

ЕНЕРГЕТИКА ТА ЕНЕРГОЗБЕРЕЖЕННЯ

УДК 533.9.082.74

Оцінка енергетичної ефективності мікрохвильового очищення ґрунту від антропогенного хімічного забруднення

І. Л. Бошкова^{1✉}, Н. В. Волгушева², О. І. Галкін³, С. О. Борець⁴, О. С. Бондаренко⁵¹⁻⁴Одеський національний технологічний університет, вул. Канатна, 112, Одеса, 65039, Україна;⁵Фаховий коледж нафтогазових технологій, інженерії та інфраструктури сервісу ОНТУ, вул. Левітана, 46а, Одеса, 65088, Україна✉ e-mail: ¹boshkova.irina@gmail.comORCID: ¹<http://orcid.org/0009-0009-5599-2709>; ²<http://orcid.org/0000-0002-9984-6502>; ³<http://orcid.org/0009-0000-1244-2736>; ⁴<http://orcid.org/0009-0001-9899-1003>; ⁵<https://orcid.org/0000-0002-0111-0768>

Наголошується, що з розвитком охорони навколишнього середовища рекультивация ґрунту стає все більш важливою, при чому в останні роки використовуються не тільки біологічні та хімічні методи, а також стрімко розвиваються методи термічної обробки завдяки високій ефективності та зручній експлуатації. Технологія мікрохвильового нагрівання привернула велику увагу, оскільки вона забезпечує економію часу, економічність і високу гнучкість. Аналіз літератури показує, що ефективна енергетична потужність і рівень температур для мікрохвильової рекультивации відрізнялися залежно від типу забрудненого ґрунту. Особливу увагу слід приділяти вологості ґрунту, тому що вона істотно впливає як на характеристики процесу нагрівання, так і на процеси, що відіграють роль усунення забруднюючих речовин. Наведені результати експериментальних досліджень, спрямовані на визначення енергоефективності мікрохвильового нагрівання ґрунту. Для досліджень було обрано чорноземний ґрунт з густиною $\rho = 1150 \text{ кг/м}^3$. Теплова енергія, що генерується у зразку, визначалась як сума її складових: частка на нагрівання самого матеріалу $Q_{\text{мат}}$ та випаровування вологи $Q_{\text{вип}}$, що становить корисно використовувану теплоту $Q_{\text{кор}}$, а також втрати в довкілля за рахунок променистого $Q_{\text{п}}$ і конвективного $Q_{\text{к}}$ теплообміну та втрати на нагрівання діелектричної комірки $Q_{\text{ком}}$. Отримано, що незважаючи на суттєве зниження вологовмісту зразків ґрунту, спостерігалось безперервне зростання температури, що свідчить про досить високі значення фактору діелектричних втрат, імовірно, внаслідок великої кількості органічних речовин. Коефіцієнт корисної дії мікрохвильової камери при завантаженні шару ґрунту товщиною 0,02 м та масою 0,4 кг складає 82 %, загальний ККД з урахуванням ККД магнетрону $\eta = 0,63 \%$. Визначено значення напруженості електричного поля в мікрохвильовій камері, яке пропонується враховувати при конструюванні промислових установок для мікрохвильової очистки ґрунтів від забруднення хімічними речовинами.

Ключові слова: Коефіцієнт корисної дії; Тепло- і масообмін; Вологовміст; Діелектричне нагрівання; Напруженості електричного поля

doi: <https://doi.org/10.15673/ret.v60i3.2999>

© 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

Діяльність людини призводить до внесення великої кількості різноманітних забруднюючих ре-

човин у ґрунт [1]. Наприклад, гомолог бензолу є одним із найнебезпечніших забруднювачів через його летючість і біологічну токсичність у ґрунті [2]. З розвитком охорони навколишнього середо-

вища рекультивация ґрунту стає все більш важливою, а термічна обробка є ефективним методом видалення забруднення ґрунту. В останні роки метод термічної обробки застосовується не тільки в лабораторних експериментах, але й в інженерній практиці завдяки його високій ефективності та зручній експлуатації [3]. Для традиційної термічної обробки метод нагрівання ззовні всередину неминуче призведе до марної витрати енергії, і це може бути дорогим через витрати на енергію [4]. Тому необхідно знайти нову технологію нагріву для покращення термообробки. Технологія мікрохвильового нагрівання привернула велику увагу в галузі охорони навколишнього середовища, оскільки вона забезпечує економію часу, економічність і високу гнучкість [5].

2. Використання енергії мікрохвильового поля для очищення ґрунту від антропогенного хімічного забруднення

В останні роки стосовно використання мікрохвильового (МХ) випромінювання з'явилися перспективні наукові публікації про розширення застосування технології МХ нагріву, зокрема для регенерації активованого вугілля [6] та видалення аміаку зі стічних вод [7], рекультивції ґрунтів, забруднених стійкими органічними забруднювачами [8], в роботах доведені обнадійливі результати.

