

ЕНЕРГЕТИКА ТА ЕНЕРГОЗБЕРЕЖЕННЯ

УДК 621.355.9

Особливості взаємодії діелектричних матеріалів з енергією мікрохвильового поля: приклад нагрівання цеолітів**К. О. Капауз**

Одеський національний технологічний університет, вул. Канатна, 112, Одеса, 65039, Україна

✉ e-mail: kapauz@ukr.net

ORCID: <http://orcid.org/0000-0003-2363-8819>

Розглядаються переваги методу нагрівання діелектричних матеріалів в мікрохвильовому полі, що ґрунтуються на особливості перетворення електромагнітної енергії в тепло безпосередньо в об'ємі шару. Перетворення енергії мікрохвильового поля в теплову в об'ємі матеріалу здатне призвести до унікальних ефектів, які не проявляються при застосуванні традиційних способів термообробки, як то зміна внутрішньої структури матеріалу, що дає можливість отримати кінцевий продукт з якісно новими властивостями. Визначається, що процеси, засновані на мікрохвильовому нагріванні матеріалів з достатньо високими діелектричними коефіцієнтами, мають великий потенціал енергоефективності. Нагрівання у мікрохвильовому полі є альтернативою традиційним методам, проте для багатьох технологій в промислових масштабах не використовується внаслідок недостатньо вивчених особливостей поглинання мікрохвильової енергії конкретним матеріалом та можливості виникнення негативних явищ, таких як великі температурні неоднорідності, локальне перегрівання, низький ККД перетворення енергії мікрохвильового поля у внутрішню енергію матеріалу. Основний фокус роботи зосереджений на визначенні ефективності застосування мікрохвильового нагріву для регенерації цеолітів. Інтерес до використання цеолітів визначається широкою сферою застосування, зокрема в технології зберігання тепла без втрат протягом тривалих періодів часу. Представлені результати досліджень сушіння щільного шару цеоліту 13X в мікрохвильовому полі та оцінка впливу діелектричних характеристик на енергоефективність перетворення мікрохвильової енергії в теплоту. Результати довели, що сушіння цеоліту 13X проходить децю інтенсивніше порівняно з цеолітом 4A. Проведено порівняння діелектричних властивостей цеоліту 13X та 4A, які суттєво впливають на перетворення енергії мікрохвильового поля в теплову та на енергетичну ефективність.

Ключові слова: Діелектричні втрати; Корисний тепловий потік; Температура; Вологовміст; Швидкість сушіння; Енергетична ефективність.

doi: <https://doi.org/10.15673/ret.v60i3.2946>

© The Author(s) 2024. 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**

Методи нагрівання на основі енергії мікрохвильового поля, на відміну від відомих процесів, дають можливість перетворювати енергію в тепло безпосередньо в об'ємі шару і, таким чином, оминати обмеження, пов'язані з перенесенням тепла теплопровідністю. Перетворення енергії мікрохвильового поля в теплову в об'ємі матеріалу здатне

призвести до унікальних ефектів, які не проявляються при застосуванні традиційних способів термообробки, як то зміна внутрішньої структури матеріалу, що дає можливість отримати кінцевий продукт з якісно новими властивостями, що спостерігається при регенерації цеолітів або при спіканні порошків для технічної кераміки; екстракти з поширеним спектром компонентів; сушіння зернового матеріалу при виникненні ефекту біости-

муляції. Процеси, засновані на мікрохвильовому нагріванні матеріалів, що характеризуються достатньо високими діелектричними коефіцієнтами, або мають в своєму складі речовини з властивостями полярних молекул, мають великий потенціал енергоефективності. Нагрівання у мікрохвильовому полі є альтернативою традиційним методам, проте для багатьох технологій в промислових масштабах не використовується. Одна з причин цього полягає в тому, що мікрохвильове (МХ) нагрівання при недостатньо вивчених особливостях поглинання МХ енергії конкретним матеріалом може призводити до негативних явищ, таких як великі температурні неоднорідності, локальне перегрівання, низький ККД перетворення енергії мікрохвильового поля у внутрішню енергію матеріалу. Ряд наукових та практичних питань, зокрема, пов'язаних із розігрівом щільного шару матеріалу з гранульованих часток, досі не вирішено. Ці аспекти особливо важливі при використанні адсорбентів та каталізаторів у технологічних процесах, сушінні та регенерації цеолітів, знезараження ґрунтів.

Метою роботи є визначення впливу характеристик діелектричних матеріалів на ефективність мікрохвильового нагрівання.

2. Огляд наукових праць, присвячених вивченню мікрохвильового нагрівання

Промислове мікрохвильове нагрівання (МХН) використовується з 1940-х років [1]. МХН принципово відрізняється від звичайного нагрівання, при якому тепло доставляється до поверхні матеріалу за допомогою випромінювання, конвекції та/або теплопровідності (рис. 1, [2]). Навпаки, МХН є явищем перетворення енергії, що відбувається через молекулярну/атомну/іонну взаємодію з електромагнітним полем.

