

ЕНЕРГЕТИКА ТА ЕНЕРГОЗБЕРЕЖЕННЯ

УДК 621.355.9

Сучасні тенденції використання термохімічних акумуляторів теплоти сонячної енергії на прикладі цеолітів**І. Л. Бошкова¹✉, Н. В. Волгушева², Л. З. Бошков³, О. С. Бондаренко⁴, А. П. Гречановський⁵**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.comORCID: ¹<https://orcid.org/0000-0001-5989-9223>; ²<https://orcid.org/0000-0002-9984-6502>; ³<http://orcid.org/0000-0002-2196-1519>; ⁴<https://orcid.org/0000-0002-0111-0768>; ⁵<https://orcid.org/0000-0002-8257-5769>

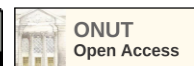
Термохімічна акумуляція теплоти цеолітами нині перспективна для сезонного зберігання тепла. Крім того, застосування даної технології дозволяє знизити викиди CO₂. Метод акумуляції тепла цеолітами ґрунтується на використанні тепла, пов'язаного з адсорбцією та десорбцією. Такий метод, порівняно із звичайним акумуляванням тепла (водяним або акумуляванням тепла з використанням теплоти фазового переходу), характеризується енергоємністю в 4-5 (теоретично 10-12) разів вище, ніж у звичайних систем. Особливу важливість має правильний вибір цеоліту. Розглянуто структуру та фізичні властивості цеолітів KA, NaA, CaA, NaX, CaX як такі, що знайшли найбільше практичне застосування. Для термохімічного акумулявання теплоти застосовують цеоліт типу A і X. Розглянуто принцип роботи переривчастого цеолітного циклу з використанням сонячної енергії. Теплова потужність системи визначається інтегруванням загальної енергії, що надходить у цеолітовий контейнер протягом дня. Розподіл між потужністю охолодження та потужністю нагрівання забезпечує ефективність цеолітного циклу, як правило, від 35% до 50%. Представлений аналіз сонячної цеолітної системи, яка забезпечує опалення, охолодження та гаряче водопостачання для житлових будинків. Система безперервно працювала протягом року і забезпечувала понад 90% усіх енергетичних потреб будинку. Для ефективного застосування цеолітів у термохімічних акумуляторах теплоти необхідно не тільки вибрати правильний тип цеоліту, але й організувати правильну його підготовку та регенерацію. Застосування мікрохвильової енергії для підготовки (стадія гідротермальної кристалізації для термоактивації цеолітів, яку зазвичай проводять при 500-700 °C протягом 3-5 год) і регенерації цеолітів, дозволяє не тільки видалити адсорбційно-пов'язану вологу, але і отримати унікальну внутрішню структуру матеріалу.

Ключові слова: Теплота; Адсорбція; Десорбція; Фізичні властивості; Переривчастий цеолітний цикл

doi: <https://doi.org/10.15673/ret.v59i1.2609>

© 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**

Зростання цін, нестабільність постачання палива та захист клімату потребують радикальних змін у структурі енергопостачання. У Європі зростає розуміння того, що відновлювані джерела енергії мають відігравати ключову роль. Як відомо,

під відновлюваними та регенеративними енергіями розуміються первинні енергії, які безперервно живляться від цих джерел енергії і тому – у людському вимірі – вважаються невичерпними чи необмеженими. Це випромінювана енергія сонця (сонячна енергія), яка відповідає за велику кількість інших відновлюваних джерел енергії (вклю-

чаючи енергію вітру, енергію води, біомасу). У цілому нині існує два способи стійкого зниження витрат за теплову енергію. Це збільшення вироблення енергії та споживання теплової енергії з відновлюваних джерел. Технологія акумулювання тепла цеолітами сприяє розвитку обох галузей.