Автори [7] порівняли економічність методу МХ нагрівання з витратами традиційного методу відпарювання, яке зосереджено на споживанні енергії. Отриманий висновок, що експлуатаційна вартість техніки МХ була трохи нижчою, ніж метод парового очищення. Зазначається, що у системі [7] лише 65% електроенергії можна перетворити на корисну. Якщо використання енергії покращиться, споживання енергії та економічні витрати при використанні МХ методу зменшаться.

Мікрохвильове нагрівання є одним із перспективних підходів до очищення забрудненого ґрунту [9], і теплові ефекти, що лежать в основі, варті вивчення. Результати досліджень показують, що потужність і частота мікрохвиль значно впливають на напруженість електричного поля в реакційній камері та розподіл температури в зразку ґрунту. В експерименті з використанням діатомового ґрунту було встановлено, що збільшення вмісту води до 10% підвищує максимальну температуру на 30 °C. Значення ефективної потужності і

температури для мікрохвильової рекультивациі відрізнялися залежно від типу забрудненого ґрунту. Оптимальна швидкість видалення для забрудненого ксилолом ґрунту була досягнута при мікрохвильовій потужності 500 Вт, тоді як для забрудненого нітробензолом ґрунту потрібна потужність 750 Вт. Результати [9] досліджень є теоретичною основою для мікрохвильової ремедіації забрудненого ґрунту.

Робота [1] показала перспективи використання одночасної мікрохвильової та інфрачервоної обробки (МХІЧ) для відновлення забруднених ґрунтів. Розподіл температури ґрунту досягався відносно однорідним. Показано, що МХІЧ може ефективно видаляти забруднювач толуолу з ґрунту, метод здатен заощадити час обробки та зменшити втрати енергії. Таким чином, обробка МХІЧ завдяки її рівномірному нагріванню, високій ефективності та низькому руйнуванню перспективна для рекультивациі ґрунту.

Мікрохвильове нагрівання ґрунту зазвичай здійснюється за допомогою різних антен, які спрямовували мікрохвильову енергію глибоко в ґрунт. Метою дослідження [10] була розробка нових мікрохвильових аплікаторів, що забезпечують неглибоке нагрівання (менше 50 мм). У цій статті представлені дві конструкції аплікатора, одна з яких заснована на гребінчастій структурі, що сповільнює, а інша – на принципі порушеного повного внутрішнього відображення, в яких використовуються затухаючі мікрохвильові поля для обмеження глибини мікрохвильового нагріву. Експериментальні вимірювання теплопродуктивності цих аплікаторів у ґрунтах з різною вологістю показують, що затухаюче мікрохвильове поле обмежує глибину нагріву, так що більша частина енергії проявляється у верхніх 50 мм ґрунту. Швидкість згасання поля для FTIR-аплікатора змінюється від $44,0 \pm 0,7 \text{ м}^{-1}$ до $30 \pm 1,2 \text{ м}^{-1}$ при зміні вологовмісту ґрунту з 32 % до 174 % (у перерахунку на суху масу). Це вище, ніж швидкість згасання поля для гребінчастого повільнохвильового аплікатора (від $17,6 \pm 0,7 \text{ м}^{-1}$ до $19,9 \pm 1,5 \text{ м}^{-1}$).

Техніко-економічний аналіз обробки забрудненого вуглеводнями ґрунту за допомогою мікрохвильового нагріву, вплив текстури та вологості ґрунту на проникнення електричного поля, умови експлуатації та енергетичні витрати наведені в [11].

Природні ґрунти, як відомо, є надзвичайно складними сумішами речовин, тому опис індиві-

дуальних досліджень властивостей ґрунту з точки зору їх впливу на діелектричне нагрівання ускладнюється [12]. Особлива увага приділялася вологості ґрунту, тому що вона істотно впливає як на характеристики процесу нагрівання, так і на процеси усунення забруднюючих речовин. В [13] представлена мікрохвильова техніка, яка виконує ремедіацію ґрунтів, забруднених леткими органічними сполуками (ЛОС), на основі використання електромагнітних полів для операцій нагрівання. Увага зосереджена на тепло- і масообміні, що відбувається в пористих зволжених середовищах, таких як ґрунтова матриця. Досліджено процес мікрохвильової дистиляції водяною парою. З'ясовано, що зміна діелектричних властивостей ґрунтової матриці відіграє вирішальну роль у поширенні електромагнітного поля. Запропоновано та підтверджено математичну модель процесу відновлення ґрунту, яка пов'язує всі вищезазначені параметри.

3. Дослідження енергетичної ефективності нагрівання ґрунту в мікрохвильовому полі

3.1. Методика проведення експерименту та обробки даних

Експериментальні дослідження були спрямовані на визначення енергоефективності МХ нагрівання ґрунту. Дослідження проводились на установці, представленій в [14].

Матеріал завантажувався у ємність та зважувався. Зразок з необхідною масою містився в мікрохвильову камеру, де витримувався певний проміжок часу, після вимикання зразок виймався з камери. Далі проводилося вимірювання температури за допомогою мідь-константанових термопар у 3 точках шару (поверхня, центр, дно).