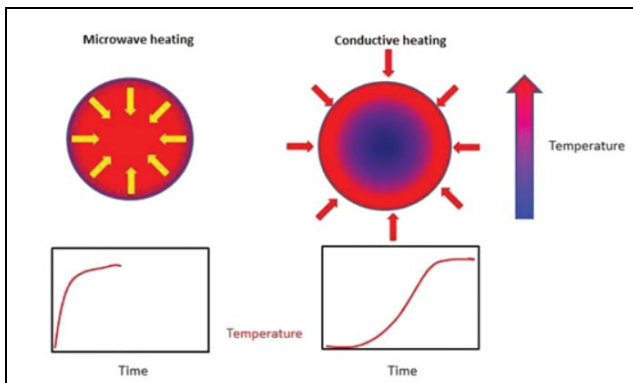


Рисунок 1 – Різниця між мікрохвильовим і кондуктивним нагріванням [2]

Однією з ключових переваг МХН перед звичайним конвективним та кондуктивним нагріванням є швидкість. Причиною високої швидкості є об'ємна взаємодія електромагнітного поля в мікрохвильовій камері з матеріалом. Навпаки, при конвективному та кондуктивному нагріванні тепловий фронт поширюється від поверхні матеріалу, з температурним профілем, що залежить від властивостей матеріалу і впливу транспорту вологи.

МХН залежить від здатності електричного поля мікрохвиль поляризувати дипольні молекули [2], рис. 2.

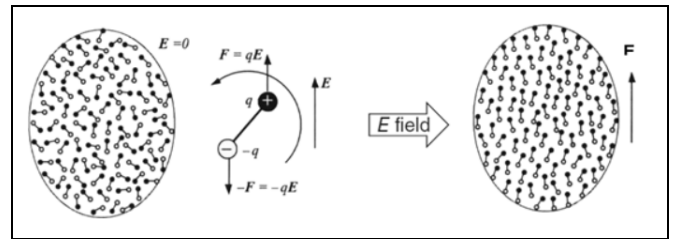


Рисунок 2 – Дія електричного поля E на диполі полярної молекули

Диполь – це, по суті, два однакові протилежні заряди, розділені кінцевою відстанню [3]. Прикладом цього є ковалентні зв'язки в молекулі води, які надають молекулі води дипольний рух. Вода є типовим випадком несиметричної молекули, оскільки існує тенденція більшого атома кисню утримувати два валентні електрони частіше, ніж два атоми водню. Це призводить до класичної дипольної структури. Диполі можуть бути природною властивістю діелектрика або вони можуть бути індукованими [4]. Спотворення електронної хмари навколо неполярних молекул або атомів через наявність зовнішнього електричного поля також може викликати тимчасовий рух диполя.

Взаємодія з коливальним зовнішнім електричним полем, пов'язаним із мікрохвильовою енергією, створює крутий момент на полярних молекулах, і результуючий рух породжує теплоту тертя всередині діелектрика, яка розсіюється. Залежно від частоти, диполь може рухатися в такт з електричним полем, відставати від нього або залишатися незмінним. Коли рух молекулярного диполя відстає від прикладеного поля, взаємодія між диполем і полем призводить до розсіювання енергії всередині матеріалу та нагрівання. Ступінь нагрівання залежить від різниці фаз між прикладеними полями та дипольного моменту молекул [3]. Легкість, з якою відбувається рух диполя, залежить від в'язкості та рухливості електронних

хмар у молекулі. У випадку води вони, у свою чергу, залежать від міцності та розміру мереж водневих зв'язків у рідкій фазі [5]. У вільній рідкій воді цей рух відбувається на частотах ГГц, тоді як у більш обмеженій «зв'язаній» воді – на частотах МГц, а в льоду – на частотах кГц.

У поєднанні з цими ефектами поляризації діелектрик також може демонструвати пряму провідність усередині матеріалу, оскільки заряди зміщуються прикладеними полями. Поєднання поляризації та провідності породжує струми зміщення всередині матеріалу. Комплексний струм зміщення можна розділити на реактивну та дійсну складові. Для визначення густини струму в діелектричному матеріалі за допомогою рівнянь Максвелла та фізики діелектричних матеріалів потрібно ввести комплексну діелектричну проникність ε^* [6]:

$$\varepsilon^* = \varepsilon' + j \cdot \varepsilon'' = \varepsilon_\infty + \frac{\varepsilon_s - \varepsilon_\infty}{1 + j \cdot \omega \cdot \tau_r} \quad (1)$$

Діелектричні втрати ε'' представляють резистивну природу електричних властивостей матеріалу [7]. Резистивні втрати в середовищі зменшують амплітуду мікрохвильового поля та генерують тепло всередині матеріалу. Діелектричні властивості більшості матеріалів залежать від температури, частоти та вологи.