Термохімічна акумуляція теплоти цеолітами, заснована на сорбції/десорбції води в пористих матеріалах, в даний час є придатним для застосування сезонного зберігання тепла в так званих енергозберігаючих будинках [1]. Але вартість ефективних накопичувальних матеріалів (цеолітів), як і раніше, висока, а щільність енергії досить низька. Крім того, близько 40% кінцевого енергоспоживання, наприклад, у Німеччині, припадає на низькотемпературне тепло, насамперед на опалення приміщень. Ця енергія в основному виходить за рахунок спалювання викопного палива, що значно сприяє викиду CO₂. Тому актуальним є дослідження термохімічної технології акумулювання теплоти та вивчення властивостей цеолітів. Застосування даної технології дозволить зробити внесок у скорочення викидів CO₂.

2. Види та властивості природних та синтетичних цеолітів

Синтетичні цеоліти – алюмосилікатні мікропористі адсорбенти, що володіють не тільки високою вибірковою адсорбцією, але й здатністю розділяти речовини, з різними розмірами та формою молекул адсорбтиву. Вони відрізняються строго кристалічною будовою та великою питомою поверхнею. Пори цеоліту є сферичні порожнини, з'єднані каналами. В даний час промислові підприємства випускають цеоліти різних марок, що відрізняються катіонами та розмірами пір.

Найбільше практичне застосування отримали цеоліти типу А і X, що мають двозначні позначення: KA, NaA, CaA, NaX, CaX. Перша частина позначення – переважаючий в цеолітах метал (K, Na, Ca). Друга – тип решітки (A або X). Ця класифікація цеолітів вказує визначальний розмір діаметра вхідного вікна. За хімічним складом цеоліти відносяться до сполук алюмосилікатів, до яких входять іони Al³⁺, Si⁴⁺ та іони металів різної валентності.

Цеоліт типу NaA, наприклад, має наступний склад: Na₂O Al₂O₃ 2SiO₂ 4,5H₂O. Цеоліти типу А – низькокремністі форми, у них співвідношення SiO₂: Al₂O₃ не вище 2, і в кислому середовищі вони руйнуються. Для цеолітів типу X це співвідношення дорівнює 2,2-3,3. Цеоліти типу X мають досить широкі вхідні вікна та адсорбують більшість компонентів складних сумішей: усі типи вуглеводнів, органічні сполуки сірки, меркаптани, галогензаміщені вуглеводні. Однією з характеристик цеолітів є критичний діаметр, який визначає можливість проникнення даної молекули в порожнини цеоліту через вікна, що з'єднують їх. Штучні цеоліти типу А виробляються на основі каоліну. Цеоліт 4A [6] був виготовлений з іракського каоліну з використанням технології іонного обміну для введення іону натрію в структуру каоліну. Його структура вивчалася за допомогою рентгенівської дифракції та протестована на здатність адсорбувати воду, щоб перевірити надійність каоліну як сировини для виробництва цеоліту. Для досліджень було обрано цеоліт 4A: NaA Na₁₂[Al₁₂Si₂₂O₄₈]^{*} 27H₂O кулька виробництва Hong Kong Chemical Corp. За даними [5], щільність накопичення енергії в цеоліті NaA становить 1370 кДж/кг. Властивості цеоліту типу А наведено в табл. 1.

Таблиця 1 – Цеоліт NaA Na₁₂[Al₁₂Si₂₂O₄₈] 27H₂O. НКС Corp. Hong Kong TY 2163-003-81279

Форма гранул	круглої форми
Діаметр гранул, мм	5,0
Насипна щільність, рахуючи на абсолютно суху речовину, г/см ³	≥ 0,65
Вологоємність цеоліту при осушенні повітря в статичних умовах, мг/г	≥ 160
Водостійкість, %	≥ 99,5
Масова частка втрат при прожарюванні, при t = 400 °С, %	≥ 2,0
Динамічна активність по парах води, при проскоковій концентрації, що відповідає точці роси не вище –60 °С, г/100 г	≥ 20 ≥ 160
Вологомісткість, %	≥ 1,5

Таким чином, для термохімічного акумулювання теплоти застосовують цеоліти типу А і Х. При цьому в роботі [7] на підставі порівняння характеристик різних типів цеолітів встановлено, що найкращими адсорбуючі властивості має цеоліт без сполучного 4АВF як для відкритих, так і закритих систем зберігання теплоти.