Для досліджень було обрано чорноземний ґрунт густиною $\rho = 1150 \text{ кг/м}^3$. Для визначення початкового вмісту вологи ґрунт висушувався до нульового і по різниці між зважуваннями розраховувалося початкове.

Показниками, що характеризують режими роботи мікрохвильових апаратів, є ефективність використання електроенергії та потужність, що йде на зростання температури зразка і випаровування вологи. Ці показники визначають коефіцієнти корисної дії магнетрону η_m , камери η_k та коефіцієнт використання теплової енергії η_T ККД магнетрону визначається наступним співвідношенням:

$$\eta_m = \frac{P_{вих}}{P_c} \quad (1)$$

де $P_{вих}$ – вихідна потужність магнетрону, Вт; P_c – споживана потужність мікрохвильової камери, що визначається за пастортними характеристиками.

Для енергоефективності необхідно знати, яка частина мікрохвильової енергії перетворилася на теплову енергію Q_m , в складі якої враховується частка на нагрівання самого матеріалу Q_{mat} та випаровування вологи $Q_{вип}$, що становить корисно використовувану теплоту $Q_{кор}$, а також втрати в довкілля за рахунок променистого Q_n і конвективного Q_k теплообміну та втрати на нагрівання діелектричної комірки $Q_{ком}$:

$$Q_m = Q_{mat} + Q_{вип} + Q_k + Q_n + Q_{ком} \quad (2)$$

При діелектричному нагріванні під дією електромагнітного поля контейнери, повітря та стінки робочої камери практично не нагріваються. Але у зв'язку з виникненням в результаті нагріву перепаду температур між ґрунтом, що обробляється, і навколишнім середовищем виникають тепло-втрати.

Коефіцієнт корисної дії камери визначається відношенням теплоти Q_m до вихідної потужності магнетрону $P_{вих}$:

$$\eta_{кор} = \frac{Q_m}{P_{вих}} \quad (3)$$

Зі збільшенням втрат теплоти знижується коефіцієнт використання теплової енергії η_T , який визначається наступним співвідношенням:

$$\eta_T = \frac{Q_{кор}}{Q_m} \quad (4)$$

Визначимо втрати у навколишнє середовище за рахунок конвективного теплообміну:

$$Q_k = \alpha \cdot F \cdot \Delta t \quad (5)$$

де α – коефіцієнт тепловіддачі, Вт/(м²К); Δt – різниця температур поверхні тіла та навколишнього середовища °С; F – площа теплопередаючої поверхні, м².

Тепловіддача здійснюється за природної кон-

векції. Визначальна температура – температура повітря в МХ камері.

Число Релея:

$$Ra = \frac{g \cdot d^3}{\nu^2} = 1,822 \cdot 10^7,$$

де ν – коефіцієнт кінематичної в'язкості, λ – коефіцієнт теплопровідності, Pr – число Прандтля, β – коефіцієнт температурного розширення, d – діаметр експериментальної комірки.

Коефіцієнт температурного розширення

$$\beta = \frac{1}{T} = 0,00343 \text{ K}^{-1}$$

де T – температура повітря в камері, К.

Теплофізичні властивості повітря при $t = 18^\circ\text{C}$:

- коефіцієнт кінематичної в'язкості $\nu = 14,88 \cdot 10^{-6} \text{ м}^2/\text{с}$

- коефіцієнт теплопровідності $\lambda = 0,025 \text{ Вт}/(\text{м} \cdot \text{К})$

- число Прандтля $Pr = 0,7034$

Тобто число Релея лежить у межах $10^3 \leq Ra \leq 10^8$, число Нуссельта визначається наступною залежністю:

$$Nu = 0,5 \cdot Ra^{0,25} \cdot \left(\frac{Pr}{Pr_{cm}} \right)^{0,25} = 33,$$

де Pr_{cm} – число Прандтля при температурі поверхні ґрунту в комірці.

Коефіцієнт тепловіддачі

$$\alpha = \frac{Nu \cdot \lambda}{d} = 8,7 \text{ Вт}/\text{м}^2\text{К}.$$

Площа теплопередаючої поверхні:

$$F = \frac{\pi \cdot d^2}{4} = 0,00785 \text{ м}^2.$$

Визначено, що втрати в довкілля за рахунок конвективного теплообміну $Q = 4,9 \text{ Вт}$.

Втрати в довкілля за рахунок променистого теплообміну Q_n :

$$Q_n = \varepsilon_{\text{нав}} \cdot C_0 \left[\left(\frac{T_M}{100} \right)^4 - \left(\frac{T_{\text{ст.кам}}}{100} \right)^4 \right] \varphi_{1-2} F = 5,2 \quad (6)$$

де $\varepsilon_{\text{нав}}$ – наведений ступінь чорноти, [15]; T_M – середня (за часом обробки) температура поверхні матеріалу, К; $T_{\text{ст.кам}}$ – температура внутрішніх стінок мікрохвильової камери; C_0 – постійна випромінювання абсолютно чорного тіла, $= 5,67$; φ_{1-2} – середній кутовий коефіцієнт щодо внутрішньої поверхні мікрохвильової камери, $\varphi_{1-2}=1$.