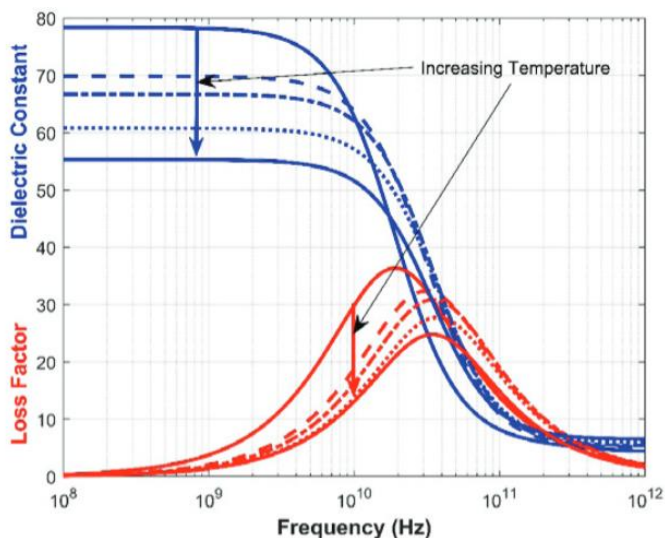


Рисунок 3 – Діелектрична проникність і діелектричні втрати води між 0°C і 100°C, стрілки показують вплив підвищення температури [3]

На рис. 3 показано частотну та температурну залежність діелектричних властивостей вільної

рідкої води. Цікаво відзначити, що максимальні діелектричні втрати відбуваються на набагато вищих частотах, ніж ті, які зазвичай зарезервовані для промислових мікрохвильових застосувань; однак коефіцієнт втрат значно зростає зі збільшенням концентрації розчинених твердих речовин у воді, особливо солей.

Оскільки вода відіграє таку важливу роль у багатьох системах, діелектричні властивості цих матеріалів залежать від вмісту води у зразках (рис. 4).

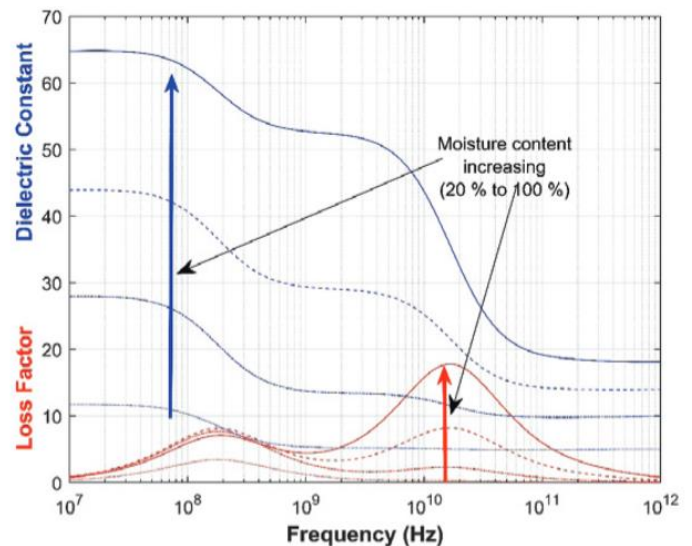


Рисунок 4 – Діелектричні властивості матеріалів як функція частоти та вмісту вологи [3]

У окремому випадку анізотропних матеріалів орієнтація вектора електричного поля має значний вплив на діелектричні властивості матеріалу [8]. Потужність, що передається електромагнітною хвилею, пропорційна квадрату величини електричного поля [9]. Напруженість електричного поля в діелектричному середовищі залежить від напруженості електричного поля на міжфазній поверхні між матеріалом і повітрям, коефіцієнта відбиття цієї міжфазної поверхні, геометрії мікрохвильового аплікатора, геометрії самого матеріалу, і внутрішнього ослаблення електричного поля з віддаленням від поверхні

Є кілька проблем при проведенні мікрохвильових досліджень. Першочергове значення має взаємодія між випромінюванням і речовиною. Якщо цікавить вплив електромагнітних полів, швидкість, з якою теплова енергія генерується в об'ємі зразка, не повинна перевищувати швидкість, з якою вона відводиться; інакше температура всередині зразка підвищиться. Якщо електромагнітна енергія подається на зразки з низькою швидкістю (наприклад, < 1 Вт/кг) або протягом

короткого часу, тоді пасивне охолодження може дозволити температурі зразка залишатися в межах припустимого. Раптове підвищення температури внаслідок невеликого збільшення застосованої мікрохвильової потужності дуже широко задокументовано [10]. При збільшенні потужності > 1 Вт/кг потребується додаткова система охолодження зразків.

Іншою значною проблемою є неоднорідність поглинання енергії всередині зразка [10,11]. Розвиток гарячих точок через природу мікрохвильового нагрівання викликає постійне занепокоєння багатьох дослідників. Розподіл температури в матеріалі, що піддається радіочастотному або мікрохвильовому нагріванню, залежить від кількох факторів; однак сама геометрія нагрітого матеріалу має тенденцію фокусувати електромагнітну енергію в певних місцях всередині тіла нагрітого об'єкта [12]. Рис. 5 ілюструє фокусувальний ефект мікрохвильового нагрівання в прямокутних блоках і сферах.