3. Принципи акумуляції теплоти цеолітами

Метод акумуляції тепла цеолітами ґрунтується на використанні тепла, пов'язаного з адсорбцією та десорбцією. Акумулювання тепла складається з двох підпроцесів і є процесом з переривчастим циклом. На рис. 1 схематично представлені цикли роботи накопичувача теплоти шаром цеоліту.

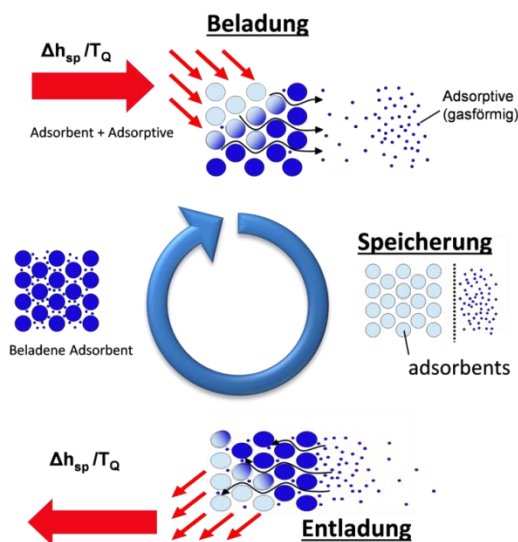


Рисунок 1 – Цикли роботи накопичувача теплоти шаром цеоліту [2]

На підставі результатів, отриманих у ході функціональних випробувань на закритій сорбційній термохімічній системі зберігання з сонячною тепловою енергією, проведених на першому

етапі з використанням цеоліту як акумулюючого тіла, розроблені подальші модифікації системи, зокрема, з управління процесами та енергоспоживанням [3], а також було проведено кілька динамічних тестів визначення продуктивності. При цьому максимальна температура зарядки варіювалася в діапазоні від 100 до 120 °С залежно від інтенсивності середньої сонячної радіації (від 60000 до 80000 люкс. Максимальна встановлена потужність сонячної теплової енергії становить 4 кВт. Термохімічна система зберігання дозволяє зберігати значно більше теплової енергії в порівняно з водяною завдяки можливо досяжній у чотири-шість разів більшій щільності зберігання для того ж об'єму і практично без втрат теплоти, причому незалежно від тривалості періоду зберігання. Тому слід очікувати у майбутньому, що в системах гарячого водопостачання та опалення приміщень, що використовують сонячну енергію, така технологія стане невід'ємною. Авторами [3] отримано, що середня теплова потужність, що досягається, знаходиться в межах 2,5-3 кВт на добу. Після 25 циклів заряджання/розрядження матеріал для зберігання майже не має фізичних пошкоджень. Випробування ефективності адсорбції, проведені на репрезентативному зразку вже використаного матеріалу для зберігання, також підтвердили циклічну стабільність [3].

У таблиці 2 наведено результати дослідження лабораторного вимірювання з використанням 1-1,5 кг цеоліту. У другій колонці показаний середній рівень об'єму води, який може бути реалізований у циклах адсорбції/десорбції. Наступні стовпці демонструють питому теплоту, що виділяється в процесі адсорбції. Порівняння даних для цеолітів Х-типу показало, що вид іону в цеоліті впливає не тільки на кількість адсорбованої води, але і на інтегральні теплоти адсорбції, а також на щільності енергії ρ_Q [4].

Таблиця 2 – Величина адсорбції, інтегральні теплоти адсорбції води Q_{int} та щільності енергії ρ_Q у розрахунку на масу та на об'єм акумулюючого матеріалу [4]

Матеріал	Величина адсорбції в г/г	Q_{int} , кДж/моль (води)	ρ_Q , кДж/кг (адсорбенту)	ρ_Q , кДж/літр (адсорбенту)
NaX (Bayer)	0.192	51.3	536	396
MgNaX	0.212	53.4	630	461
LiX-Zeolite	0.244	59.8	810	576
CaNaA-60	0.162*	(68)**	(623)**	(418)**
Silica gel (Solvay)	0.18	45.4	443	337
AS/CaCl ₂	0.182	63.5	637	619

Примітка: *Значення вимірів з 20-кілограмовим акумулятором. **Калориметрично виміряно при 343 К.

