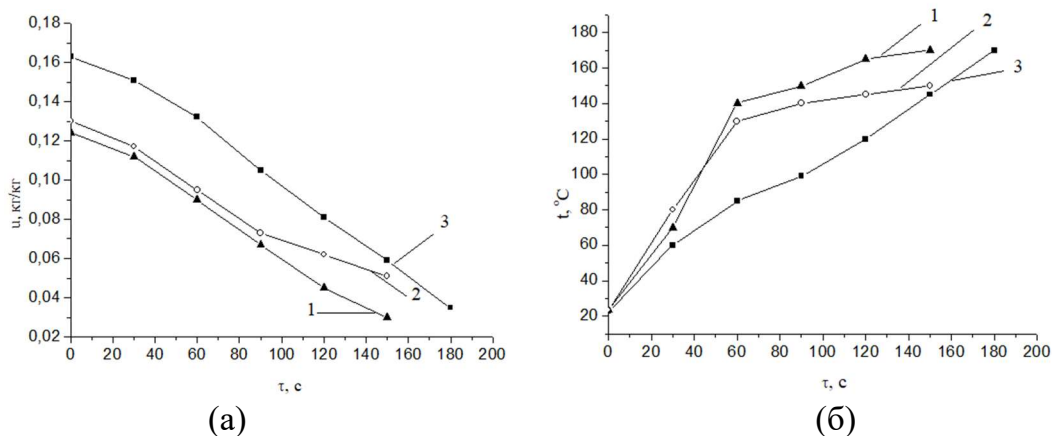


Рис. 2. Схема установки для дослідження кінетики сушіння дисперсних матеріалів при мікрохвильовому та конвективному нагріванні



**Рис. 3.** Зміна вологовмісту (а) і температури (б) цеолітів при мікрохвильовому сушінні: 1 – цеоліт 13X<sub>y</sub>, 2 – цеоліт 4A, 3 – цеоліт 13X<sub>k</sub>

Експерименти проводили на цеолітах з рівноважним вологовмістом і з вологовмістом, що визначався стадією розрядки при контакті з водою.

Вихідна потужність магнетрона у всіх дослідах становила 800 Вт, початкова маса завантаження цеоліту – 0.1 кг.

**Результати та обговорення.** Експериментальні залежності зміни вологовмісту і температури в часі при мікрохвильовому нагріванні представлені на рис. 3. Закон зміни вологовмісту цеоліту 13 X, як видно з рис. 3а, не залежить від країни-виробника та форми частинок. Сушіння цеоліту 4A відбувається менш інтенсивно, що, найімовірніше, пояснюється великим розміром частинок. Характер зміни температур показує, що за практично однакової вихідної вологості цеолітів 13X<sub>y</sub> і 4A криві 1 і 2 подібні. Це свідчить про те, що їх діелектричні властивості близькі за значенням. Менш інтенсивне зростання температури цеоліту 13 X<sub>k</sub> можна пояснити вищим початковим вологовмістом, внаслідок чого велика (порівняно з цеолітами з меншим вологовмістом) частина мікрохвильової енергії йшла на випаровування вологи, а не на нагрівання матеріалу.

Експерименти показали, що цеоліт 13X<sub>k</sub> характеризується кращими властивостями міцності і витримує без механічних пошкоджень більшу кількість циклів сорбції-десорбції в порівнянні з цеолітом 13X<sub>y</sub> і 4A. Для оцінки здатності витримувати цикли сорбції-десорбції без руйнування зерен було визначено відносне зменшення маси незруйнованих цеолітів, яке у цій роботі визначалося як відношення маси зерен, що залишилися непошкодженими після проходження циклів сорбції – десорбції, до початкової їхньої маси. Після стадії десорбції цеоліти просівали через сито, яке пропускало пошкоджені зерна і визначалося її значення. Після семи циклів спад маси цеоліту 13X<sub>k</sub> склав 0%, 13X<sub>y</sub> - 4,3%, 4A - 14%. Таким чином, кращим за властивостями міцності є 13X<sub>k</sub>, проте його вартість істотно вище, внаслідок чого вибір цеоліту залежить від конкретних завдань.