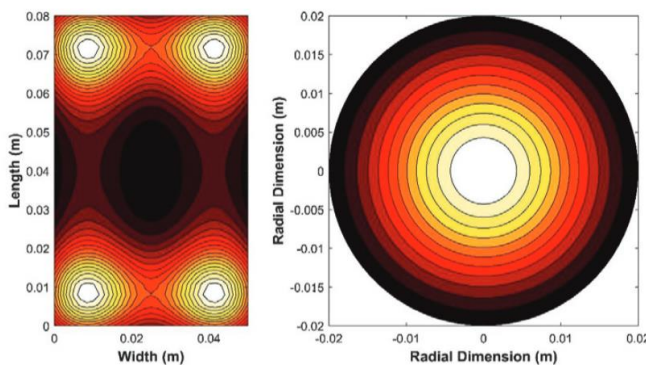


Рисунок 5 – Розподіл температури в (ліворуч) поперечному перерізі прямокутного блоку та (праворуч) поперечному перерізі сфери з діелектричними властивостями $\epsilon' = 9,6$ і $\epsilon'' = 2,5$ після 120 секунд мікрохвильового нагрівання на 2,45 ГГц, на основі моделей Броді [3]

Пов'язаною проблемою є прояв теплової втечі в цих гарячих точках. Теплова втеча, яка проявляється як раптове підвищення температури через невелике збільшення прикладеної мікрохвильової потужності, дуже широко задокументована [10]. Також повідомляється про цей ефект після деякого часу постійного нагрівання при фіксованих рівнях потужності, і зазвичай це пояснюється залежними від температури діелектричними та тепловими властивостями матеріалу.

Розглядаючи явище розповсюдження теплового фронту, Врізінга [13] використав аналітичні

розв'язки диференціальних рівнянь, які описують дифузію тепла (незалежно від руху вологи) в ізотермічних середовищах, щоб отримати S-подібні криві залежності температури від мікрохвильової потужності. Автори [14] також розробили S-подібні криві залежності температури від мікрохвильової потужності під час дослідження мікрохвильового нагрівання. Вони описують ці криві як багатозначну функцію мікрохвильової потужності, в якій верхні та нижні плечі стабільні, але центральне плече нестабільне. Коли потужність зростає від нуля, температура залишається на нижньому плечі до досягнення критичного рівня потужності; тоді нескінченно мале збільшення потужності спричинить стрибок температури до плеча. Якщо потужність зменшується, температура буде залишатися на плечі, доки не буде досягнуто друге критичне значення потужності; потім температура різко падає до нижньої частини [14]. На рис. 6 показано температуру та вологовміст в центрі стрижня діаметром 10 мм, нагрітого мікрохвильовою енергією.

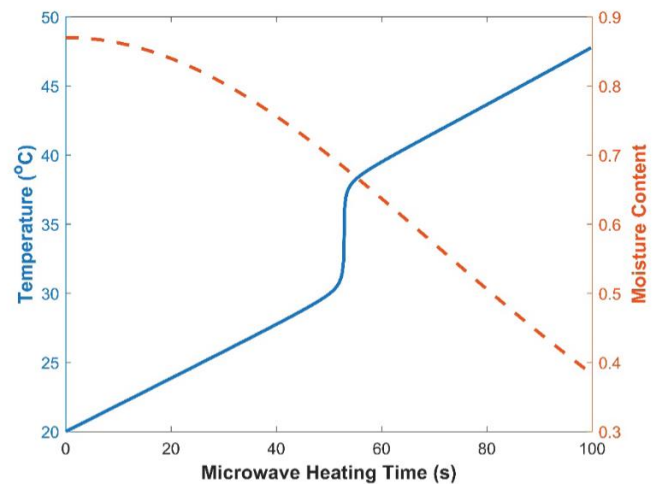


Рисунок 6 – Приклад теплового розбігу матеріалу через зміну діелектричних властивостей у міру висихання зразка [3]

У цьому випадку застосування мікрохвильового нагрівання висушує зразок, що в кінцевому підсумку знижує діелектричні властивості зразка. Коли діелектричні властивості досягають порогового значення, поле може резонувати всередині матеріалу та викликати раптовий стрибок температури.

Окремим питанням є виникнення нетеплових ефектів. Різні автори висунули припущення, що зміни термодинамічних параметрів під мікрохвильовим опроміненням у порівнянні з тими, що

прогнозуються при звичайному нагріванні, викликані «мікрохвильовим ефектом» [15]. Мікрохвильові фотони мають енергію порядку 10^{-5} еВ. Оцінки показують, що кількість мікрохвильових фотонів у промисловій печі надто мала, щоб встановити багатифотонну дисоціацію або іонізацію оброблених матеріалів [5]; тому ймовірність того, що мікрохвильова обробка має нетепловий вплив на термодинаміку системи невелика.

Одним із можливих пояснень спостережуваних змін у термодинамічних параметрах, які спостерігалися в експериментальній роботі, є сполучення тепла та пари [16]. Широко повідомлялося про дуже швидке нагрівання та висихання під час мікрохвильової обробки вологих матеріалів. Рух гарячої вологи крізь матеріал, під впливом мікрохвильового нагріву, ефективно підвищує теплопровідність і швидкість висихання.