4. Принцип роботи переривчастого цеолітного циклу з використанням сонячної енергії

У роботі [5] розглянуто принцип роботи цеолітової сонячної системи охолодження (рис. 2). Цеоліт запечатаний в почорнілому герметичному контейнері, який опромінюється сонцем. Протягом денної частини циклу цеоліт нагрівається до максимальної температури 120 °С. Десорбція водяної пари спочатку починається при температурі цеоліту приблизно 40 °С. Ця десорбція підвищує тиск водяної пари в контейнері з 700 до 7000 Па, що відповідає підвищенню точки роси води з 0 до 40°С. Протягом цієї частини циклу більша частина теплової енергії, що надходить у контейнер, споживається теплоємністю цеоліту, збільшеною адсорбованою водяною парою. Основна десорбція відбувається вздовж ізобари постійного тиску, що визначається температурою конденсатора; наприклад, 7000 при 40°С. Пара починає розріджуватися, коли тепло конденсації відводиться зовнішньому повітрю, і рідка вода надходить у резервуар для зберігання. Протягом 8-годинної частини циклу нагрітий цеоліт десорбує водяну пару, яка конденсується в рідину та зберігається. Протягом 16-годинної ночі прохолодний цеоліт адсорбує водяну пару з випарника, створюючи охолодження.

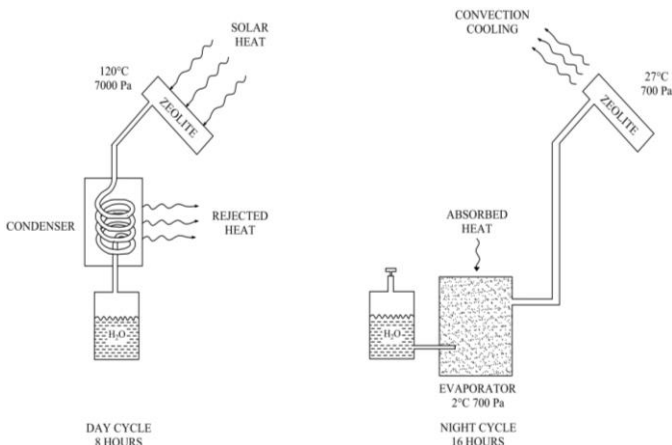


Рисунок 2 – Основний сонячний цеолітний цикл

Теплова потужність системи визначається інтегруванням загальної енергії, що надходить у цеолітовий контейнер протягом дня. Частина теплової енергії знову використовується за рахунок теплоємності цеоліту, але більша частина йде на десорбцію води, теплота десорбції коливається від 3000 до 5000 кДж/кг. Потенційна потужність

охолодження дорівнює теплоті випаровування водяної пари (при 40 °С це приблизно 2400 кДж/кг), яка була зріджена. Розподіл потужності охолодження на потужність нагрівання забезпечує ефективність цеолітного циклу, як правило, від 35% до 50%, яка ще більше знижується через втрати в колекторі.

Під час нічної частини циклу цеоліт охолоджується конвекцією та випромінюванням до температури навколишнього середовища та може адсорбувати водяну пару при низькому тиску. Рідка вода з резервуара надходить у випарник, де вона поглинає тепло з простору, який потрібно охолодити, і перетворюється на пару. Цеоліт адсорбує водяну пару, що утворюється у випарнику, підтримуючи тиск 700 Па, поки вода кипить при температурі нижче 1°С, і тепло адсорбції відводиться в атмосферу. Наприкінці нічного циклу цеоліт завантажує всю воду, яку він може адсорбувати під тиском 700 Па, і готовий до початку нового денного циклу.

Повна цеолітна сонячна система для опалення та охолодження будівель показана на рис. 3 [5].