Для розрахунку $\varepsilon_{\text{нав}}$ враховуємо, що ми маємо випромінювання стосовно одного тіла (матеріал, що нагрівається) у порожнині іншого:

$$\varepsilon_{\text{нав}} \left[\left(\frac{1}{\varepsilon_1} - 1 \right) \cdot \varphi_{1-2} + \left(\frac{1}{\varepsilon_2} - 1 \right) \cdot \varphi_{2-1} + 1 \right],$$

де ε_1 , ε_2 – ступінь чорноти стінок мікрохвильової камери та матеріалу в комірці, відповідно [15]:

Для проведення експериментів обирався чорноземний ґрунт з масою 0,4 кг. Експериментальна ячійка з досліджуваним матеріалом містилася в мікрохвильову камеру. Через 10 с ваговим методом визначалося кількість води, що випарувалася, і розраховувався вологовміст матеріалу.

3.2. Результати та обговорення

У табл. 1 наведено результати вимірювань та обробки даних. Температура вимірювалася у трьох точках за допомогою термопар та за результатами вимірювань їх значення усереднювалися. Вихідна потужність магнетрону $P = 1000 \text{ Вт}$. Початковий вміст води $u_0 = 37\%$. Для визначення вмісту води спочатку визначили масу сухої речовини, для чого зразок висушили до нульового вмісту води: $m_c^{100} = 0,073 \text{ кг}$. При цьому маса води у зразку 0,1 кг складала $m_g^{100} = 0,027$. У досліджуваному зразку масою 400 г $m_c^{400} = 0,292 \text{ кг}$, $m_g^{400} = 0,108 \text{ кг}$.

Таблиця 1 – Експериментальні дані дослідження мікрохвильового нагрівання ґрунту. Товщина шару 2,0 см

№	τ , с	$\bar{t}$, $^\circ\text{C}$	m , г	Δm	m_B , г	u , кг/кг
1	0	18	400	0	0,108	0,37
2	240	63	334	0,066	0,042	0,144

На рис. 1 наведено графік зміни температури матеріалу за часом. Видно, що навіть при виборі середніх значень t , коливання суттєві. Це з пов'язано з тим, що відбувається одночасне перенесення теплоти і маси (випаровування води).

Маса матеріалу 400 гр, вихідна потужність магнетрону 800 Вт.

Вихід води супроводжується втратою енергії та, відповідно, зниженням температури, як дія негативного джерела теплоти. Але підведення мікрохвильової енергії призводить до зростання температури, причому видно, що це позитивне джерело теплоти набагато інтенсивніше, ніж теплота випаровування.

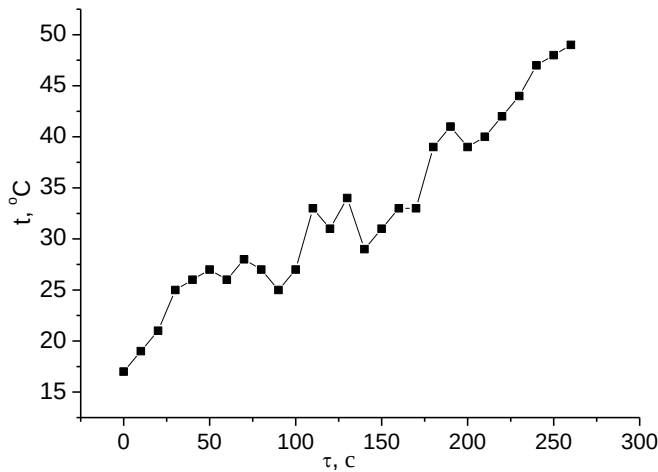


Рисунок 1 – Зміна середньої температури матеріалу за часом

На рис. 2 представлений графік зміни вологовмісту ґрунту масою 400 г в часі при вихідній потужності магнетрону 800 Вт. Графік показує, що хід кривої змінюється після $\tau = 220$ с. Це відбувається внаслідок значного зменшення вологи та виходу на падаючу швидкість сушіння.

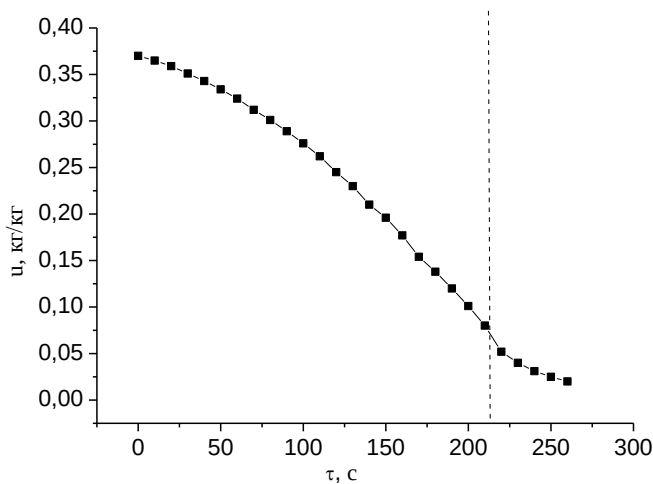


Рисунок 2 – Зміна вологовмісту ґрунту масою 400 г за часом при вихідній потужності магнетрону 800 Вт

Незважаючи на зниження вологовмісту практично до нульового рівня, зростання температури продовжилося, що говорить про досить високі значення діелектричних характеристик, імовірно, внаслідок великої кількості органічних речовин. Оскільки вологовміст вихідного ґрунту суттєвий, спостерігається монотонне зниження маси матеріалу.