3. Нагрівання цеоліту 13X в мікрохвильовому полі: оцінка енергетичної ефективності

Одним із перспективних застосувань мікрохвильового нагріву є підготовка цеолітів. Інтерес до вивчення цеолітів визначається широкою сферою застосування, зокрема технологія, що націлена на зберігання тепла без втрат протягом тривалих періодів часу. Поглинаючі накопичувачі з високопористих матеріалів, таких як цеоліти, можуть успішно застосовуватися в якості акумуляторів низькопотенційної теплоти. Однією з важливих операцій з підготовки цеолітів до використання є сушіння. Застосування мікрохвильового сушіння сприяє насамперед зміні внутрішньої структури цеоліту, завдяки чому адсорбційні

властивості посилюються. На відміну від мікроструктури, отриманої при традиційному сушінні, застосування мікрохвиль призводить до отримання більш дрібних зерен.

В даній роботі представлені результати досліджень сушіння щільного шару цеоліту 13X в мікрохвильовому полі та оцінка впливу діелектричних характеристик на енергоефективність перетворення МХ енергії в теплоту. Методика проведення експериментів, експериментальна установка та алгоритм обробки даних наведені в [17]. На рис. 7 наведений вигляд цеоліту 13X на електронних вагах.



Рисунок 7 – Зважування на електронних вагах ТВЕ-0,5-0,01 цеоліту 13X

У табл. 1 подано результати теплових розрахунків, отриманих на підставі експериментальних даних за дослідженням процесу переносу теплоти та вологи в щільному шарі цеолітів.

Таблиця 1 – Нагрівання вологого цеоліту 13X в МХ полі при різних значеннях маси. Вихідна потужність магнетрону $P=1$ кВт

Маса зразка	100	200	300
Тривалість МХ нагріву, с	120	300	360
Теплота на випаровування вологи, Дж	17210	47680	49550
Теплота на нагрівання матеріалу, Дж	12310	34520	34450
Сумарна теплота, Дж	29520	82200	84000
Відношення теплоти на випаровування до теплоти нагрівання	1,40	1,38	1,44
Корисний тепловий потік, Вт	246	274	280
ККД, %	24,6	27,4	32,7

Результати показують, що для обраного діапазону мас ККД відрізняється незначно, також зміна відношення теплоти на випаровування до

теплоти нагрівання входить в похибку експерименту. Дані висновки збігаються з результатами експериментів на цеоліту 4А [17]. Це пояснюється

наступним. По-перше, площа поверхні, відкритої до випаровування, була однаковою. По-друге, товщина шару не перевищувала 1,5 см, що менш глибини проникнення МХ енергії. Глибина проникнення (2) визначається залежністю [18]:

$$\Delta = \frac{1}{2\alpha} \text{ м}, \quad (2)$$

де α – коефіцієнт послаблення:

$$\alpha = \frac{2\pi}{\lambda_0} \left[\frac{1}{2} \varepsilon' \left(\sqrt{1 + \text{tg} \delta^2} - 1 \right)^{1/2} \right], \text{ м}^{-1} \quad (3)$$

За результатами розрахунків, глибина проникнення для 13X складала 0,1 м, а 4А – 0,153 м. Тобто умови для рівномірного нагрівання та випаровування виконувались.

Результати експериментів показують, що сушіння цеоліту 13X проходить дещо інтенсивніше порівняно з цеолітом 4А. На рис. 8 наведено зміну вологовмісту цеолітів за початкової маси 300 г. Порівняння швидкості сушіння проводилось на ділянці постійної швидкості. Швидкість сушіння цеоліту 4А становила $N = 3,0 \cdot 10^{-4}$ кг/(кг·с), для цеоліту 13X $N = 3,2 \cdot 10^{-4}$ кг/(кг·с). На графіку видно, що кінцевий вологовміст цеоліту 13X нижчий.

Таким чином, ефективність мікрохвильового сушіння цеоліту 13X дещо вища, ніж 4А.

На рис. 9 представлений графік зміни температур цеолітів при мікрохвильовому сушінні. Порівняння температурних кривих має значення в питаннях вибору типу цеолітів. Підвищення температури в процесі десорбції призводить до підвищення водоадсорбційної здатності адсорбенту в подальшій адсорбції [19]. Крім того, коли регенерація виконується при температурі нижче 80°C, продуктивність зволоження/осушення сильно знижується через недостатню десорбцію води.

Таблиця 2 – Діелектричні властивості цеолітів [20].

Цеоліт	ε'	ε''	$\text{tg} \delta$	$\alpha, \text{ м}^{-1}$	$\Delta, \text{ м}$
13X (NaX)	3,5	0,55	0,157	9,93	0,10
4A (NaA2)	3,62	0,36	0,10	6,55	0,153

Аналіз потоків теплоти, що йдуть на нагрівання матеріалу та випаровування вологи, показав, що при $t \geq 80$ °C спостерігається перерозподіл потоків: теплота випаровування починає переви-

Графік показує, що цеоліт 13X нагрівається більш інтенсивно в порівнянні з цеолітом 4А. Проте відмінності незначні.