Для оцінки кількості теплоти, що виділяється при сорбції вологи цеолітами, використали наступний метод. До цеоліту після його регенерації в мікрохвильо-

вому полі та його охолодженні до температури навколишнього середовища додавалася дистильована вода. При контакті цеоліту з водою зафіксовано виділення значної теплоти адсорбції, для оцінки її значення були проведені теплові розрахунки. Враховувалося, що теплота адсорбції йшла на нагрівання води  $Q_B$ , експериментальної комірки  $Q_K$ , шару цеоліту  $Q_C$  і випаровування вологи  $Q_{вип}$ . Після додавання води до шару цеолітів експериментальна ємність закривалася кришкою, на якій, як було помічено, конденсувалися пари води. Це визначило необхідність урахування теплоти випаровування, при цьому кількість вологи, що випарувалася, визначалося зважуванням кришки після завершення процесу.

У кінцевому вигляді залежність для розрахунку теплоти адсорбції набуває наступного вигляду:

$$Q = Q_C + Q_B + Q_K + Q_{вип} . \quad (4)$$

Результати експерименту показали, що при додаванні води масою 0,1 кг шар цеоліту 13X<sub>K</sub> масою 0,07 кг при початковій температурі 25 °С, середня (за результатами трьох повторів) питома теплота адсорбції становить  $Q=216,4$  кДж/кг. Похибка проведення експерименту становила 137 %. Аналогічним чином були проведені експерименти з цеолітом 13X<sub>Y</sub> та 4A. Для цеоліту 13X<sub>Y</sub> теплота адсорбції становила  $Q=167,4$  кДж/кг, для цеоліту 4A –  $Q=155,5$  кДж/кг. Похибка проведення експериментів становила 13,7 %, 14,2 % та 15,7 % відповідно. Таким чином, застосування цеоліту 13X<sub>K</sub> у системах термохімічного накопичення тепла є кращим.

**Висновки.** Цеоліт 13X<sub>K</sub> характеризується кращими характеристиками міцності і витримує більшу кількість циклів сорбції-десорбції в порівнянні з цеолітом 13X<sub>Y</sub> і 4A. Втрата цеоліту 13X<sub>K</sub> після трьох циклів сорбції-десорбції склала 0 %, 13X<sub>Y</sub> – 4,3 %, 4A – 14 %.

Питома теплота адсорбції цеоліту 13X<sub>K</sub> становить  $Q=216,4$  кДж/кг, для цеоліту 13X<sub>Y</sub> теплота адсорбції становила  $Q=167,4$  кДж/кг, для цеоліту 4A –  $Q=155,5$  кДж/кг. Похибка проведення експериментів становила 13,7 %, 14,2 % та 15,7 % відповідно. Застосування цеоліту 13X<sub>K</sub> у системах термохімічного накопичення тепла є кращим.

### Література:

1. *Abedin A.H.* A Critical Review of Thermochemical Energy Storage Systems / Ali H. Abedin // The Open Renewable Energy Journal. – 2011. – Vol. 4, №. 1. – P. 42–46. – Mode of access: <https://doi.org/10.2174/1876387101004010042>.
2. Вивчення перспектив застосування цеолітів для теплових акумуляторів / *I. Л. Бошкова [та ін.]* // Refrigeration Engineering and Technology. – 2021. – Т. 57, № 3. – С. 196-205. – Режим доступу: <https://doi.org/10.15673/ret.v57i3.2171>
3. Adsorption performance and thermodynamic analysis 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. – Mode of access: <https://doi.org/10.1007/s40243-018-0131-y>.
4. Experimental and Numerical Assessment of Novel All-In-One Adsorption Thermal Storage with Zeolite for Thermal Solar Applications / *Michelangelo Di Palo [et al.]* // Applied