Аналіз результатів показує, що для оцінки ККД раціонально провести експеримент безперер-

вно, не виймаючи матеріал з МХ камери, що знизить похибку експерименту. При цьому тривалість експерименту має корелюватися з покроковим експериментом на дослідження кінетики сушіння. Результати наведено у табл. 1.

Дані показують, що темп випаровування знизився: так, на 240 с відповідно до табл. 1 маса матеріалу склала 320,2 г, що на 20 г менше, ніж в експерименті з безперервним нагріванням у мікрохвильовій камері. Це пов'язано з тим, що, витягаючи зразок, умови для випаровування поліпшувалися, під час самих вимірів волога додатково випаровувалась. У замкненому просторі робочої камери вихід вологи був відносно утруднений. Загальний час нагріву становив $\tau = 240$ с.

Значення середньої маси:

$$\bar{m} = \frac{m_n + m_k}{2} = 0,367 \text{ кг},$$

де m_n – початкова маса ґрунту, г; m_k – кінцева маса ґрунту, кг.

Як видно з табл. 1, випарувалося 0,066 кг води. Тоді теплота на випаровування:

$$Q_{\text{вип}} = \frac{m_{\text{вип}} \cdot r}{\tau} = 655 \text{ Вт}$$

де $m_{\text{вип}}$ – маса випареної вологи, r – питома теплота випаровування, τ – час нагрівання.

Витрати на нагрівання ґрунту:

$$Q_{\text{нагр}} = \frac{\bar{m} \cdot c \cdot \Delta t}{\tau} = 137,7 \text{ Вт},$$

де c – теплоємність ґрунту, $\bar{m}$ – середня (з урахуванням початкового та кінцевого значення) маса матеріалу, τ – час нагрівання, Δt – зміна температури матеріалу при нагріванні.

Для різних мінеральних та органічних компонентів ґрунту об'ємна теплоємність майже однакова і становить $2,0 \cdot 10^3 \dots 2,7 \cdot 10^3$ кДж/(м³·К). Очевидно, що теплоємність різних ґрунтів залежить не стільки від складу твердої частини ґрунту, скільки від кількості повітря і води, що знаходяться в порах, оскільки теплоємність води дорівнює $c_p = 4,2 \cdot 10^3$ Дж/(м³·К), а теплоємність повітря – $c_p = 1,2$ кДж/(м³·К). Теплоємність приймалася рівною $c = 2,0$ кДж/(кг·К) відповідно до [16].

Тоді корисна теплота перетворення мікрохвильової енергії

$$Q_{\text{кор}} = 655 + 137,7 = 792,7 \text{ Вт}.$$

З урахуванням нагріву експериментальної комірки від 18 до 63 °С масою 70 г і втрат у довкілля, теплота перетворення мікрохвильової енергії у внутрішню енергію ґрунту:

$$Q_m = 792,7 + 22,3 + 5,2 = 820,2 \text{ Вт}.$$

Остаточно, коефіцієнт корисної дії камери: $\eta_{\text{кор}} = 82 \%$.

Коефіцієнт корисної дії мікрохвильової камери при завантаженні шару ґрунту товщиною 0,02 м масою 0,4 кг складає 82 %, загальний ККД з урахуванням ККД перетворення електричної енергії в теплову складає $\eta = 0,63 \%$. Можна зробити висновок, що використання МХ обробки доцільно в методі обробки ґрунту. Результати [17] показують, що 98,95 і 96,39% загального вмісту нафтових вуглеводнів НВВ в легкому і сильно забрудненому сировою нафтою ґрунті можна видалити за 15 і 20 хвилин при 1000 Вт, тоді як залишкові НВВ становлять близько 143,2 і 401,4 мг/кг відповідно. Це вказує на те, що видалення легкої сирової нафти з ґрунту є набагато ефективнішим і споживає менше енергії через різницю у механізмі видалення для різних фракцій. Порівняння методів нагрівання ґрунтів, забрудненими нафтопродуктами, показує, що тривалість та енергозатрати значно вище при нагріванні сухою парою внаслідок того, що потребується більш висока температура, яка відповідає температурі кипіння нафтової фракції. При МХ нагріванні, хоча об'ємна температура ґрунту, забрудненого вуглеводнями, залишається близько 100 °С, речовини з температурами кипіння 218...400 °С видаляються повністю. Це пояснюється виборчим підігрівом, за яким створюються локальні температури у структурі ґрунту, достатні для залучення вуглеводневих забруднювачів у пар з температурами кипіння 218...400 °С.