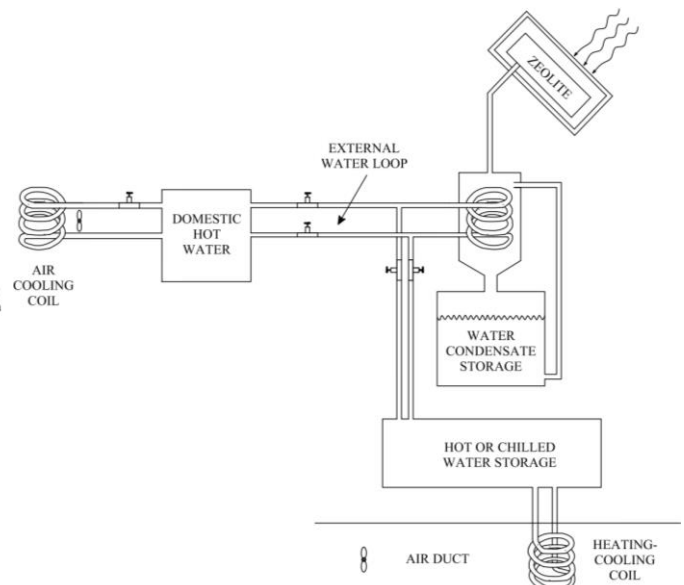


Рисунок 3 – Сонячна цеолітна система, яка забезпечує опалення, охолодження та гарячу воду для житлових будинків

Основним елементом такої системи є сонячний цеолітовий колектор. У вбудованому цеолітовому колекторі конденсатор і випарник об'єднані в єдиний теплообмінник, який підключений до зовнішнього водяного контуру. Протягом дня водяна пара, десорбована з цеоліту, нагрітого сонцем, конденсується в цьому теплообміннику, а

тепло конденсації відводиться до зовнішнього водяного контуру, таким чином забезпечуючи гарячу воду для різних потреб опалення. Вночі вода в конденсаторі/випарнику випаровується, а пара адсорбується цеолітом. Зовнішній контур забезпечує необхідну теплоту випаровування, виробляючи охолоджену воду для використання в кондиціонуванні повітря. Кожен вбудований сонячний цеолітовий колектор має площу $1,5 \text{ м}^2$ і в сонячний день забезпечить приблизно $1,5 \text{ кВт}\cdot\text{год}/\text{м}^2$ потужності опалення та охолодження. Пари таких колекторів були випробувані в Натіке, Массачусетс; Голден, Колорадо; і Тусон, штат Арізона; дані тестування детально представлені в іншому місці [5]. Вісім таких колекторів використовувалися для охолодження ізолюваної кімнати, яка призначалась для розміщення електронного обладнання в пустелі. Пристрій пройшов польові випробування в Джебель-Алі, Об'єднані Арабські Емірати, і успішно підтримував температуру в приміщенні $< 30^\circ\text{C}$ навіть за зовнішньої температури навколишнього середовища $>50^\circ\text{C}$. Інтегрований колектор цеоліту, однак, був розроблений в основному для житлового ринку. Для типового односімейного будинку площею 60 м^2 колектора забезпечать потреби в опаленні, охолодженні та гарячій воді майже в будь-якій кліматичній зоні Сполучених Штатів. Шість рядів по шість колекторів, кожен із загальною площею поверхні 54 м^2 , були встановлені на рівні землі з 240 м^3 ізолюваних резервуарів для зберігання гарячої/охолодженої води, які були закопані в землю між масивами. Система безперервно працювала протягом року і забезпечувала понад 90% усіх енергетичних потреб будинку.

Для ефективного застосування цеолітів у термохімічних акумуляторах теплоти необхідно вибрати не тільки правильний тип цеоліту, але й організувати правильну його підготовку і регенерацію. Стадія регенерації безпосередньо пов'язана з видаленням вологи цеолітів, яка здійснюється в процесі сушіння. Адсорбуюча здатність цеолітів визначається шляхом сушіння. Як свідчить робота [8], в даному випадку необхідно видалити з цеолітів адсорбційно пов'язану вологу. Як було показано в роботах [9, 10], застосування мікрохвильової енергії для підготовки (стадія гідротермальної кристалізації для термоактивації цеолітів, яку зазвичай проводять при $500\text{-}700^\circ\text{C}$ протягом 3-5 год) та регенерації цеолітів, що дозволяє не тільки видалити адсорбційно-пов'язану

вологу, але й отримати унікальну внутрішню структуру матеріалу.