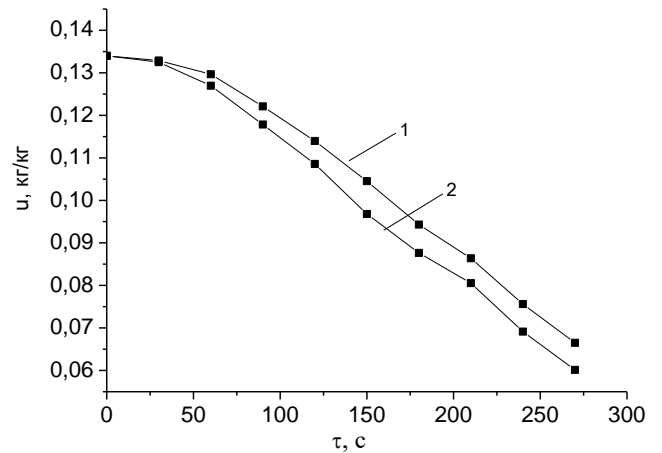


Рисунок 8 – Зміна вологовмісту цеолітів при сушінні в мікрохвильовому полі. Вихідна потужність магнетрону $P = 1$ кВт, маса матеріалу $m = 300$ г: 1 – цеоліт 4А; 2 – цеоліт 13X

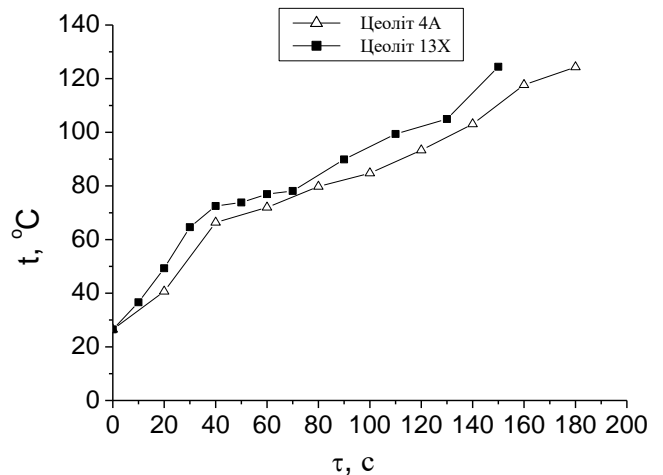


Рисунок 9 – Графік зміни температур цеолітів при мікрохвильовому сушінні

Діелектричні властивості цеоліту 13X та 4А, які суттєво впливають на перетворення енергії МХ поля в теплову та потрібні для порівняння енергетичної ефективності, наведені в табл. 2.

щувати тепло нагріву. Передбачається, що починає впливати ефект бародифузії, завдяки якому всередині зерен цеоліту інтенсифікується процес перенесення вологи, спрямований на поверхню.

Зниження ККД в кінці процесу сушіння пов'язане зі зниженням теплоти нагріву, що може бути пов'язане з погіршенням діелектричних характеристик. ККД нагріву для маси 200 і 300 г в інтервалі часу 60 ... 200 с практично збігаються.

4. Висновки

Для розуміння процесів взаємодії електромагнітного випромінювання мікрохвильової частоти з матеріалом потрібно мати знання про його діелектричні характеристики. Якщо такі властивості відомі, можна визначити коефіцієнти поглинання, коефіцієнти відбиття на межі між різними частинами матеріалу, величину нагріву, провести порівняльний аналіз та оцінити енергетичну ефективність нагріву у мікрохвильовому полі.

Основною причиною нерівномірного нагріву зразків є різке збільшення значення фактора діелектричних втрат зі зростанням температури. Нерівномірність нагріву викликає негативні наслідки для технологічного процесу та пов'язане з поганою керованістю звичайних НВЧ-джерел живлення, тобто магнетронів. В умовах проведення експериментів з цеолітами 13X та 4A товщина зразків була значно менш глибини проникнення мікрохвильової енергії в шар матеріалу, тобто умови рівномірного нагріву виконувались.

Аналіз потоків теплоти, що йдуть на нагрівання цеолітів 13X та випаровування вологи показав, що при $t \geq 80$ °C спостерігається перерозподіл потоків: теплота випаровування починає перевищувати тепло нагріву. Передбачається, що починає впливати ефект бародифузії, завдяки якому всередині зерен цеоліту інтенсифікується процес перенесення вологи, спрямований на поверхню. Зниження ККД в кінці процесу сушіння пов'язане зі зниженням теплоти нагріву, що може бути пов'язане з погіршенням діелектричних характеристик. ККД нагріву для маси 200 і 300 г в інтервалі часу 60 ... 200 с практично збігаються.