Відома залежність, яка пов'язує кількість тепла q , що виділяється в одиниці об'єму матеріалу при МХ нагріванні, з діелектричними властивостями матеріалу, що отриманої на підставі закону Джоуля-Ленца [18]:

$$q = 5,56 \cdot 10^{-11} \cdot f \cdot \varepsilon' \cdot \text{tg} \delta \cdot E^2 \text{ Вт/м}^3 \quad (7)$$

де E – напруженість зовнішнього електричного поля, В/м; f – частота, $f = 2450$ МГц; ε – відносна діелектрична постійна, або діелектрична проникність; δ – кут діелектричних втрат.

Питома напруженість зовнішнього електричного поля:

$$q = Q_m / V = 2,26 \cdot 10^6 \text{ Вт/м}^3,$$

де V – об'єм матеріалу, $V = 0,0003637 \text{ м}^3$.

Проаналізовано роботи з методів дослідження діелектричних характеристик і даних щодо вимірювань діелектричних характеристик різних ґрунтів [19, 20]. Відповідно до [21], відносна діелектрична проникність $\varepsilon' = 13$, тангенс кута діелектричних втрат $\text{tg} \delta = 0,0012$ (при частоті 2450 МГц). Напруженість електричного поля визначається залежністю:

$$E = \sqrt{\frac{q}{5,56 \cdot 10^{-11} \cdot f \cdot \varepsilon' \cdot \text{tg} \delta}} = 3,4 \cdot 10^4 \text{ В/м} \quad (8)$$

Значення напруженості електричного поля в мікрохвильовій камері пропонується враховувати при конструюванні промислових установок для мікрохвильової очистки ґрунтів від забруднення хімічними речовинами.

На підставі розрахованого значення питомої потужності за формулою (7), для заданого об'єму ґрунту, що оброблюється, з урахуванням теплового ККД мікрохвильової камери $\eta_m = 82 \%$ проведені розрахунки значення вихідної потужності магнетронів Q та споживаної потужності P , яка дає можливість визначити необхідну кількість магнетронів. Початковий вологовміст ґрунту $u = 37 \%$, час обробки 4 хв. Дані наведені в табл. 2.

Таблиця 2 – Сумарна вихідна потужність магнетронів Q та споживана потужність P в залежності від маси завантаження МХ камери ґрунтом

m , кг	1,5	3,0	4,5	6	7,5	9
V , м ³	0,0013	0,0026	0,0039	0,0052	0,0065	0,0078
Q , кВт	3,53	7,06	10,6	14,1	17,7	21,2
P , кВт	4,1	8,1	12,2	16,2	20,3	24,4

Отримані дані рекомендовані для проведення проектних розрахунків мікрохвильової камери резонансного типу з метою подальшого конструювання мікрохвильової установки промислового призначення.

4. Висновки

Метод ремедіації ґрунтів, забруднених легкими органічними сполуками, заснований на на-

гріванні в мікрохвильовому полі, демонструє високу енергоефективність.

При дослідженні кінетики нагрівання ґрунту в МХ полі визначено, що, незважаючи на зниження вологовмісту (практично до нульового), зростання температури продовжилося, що пояснюється досить високими значеннями фактору діелектричних втрат внаслідок вмісту органічних речовин.

Коефіцієнт корисної дії мікрохвильової камери при завантаженні шару ґрунту товщиною 0,02 м масою 0,4 кг складає 82 %, загальний ККД з урахуванням ККД магнетрону $\eta = 0,63$ %.

Значення напруженості електричного поля в мікрохвильовій камері $E = 3,4 \cdot 10^5$ В/м пропонується враховувати при конструюванні промислових установок для мікрохвильової очистки ґрунтів від забруднення хімічними речовинами.

Особистий внесок авторів CRediT

Бошкова І. Л.: методичне забезпечення, планування експерименту. **Волгушева Н. В.:** створення методологічних засад роботи, експериментальні дослідження. **Галкін О. І.:** експериментальні дослідження, інформаційний пошук, аналіз даних. **Борець С. О.:** математична обробка результатів експериментів, проведення теплових розрахунків. **Бондаренко О. С.:** аналітичний огляд літературних даних, аналіз та обробка результатів експерименту.