5. Висновки

Термохімічна акумуляція теплоти цеолітами, заснована на сорбції/десорбції води в пористих матеріалах, в даний час є придатною для застосування сезонного зберігання тепла, зокрема в так званих енергозберігаючих будинках.

Представлений принцип роботи переривчастого сонячного цеолітного циклу. Теплова потужність системи визначається інтегруванням загальної енергії, що надходить у цеолітовий контейнер протягом дня. Частина теплової енергії знову використовується за рахунок теплоємності цеоліту, але більша частина йде на десорбцію води, теплота десорбції коливається від 3000 до 5000 кДж/кг. Потенційна потужність охолодження дорівнює теплоті випаровування водяної пари (при 40°C приблизно 2400 кДж/кг), яка була зріджена. Розподіл потужності охолодження на потужність нагрівання забезпечує ефективність цеолітного циклу, як правило, від 35% до 50%, яка ще більше знижується через втрати в колекторі.

За результатами аналізу літератури, кожен вбудований сонячний цеолітовий колектор має площу $1,5 \text{ м}^2$ і в сонячний день забезпечить приблизно $1,5 \text{ кВт}\cdot\text{год}/\text{м}^2$ потужності опалення та охолодження.

Визначено типи та види існуючих цеолітів, здійснено вибір цеолітів, доцільних до застосування як матеріали для термохімічного акумулявання теплоти. Найбільше практичне застосування мають цеоліти типу А і X, що мають двозначні позначення: KA, NaA, CaA, NaX, CaX. Також на підставі порівняння характеристик різних типів цеолітів встановлено, що найкращими адсорбуючими властивостями володіє цеоліт без сполучного 4ABF як для відкритих, так і закритих систем зберігання теплоти.

Для ефективного застосування цеолітів у термохімічних акумуляторах теплоти необхідно вибрати не тільки доцільний тип цеоліту, але й організувати правильну його підготовку і регенерацію. Застосування мікрохвильової енергії для підготовки (стадія гідротермальної кристалізації для термоактивації цеолітів, яку зазвичай проводять при $500\text{-}700^\circ\text{C}$ протягом 3-5 год) та регенерації цеолітів, що дозволяє не тільки видалити адсорбційно-пов'язану вологу, але й отримати унікальну внутрішню структуру матеріалу.

Особистий внесок авторів CRediТ

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

Література

1. **V. Lottner, E Hahne, M.E. Schulz.** Solar-assisted district heating plants // Status of the german programme solarthermie-2000 Solar Energy. – 2000. – Vol. 69, Issue 6. – P. 449-459.
2. **A. Lass-Seyoum, D. Borozdenko, T. Friedrich, M. Blicher, A. Kniss, T. Langhof, C. Wiegel, K. Kaaristu.** Adaption and demonstration of an adsorption heat storage system // Practical evaluation of new approaches to energy efficiency, 9th International Renewable Energy Storage Conference (IRES), Düsseldorf/Germany, March 9-11. – 2015.
3. **A. Lass-Seyoum, D. Borozdenko, T. Friedrich, S. Mack, T. Langhof.** Practical test on a closed sorption thermochemical storage system with solar thermal energy // Energy Procedia. – 2016. – Vol. 91. – P. 182-189.
4. **J. Jänchen, D. Ackermann, H. Stach, W. Brösicke,** Studies of the water adsorption on zeolites and modified mesoporous materials for seasonal storage of solar heat // Solar Energy. – 2004. – Vol. 76. – P. 339-344.
5. **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.
6. **Jalil R Ugal, Karim Hassan, Inaam 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. – 2011. –Vol. 9(9). – P. 2-5.
7. **Jochen Ja'nchen, Kristin Schumann, Erik Thrun, Alfons Brandt, Baldur Unger Udo Hellwig.** Preparation, hydrothermal stability and thermal adsorption storage properties of binderless zeolite beads // International Journal of Low-Carbon Technologies. – 2012. – Vol.7. – P. 275–279.
8. **Джабраїл Ісрафіл Огли.** Фізико-хімічні закономірності дегідратації та регідратації природних цеолітів // Автореферат дисертації на здобуття наукового ступеня доктора хімічних наук. – 1989. – 47 с.
9. **Бошкова, І., Волгушева, Н., Мукмінов, І., Бондаренко, О., Паскаль.** Вивчення перспектив застосування цеолітів для теплових акумуляторів // Холодильна техніка та технології. – 2021. – Т. 57(3). – С. 196-205.
10. **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.