- Sciences. – 2020. – Vol. 10, №. 23. – P. 8517. – Mode of access: <https://doi.org/10.3390/app10238517>.
5. Erprobung thermochemischen ingredients Langzeitwärmespeichers auf Basis instruments Zeolith/Salz-Komposits / *Thomas Nonnen [et al.]* // *Chemie Ingenieur Technik*. – 2016. – Vol. 88, no. 3. – P. 363-371. – Mode of access: <https://doi.org/10.1002/cite.201500136>
  6. Adsorption Heat Storage: State-of-the-Art i Future Perspectives / *Salvatore Vasta [et al.]* // *Nanomaterials*. – 2018. – Vol. 8, no. 7. – P. 522. – Mode of access: <https://doi.org/10.3390/nano8070522>.
  7. Zeolite Heat Storage: Key Parameters з Experimental Results with Binder-Free NaY / *Stefan Rönsch [et al.]* // *Chemical Engineering & Technology*. – 2020. – Vol. 43, no. 12. – P. 2530-2537. – Mode of access: <https://doi.org/10.1002/ceat.202000342>.
  8. *Ojuva A.* Processing and performance of zeolites for efficient carbon dioxide separation [Electronic resource]: doctoral thesis / *Ojuva Arto*. – [S. l.], 2015. – Mode of access: <http://urn.kb.se/resolve?urn=urn:nbn:se:su:diva-114160> .
  9. Thermal energy storage – overview and specific insight in nitrate salts for sensible and latent heat storage / *Nicole Pflieger [et al.]* // *Beilstein Journal of Nanotechnology*. – 2015. – Vol. 6. – P. 1487-1497. – Mode of access: <https://doi.org/10.3762/bjnano.6.154>.
  10. *Kant K.* Advances and opportunities in thermochemical heat storage systems for buildings applications / *K. Kant, R. Pitchumani* // *Applied Energy*. – 2022. – Vol. 321. – P. 119299. – Mode of access: <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2022.119299>.
  11. Analysis and optimization of closed-adsorption heat storage bed performance / *K. Kant [et al.]* // *Journal of Energy Storage*. – 2020. – Vol. 32. – P. 101896. – Mode of access: <https://doi.org/10.1016/j.est.2020.101896>.
  12. Solar-thermal energy conversion prediction of building envelope using thermochemical sorbent based on established reaction kinetics / *Wei Li [et al.]* // *Energy Conversion and Management*. – 2022. – Vol. 252. – P. 115117. – Mode of access: <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2021.115117>.
  13. Sorption heat storage for long-term low-temperature applications: Review on the advancements in material and prototype scale / *Luca Scapino [et al.]* // *Applied Energy*. – 2017. – Vol. 190. – P. 920-948. – Mode of access: <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2016.12.148>.
  14. Advances in thermal energy storage materials and their applications towards zero energy buildings: A critical review [Electronic resource] / *Jesús Lizana [et al.]* // *Applied Energy*. – 2017. – Vol. 203. – P. 219–239. – Mode of access: <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2017.06.008> .
  15. Use of Zeolites in the Capture and Storage of Thermal Energy by Water Desorption–Adsorption Cycles [Electronic resource] / *Bruno de Gennaro [et al.]* // *Materials*. – 2022. – Vol. 15, no. 16. – P. 5574. – Mode of access: <https://doi.org/10.3390/ma15165574>.
  16. Adsorbents regeneration under microwave irradiation for dehydration and volatile organic compounds gas treatment / *Isabelle Polaert [et al.]* // *Chemical Engineering Journal*. – 2010. – Vol. 162, no. 3. – P. 941-948. – Mode of access: <https://doi.org/10.1016/j.cej.2010.06.047>.
  17. Adsorbents regeneration under microwave irradiation for dehydration and volatile organic compounds gas treatment / *Isabelle Polaert [et al.]* // *Chemical Engineering Journal*. – 2010. – Vol. 162, no. 3. – P. 941-948. – Mode of access: <https://doi.org/10.1016/j.cej.2010.06.047>.