Література

1. **K. Yang et al.** An effective thermal treatment of toluene-contaminated soil by uniform heating from microwave coupled infrared radiation (MCIR) // *Journal of Soils and Sediments*. – 2021. – Vol. 21. – No. 3. – P. 1329-1336. doi: <https://doi.org/10.1007/s11368-020-02855-1>.
2. **G. Pei et al.** Surfactant flushing remediation of o-dichlorobenzene and p-dichlorobenzene contaminated soil // *Chemosphere*. – 2017. – Vol. 185. – P. 1112-1121. doi: <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2017.07.098>.
3. **H.-L. Cao et al.** Microwave-induced decontamination of mercury polluted soils at low temperature assisted with granular activated carbon // *Chemical Engineering Journal*. – 2018. – Vol. 351. – P. 1067-1075. doi: <https://doi.org/10.1016/j.cej.2018.06.168>.
4. **Falciglia P. P., Scandura P., Vagliasindi F. G. A.**

Modelling of in situ microwave heating of hydrocarbon-polluted soils: Influence of soil properties and operating conditions on electric field variation and temperature profiles // *Journal of Geochemical Exploration*. – 2017. – Vol. 174. – P. 91-99. doi: <https://doi.org/10.1016/j.gexplo.2016.06.005>.

5. **Chien Y.-C.** Field study of in situ remediation of petroleum hydrocarbon contaminated soil on site using microwave energy // *Journal of Hazardous Materials*. – 2012. – Vol. 199-200. – P. 457-461. doi: <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2011.11.012>.

6. **X. Liu et al.** Simultaneous pentachlorophenol decomposition and granular activated carbon regeneration assisted by microwave irradiation // *Carbon*. – 2004. – Vol. 42, no. 2. – P. 415-422. doi: <https://doi.org/10.1016/j.carbon.2003.12.032>.

7. **L. Lin et al.** Removal of ammonia nitrogen in wastewater by microwave radiation: A pilot-scale study // *Journal of Hazardous Materials*. – 2009. – Vol. 168, no. 2-3. – P. 862-867. doi: <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2009.02.113>.

8. **L. Lin et al.** Treatment of chloramphenicol-contaminated soil by microwave radiation // *Chemosphere*. – 2010. – Vol. 78, no. 1. – P. 66-71. doi: <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2009.09.054>.

9. **C. Zhou et al.** Thermal Effects of Microwaves in Contaminated Soil Remediation // *Water, Air, & Soil Pollution*. – 2022. – Vol. 233, no. 1. doi: <https://doi.org/10.1007/s11270-022-05497-w>.

10. **Brodie G., Torgovnikov G.** Microwave Soil Heating with Evanescent Fields from Slow-Wave Comb and Ceramic Applicators // *Energies*. – 2022. – Vol. 15, no. 3. – P. 1068. doi: <https://doi.org/10.3390/en15031068>.

11. **Falciglia P. P., Vagliasindi F. G. A.** Technoeconomic analysis of hydrocarbon-polluted soil treatment by using ex situ microwave heating: influence of soil texture and soil moisture on electric field penetration, operating conditions and energy costs // *Journal of Soils and Sediments*. – 2015. – Vol. 16, no. 4. – P. 1330-1344. doi: <https://doi.org/10.1007/s11368-015-1130-6>.

12. **Chantrey P.** Industrial Microwave Heating // *Electronics and Power*. – 1983. – Vol. 29, no. 9. – P. 659. doi: <https://doi.org/10.1049/ep.1983.0309>.

13. **Acierno D., Barba A. A., d'Amore M.** Microwaves in soil remediation from VOCs. 1: Heat and mass transfer aspects // *AIChE Journal*. – 2003. – Vol. 49, no. 7. – P. 1909-1921. doi: <https://doi.org/10.1002/aic.690490726>.

14. **І. Л. Бошкова та ін.** Експериментальне дослід-

дження сушіння цеоліту «4а» у мікрохвильовому полі // Холодильна техніка та технологія. – 2023. – Т. 59, № 3. – С. 197-204. doi: <https://doi.org/10.15673/ret.v59i3.2658>.

15. **V. P. Isachenko et al.** Heat transfer. – University Press of the Pacific, 2000. – 556 p.

16. **Басок Б.І. та ін.** Теплофізичні властивості природного ґрунту // Промислова теплотехніка. – 2008. – Т. 30, № 4. – С. 77-85.

17. **X. Chen et al.** Microwave Heating Remediation of Light and Heavy Crude Oil-Contaminated Soil // Energy & Fuels. – 2023. doi: <https://doi.org/10.1021/acs.energyfuels.3c00078>.

18. **Yang X. H., Tang J.** Advances In Bioprocessing Engineering. – World scientific, 2002. doi: <https://doi.org/10.1142/4763>.

19. **L. Gao et al.** Impact of soil salinity on soil dielectric constant and soil moisture retrieval from active microwave remote sensing // IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing. – 2022. – P. 1. doi: <https://doi.org/10.1109/tgrs.2022.3227647>.

20. **D. Zheng et al.** Impact of Soil Permittivity and Temperature Profile on L-Band Microwave Emission of Frozen Soil // IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing. – 2020. – P. 1-14. doi: <https://doi.org/10.1109/tgrs.2020.3024971>.

21. **В.Г. Сугак.** Динаміка електричних характеристик ґрунтів в залежності від фільтраційних властивостей порід та стратифікації зони аерації // Радіофізика та електроніка. – 2007. – Т. 12, № 1. – С. 185-191.