Література

1. **J. Sun et al.** Review on microwave-metal discharges and their applications in energy and industrial processes // *Applied Energy*. – 2016. – Vol. 175. – P. 141-157. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2016.04.091>.
2. **Meloni E., Iervolino G., Palma V.** Basics of Microwave Heating and Recent Advances // *Advances in Microwave-assisted Heterogeneous Catalysis*. – 2023. – P. 1-24. <https://doi.org/10.1039/bk9781837670277-00001>.
3. **G. Brodie, D. Gupta, J. Khan, S. Foletta, N. Boote.** 5A Brief Review of Microwave Heating // *Microwave Based Weed Control and Soil Treatment*. – 2018. – P. 43-54. <https://doi.org/10.1515/9783110605570-006>.
4. **C. Tannous.** Dielectric properties of Solids. Master // *Propriétés Diélectriques et Magnétiques*. – France, 2018. – 27 p.
5. Water and microwaves. URL: https://water.lsbu.ac.uk/water/microwave_water.html (access date: 27.07.2024).
6. **Debye P. J. W.** Polar molecules. – New York: Dover Publications, 1960. – 172 p.
7. **Y. Song et al.** Online multi-parameter sensing and condition assessment technology for power cables: A review // *Electric Power Systems Research*. – 2022. – Vol. 210. – P. 108140. <https://doi.org/10.1016/j.epr.2022.108140>
8. **P.-a. Yang et al.** Preparation and structure optimization of 2D MXene nanocomposites for microwave absorbing application // *Materials Today Physics*. – 2024. – Vol. 40. – P. 101291. <https://doi.org/10.1016/j.mtphys.2023.101291>.
9. **Y. Minamitani et al.** Intensity of electric field radiating from high-power pulsed electromagnetic wave generator for use in biological applications // *IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation*. – 2010. – Vol. 17. – No. 6. – P. 1895-1900. <https://doi.org/10.1109/tdei.2010.5658244>.
10. **M. I. Nelson et al.** The multiplicity of steady-state solutions arising from microwave heating. I. Infinite Biot number and small penetration depth // *The ANZIAM Journal*. – 2001. – Vol. 43. – No. 1. – P. 87-103. <https://doi.org/10.1017/s1446181100011445>.
11. **S. Li et al.** High-Accuracy Optical Fiber Transfer Delay Measurement Using Fiber-Optic Microwave Interferometry // *Journal of Lightwave Technology*. – 2021. – Vol. 39. – No. 2. – P. 627-632. <https://doi.org/10.1109/jlt.2020.3033280>.
12. **G. Brodie.** The Influence of Load Geometry on Temperature Distribution During Microwave Heating // *Transactions of the ASABE*. – 2008. – Vol. 51. – No. 4. – P. 1401-1413. <https://doi.org/10.13031/2013.25224>.
13. **Vriezinga C. A.** Thermal runaway in microwave heated isothermal slabs, cylinders, and spheres // *Journal of Applied Physics*. – 1998. – Vol. 83. – No. 1. – P. 438-442. <https://doi.org/10.1063/1.366657>.
14. **Zhang Z., Su T., Zhang S.** Shape Effect on the

- Temperature Field during Microwave Heating Process // Journal of Food Quality. – 2018. – Vol. 2018. – P. 1-24. <https://doi.org/10.1155/2018/9169875>.
15. **la Hoz A. d., Díaz-Ortiz A., Moreno A.** Review on Non-Thermal Effects of Microwave Irradiation in Organic Synthesis // Journal of Microwave Power and Electromagnetic Energy. – 2006. – Vol. 41. – No. 1. – P. 45-66. <https://doi.org/10.1080/08327823.2006.11688549>.
16. **G. Brodie.** Simultaneous Heat and Moisture Diffusion During Microwave Heating of Moist Wood // Applied Engineering in Agriculture. – 2007. – Vol. 23, – No. 2. – P. 179-187. <https://doi.org/10.13031/2013.22597>.
17. **І. Л. Бошкова та ін.** Експериментальне дослідження сушіння цеоліту «4а» у мікрохвильовому полі // Холодильна техніка та технологія. – 2023. – Т. 59. – № 3. – 197-204. <https://doi.org/10.15673/ret.v59i3.2658>.
18. **Yang X. H., Tang J.** Advances In Bioprocessing Engineering. – World scientific, 2002. – 184 p. <https://doi.org/10.1142/4763>.
19. **І. Л. Бошкова та ін.** Вивчення перспектив застосування цеолітів для теплових акумуляторів // Холодильна техніка та технологія. – 2021. – Т. 57. – № 3. – С. 196-205. <https://doi.org/10.15673/ret.v57i3.2171>.
20. **P. Shariaty.** Tailoring Molecular Sieves' Dielectric and Electric Properties for Efficient Microwave and Resistive Heating Regeneration // A thesis submitted in partial fulfillment of the requirements for the degree of Doctor of Philosophy in Environmental Engineering. – 2018. – 235 p.

Отримана в редакції 08.08.2024, прийнята до друку 16.09.2024

Features of the interaction of dielectric materials with microwave field energy: the example of heating zeolites

Kateryna Kapauz

Odesa National University of Technology, 112 Kanatnaya Str., Odessa, 65039, Ukraine