Отримана в редакції 20.12.2022, прийнята до друку 16.03.2023

Modern trends in the use of thermochemical solar heat accumulators on the example of zeolites

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>

Thermochemical heat storage by zeolites is currently promising for seasonal heat storage. The method of heat storage by zeolites is based on the use of heat associated with adsorption and desorption. This method, compared to conventional heat storage (water or heat storage using phase transition heat), is characterized by an energy intensity 4-5 (theoretically 10-12) times higher than that of conventional systems. Of particular importance is the correct choice of zeolite. The structure and physical properties of KA, NaA, CaA, NaX, CaX zeolites are considered as having found the greatest practical application. For thermochemical heat storage, zeolites of type A and X are used. The principle of operation of an intermittent zeolite cycle using solar energy is considered. The thermal power of the system is determined by integrating the total energy entering the zeolite container during the day. The distribution between the

cooling capacity and the heating capacity provides an efficiency of the zeolite cycle, typically between 35% and 50%. An analysis of a solar zeolite system that provides heating, cooling and hot water for residential buildings is presented. The system worked continuously throughout the year and provided more than 90% of all energy needs of the house. For the effective use of zeolites in thermochemical heat accumulators, it is necessary not only to choose the right type of zeolite, but also to organize its correct preparation and regeneration. The use of microwave energy for preparation (stage of hydrothermal crystallization for thermal activation of zeolites, which is usually carried out at 500-700 °C for 3-5 hours) and regeneration of zeolites allows not only to remove adsorption-related moisture, but also to obtain a unique internal structure of the material.

Keywords: Heat; Adsorption; Desorption; Physical properties; Intermittent zeolite cycle

References

1. Lottner, V., Hahne, E., Schulz, M.E. (2000) Solar-assisted district heating plants. *Status of the german programme solarthermie-2000 Solar Energy*, 69(6), 449-459.
2. Lass-Seyoum, A., Borozdenko, D., Friedrich, T., Blicher, M., Kniss, A., Langhof, T., Wiegel, C., Kaaristu, K. (2015) Adaption and demonstration of an adsorption heat storage system. *Practical evaluation of new approaches to energy efficiency, 9th International Renewable Energy Storage Conference (IRES), Düsseldorf/Germany, March 9-11*.
3. Lass-Seyoum, A., Borozdenko, D., Friedrich, T., Mack, S., Langhof, T. (2016) Practical test on a closed sorption thermochemical storage system with solar thermal energy. *Energy Procedia*, 91, 182-189.
4. Jänchen, J., Ackermann, D., Stach, H., Brösicke, W. (2004) Studies of the water adsorption on zeolites and modified mesoporous materials for seasonal storage of solar heat. *Solar Energy*, 76, 339-344.
5. Tchernev, D.I. (2001) Natural Zeolites in Solar Energy Heating, Cooling, and Energy Storage. *Reviews in Mineralogy and Geochemistry*, 45(1), 589-617.
6. Jalil R. Ugal. Karim Hassan, Inaam H. Ali. (2011) 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(9), 2-5.
7. Jänchen, J., Schumann, K., Thrun, E., Brandt, A., Baldur Unger Udo Hellwig. (2012) Preparation, hydrothermal stability and thermal adsorption storage properties of binderless zeolite beads. *International Journal of Low-Carbon Technologies*, 7, 275-279.
8. Dzhabrail Israfil Ogly. (1989) Physico-chemical laws of dehydration and rehydration of natural zeolites. *Abstract of the dissertation for the degree of Doctor of Chemical Sciences*, 47.
9. 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.
10. 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.

Received 20 December 2022
 Approved 16 March 2023
 Available in Internet 31 March 2023