18. Mechanisms Responsible for Dielectric Properties of Fauasites and Linde Type A Zeolites в Microwave Frequency Range / *Benoit Legras [et al.]* // The Journal of Physical Chemistry C. – 2011. – Vol. 115, no. 7. – P. 3090-3098. – Mode of access: <https://doi.org/10.1021/jp111423z>.
19. Intensification of TSA processes using a microwave-assisted regeneration step / *Eugenio Meloni [et al.]* // Chemical Engineering and Processing - Process Intensification. – 2021. – Vol. 160. – P. 108291. – Mode of access: <https://doi.org/10.1016/j.cep.2020.108291>.
20. MW-Assisted Regeneration of 13X Zeolites після N<sub>2</sub>O Adsorption from Concentrated Streams: A Process Intensification / *Eugenio Meloni [et al.]* // Energies. – 2022. – Vol. 15, no. 11. – P. 4119. – Mode of access: <https://doi.org/10.3390/en15114119>.
21. Cherbanski R. Calculation of Critical Efficiency Factors of Microwave Energy Conversion in Heat / *R. Cherbanski* // Chemical Engineering & Technology. – 2011. – Vol. 34, no. 12. – P. 2083-2090. – Mode of access: <https://doi.org/10.1002/ceat.201100405>.
22. Microwave Irradiation Effect in Water-vapor Desorption from Zeolites / *Hongyu [et al.]* // Microwave Heating. – [S. l.], 2011. – Mode of access: <https://doi.org/10.5772/23264>
23. Експериментальне дослідження сушіння цеоліту «4а» у мікрохвильовому полі / *І. Л. Бошкова [та ін.]* // Refrigeration Engineering and Technology. – 2023. – Т. 59, № 3. – С. 197-204. – Режим доступу: <https://doi.org/10.15673/ret.v59i3.2658>.

***Boshkova I. L., Volgusheva N. V., Hrechanovskyi A. P.,  
Kriatov A. H., Kravchenko Ye. O.***

### **Research on the heat storage properties of zeolites after microwave regeneration**

#### **Summary**

*The paper studies the kinetics of dehydration of a dense layer of zeolites 13X and 4A, which are used for heat storage systems based on thermochemical adsorption and desorption processes. The results of an analytical review of the literature data are presented, on the basis of which information was obtained about the efficiency of thermochemical heat storage by zeolites due to the high density of energy storage, as well as the possibility of long-term storage without energy loss. It was determined that the microwave dehydration method is rational for the regeneration of zeolites. A diagram of an experimental setup for conducting microwave drying studies and a methodology for conducting experiments are presented. The results of experiments on the dehydration of a dense layer of zeolites 13X and 4A under microwave heating conditions at a magnetron output power of 800 W, the initial loading mass is 0.1 kg. The curves of changes in moisture content and temperature of zeolites during microwave drying are shown. An analysis of the nature of changes in moisture content and temperature for the studied zeolites is presented. The strength properties of zeolites are assessed based on the results of determining the quality of grains after seven sorption-desorption cycles. The results of the assessment of the heat storage capacity of zeolites after dehydration in a microwave field are presented. It was taken into account that the heat of adsorption released after adding water to the zeolite layer was used to heat the water, the experimental cell, the zeolite layer, and the evaporation of moisture. The specific heat of adsorption of the studied zeolites varies within 155.5 kJ/kg – 216.4 kJ/kg, while the error did not exceed 15.7%. It was found that zeolite 13X is preferable for thermochemical heat storage systems in terms of strength characteristics and heat storage capacity, but the final choice is determined by the specific conditions of use.*

**Keywords:** *heat accumulators, thermochemical heat storage, microwave heating, experiment, error, drying kinetics, strength, heat of adsorption.*