✉ e-mail: kapauz@ukr.net

ORCID: <http://orcid.org/0000-0003-2363-8819>

The advantages of the method of heating dielectric materials in the microwave field, which are based on the features of the conversion of electromagnetic energy into heat directly in the volume of the layer, are considered. The transformation of the energy of the microwave field into thermal energy in the volume of the material can lead to unique effects that are not manifested when using traditional methods of heat treatment, such as changing the internal structure of the material, which makes it possible to obtain a final product with qualitatively new properties. It is determined that processes based on microwave heating of materials with sufficiently high dielectric coefficients have a great potential for energy efficiency. Heating in a microwave field is an alternative to traditional methods, but it is not used for many technologies on an industrial scale due to the insufficiently studied features of the absorption of microwave energy by a specific material and the possibility of negative phenomena, such as large temperature inhomogeneities, local overheating, low efficiency of converting the energy of the microwave field into internal material energy. The main focus of the work is focused on determination of the effectiveness of microwave heating for the regeneration of zeolites. Interest in the use of zeolites is determined by a wide range of applications, including technology of heat storage without loss for long periods of time. The results of research on drying a dense layer of zeolite 13X in a microwave field and an assessment of the influence of dielectric characteristics on the energy efficiency of the conversion of microwave energy into heat are presented. The results proved that the drying of zeolite 13X is somewhat more intensive compared to zeolite 4A. A comparison of the dielectric properties of 13X and 4A zeolites, which significantly affect the conversion of the energy of the microwave field into heat and energy efficiency, was carried out.

Keywords: Dielectric loss; Useful heat flux; Temperature; Moisture content; Drying speed; Energy efficiency.

References

1. Sun, J., Wang, W., Yue, Q., Ma, C., Zhang, J., Zhao, X., & Song, Z. (2016). Review on microwave-metal discharges and their applications in energy and industrial processes. *Applied Energy*, 175, 141-157.
2. Meloni E., Iervolino G., Palma V. (2023). Basics of Microwave Heating and Recent Advances. *Advances in Microwave-assisted Heterogeneous Catalysis*, 1-24.
3. Brodie, G., Gupta, D., Khan, J., Foletta, S., Boote, N. 5A Brief Review of Microwave Heating. (2018b). *Microwave Based Weed Control and Soil Treatment*, 43-54.
4. Tannous, C. (2018). Dielectric properties of Solids. Master. *Dielectric and Magnetic Properties*, 27.
5. Water and microwaves. Retrived 27 July 2024 from https://water.lsbu.ac.uk/water/microwave_water.html.
6. Debye, P. J. W. (1960). Polar molecules. *New York: Dover Publications*, 172.
7. Song, Y., Chen, W., Wan, F., Zhang, Z., Du, L., Wang, P., Li, J., Wu, Z., & Huang, H. (2022). Online multi-parameter sensing and condition assessment technology for power cables: A review. *Electric Power Systems Research*, 210, 108140.
8. Yang, P.-a., Deng, W., Luo, J., Li, R., Li, P., Yin, Y., Huang, X., & Zhang, Y. (2024). Preparation and structure optimization of 2D MXene nanocomposites for microwave absorbing application. *Materials Today Physics*, 40, 101291.
9. Minamitani, Y., Ueno, T., Ohe, Y., & Kato, S. (2010). Intensity of electric field radiating from high-power pulsed electromagnetic wave generator for use in biological applications. *IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation*, 17(6), 1895-1900.
10. Nelson, M. I., Wake, G. C., Chen, X. D., & Balakrishnan, E. (2001). The multiplicity of steady-state solutions arising from microwave heating. I. Infinite Biot number and small penetration depth. *The ANZIAM Journal*, 43(1), 87-103.
11. Li, S., Qing, T., Fu, J., Wang, X., & Pan, S. (2021). High-Accuracy Optical Fiber Transfer Delay Measurement Using Fiber-Optic Microwave Interferometry. *Journal of Lightwave Technology*, 39(2), 627-632.
12. Brodie, G. (2008). The Influence of Load Geometry on Temperature Distribution During Microwave Heating. *Transactions of the ASABE*, 51(4), 1401-1413.
13. Vriezanga, C. A. (1998). Thermal runaway in microwave heated isothermal slabs, cylinders, and spheres. *Journal of Applied Physics*, 83(1), 438-442.
14. Zhang, Z., Su, T., & Zhang, S. (2018). Shape Effect on the Temperature Field during Microwave Heating Process. *Journal of Food Quality*, 2018, 1-24.
15. la Hoz, A. d., Díaz-Ortiz, A., & Moreno, A. (2006). Review on Non-Thermal Effects of Microwave Irradiation in Organic Synthesis. *Journal of Microwave Power and Electromagnetic Energy*, 41(1), 45-66.
16. Brodie, G. (2007). Simultaneous Heat and Moisture Diffusion During Microwave Heating of Moist Wood. *Applied Engineering in Agriculture*, 23(2), 179-187.
17. Boshkova, I., Volgusheva, N., Boshkov, L., Bondarenko, O., Hrechanovskiy, A. (2023) Experimental study of drying of zeolite "4a" in a microwave field. *Refrigeration Engineering and Technology*, 59(3), 197-204.
18. Yang, X. H., & Tang, J. (2002). Advances In Bioprocessing Engineering. WORLD SCIENTIFIC. <https://doi.org/10.1142/4763>.
19. Boshkova, I., Volgusheva, 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.
20. Shariaty, P. (2018). Tailoring Molecular Sieves' Dielectric and Electric Properties for Efficient Microwave and Resistive Heating Regeneration. *A thesis submitted in partial fulfillment of the requirements for the degree of Doctor of Philosophy in Environmental Engineering. Pooya Shariaty*, 235.

Received 08 August 2024

Approved 16 September 2024

Available in Internet 30 September 2024