Отримана в редакції 27.08.2024, прийнята до друку 16.09.2024

Assessment of the energy efficiency of microwave remediation soil from anthropogenic chemical contamination

Iryna Boshkova^{1✉}, Natalya Volgusheva², Alexander Galkin³, Stanislav Borec⁴, Oksana Bondarenko⁵

¹⁻⁴Odesa National University of Technology, 112 Kanatnaya Str., Odessa, 65039, Ukraine;

⁵Professional college of oil and gas technologies of engineering and service infrastructure of ONTU, 46a, Levitana str., Odessa, 65088, Ukraine

✉ e-mail: ¹boshkova.irina@gmail.com

ORCID: ¹<http://orcid.org/0009-0009-5599-2709>; ²<http://orcid.org/0000-0002-9984-6502>; ³<http://orcid.org/0009-0000-1244-2736>; ⁴<http://orcid.org/0009-0001-9899-1003>; ⁵<https://orcid.org/0000-0002-0111-0768>

It is emphasized that with the development of environmental protection, soil reclamation is becoming more and more important, and in recent years, not only biological and chemical methods are used, but also thermal treatment methods are rapidly developing due to high efficiency and convenient operation. Microwave heating technology has attracted a lot of attention because it provides time saving, cost-effectiveness and high flexibility. An analysis of the literature shows that the effective power and temperatures for microwave remediation differed depending on the type of contaminated soil. Particular attention should be paid to soil moisture, because it significantly affects both the characteristics of the heating process and the processes that play the role of removing pollutants. The given results of experimental studies aimed at determining the energy efficiency of microwave soil heating. Black earth soil with a density of $\rho = 1150 \text{ kg/m}^3$ was chosen for the research. The thermal energy generated in the sample was determined as the sum of its components: the share for heating the material itself Q_{mat} and evaporation of moisture Q_{ev} , which is useful heat Q_{us} , as well as losses to the environment due to radiant Q_r and convective Q_k heat exchange and heating losses of the dielectric cell Q_{cell} . It was found that despite a significant decrease in the moisture content of the soil samples, a continuous increase in temperature was observed, which indicates fairly high values of dielectric characteristics, probably due to a large amount of organic substances. The efficiency of the microwave chamber when loading a layer of soil 0.02 m thick with a weight of 0.4 kg is 82%, the overall efficiency taking into account the efficiency of the magnetron $\eta = 0.63\%$. The value of the intensity of the electric field in the microwave chamber is determined, which is proposed to be taken into account when designing industrial installations for microwave cleaning of soil from contamination by chemical substances.

Keywords: Effectiveness coefficient; Heat and mass transfer; Moisture content; Dielectric heating; Electric field strengths.

References

1. Yang, K., Fan, M., Han, X., Wang, Y. (2021). An effective thermal treatment of toluene-contaminated soil by uniform heating from microwave coupled infrared radiation (MCIR). *Journal of Soils and Sediments*, 21(3), 1329-1336..
2. Pei, G., Zhu, Y., Cai, X., Shi, W., Li, H. (2017). Surfactant flushing remediation of o-dichlorobenzene and p-dichlorobenzene contaminated soil. *Chemosphere*, 185, 1112-1121.
3. Cao, H.-L., Cai, F.-Y., Jiao, W.-B., Wang, Y., Liu, C., Zhang, N., Lü, J. (2018). Microwave-induced decontamination of mercury polluted soils at low temperature assisted with granular activated carbon. *Chemical Engineering Journal*, 351, 1067-1075.
4. Falciglia, P. P., Scandura, P., Vagliasindi, F. G. A. (2017). Modelling of in situ microwave heating of hydrocarbon-polluted soils: Influence of soil properties and operating conditions on electric field variation and temperature profiles. *Journal of Geochemical Exploration*, 174, 91-99.
5. Chien, Y.-C. (2012). Field study of in situ remediation of petroleum hydrocarbon contaminated soil on site using microwave energy. *Journal of Hazardous Materials*, 199-200, 457-461.
6. Liu, X., Quan, X., Bo, L., Chen, S., Zhao, Y. (2004). Simultaneous pentachlorophenol decomposition and granular activated carbon regeneration assisted by microwave irradiation. *Carbon*, 42(2), 415-422.
7. Lin, L., Chen, J., Xu, Z., Yuan, S., Cao, M., Liu, H., Lu, X. (2009). Removal of ammonia nitrogen in wastewater by microwave radiation: A pilot-scale study. *Journal of Hazardous Materials*, 168(2-3), 862-867.
9. Zhou, C., Zeng, W., Wang, S., Bao, Y. (2022). Thermal Effects of Microwaves in Contaminated Soil Remediation. *Water, Air, & Soil Pollution*, 233(1).
10. Brodie, G., Torgovnikov, G. (2022). Microwave Soil Heating with Evanescent Fields from Slow-Wave Comb and Ceramic Applicators. *Energies*, 15(3).
11. Falciglia, P. P., Vagliasindi, F. G. A. (2015b). Techno-economic analysis of hydrocarbon-polluted soil treatment by using ex situ microwave heating: influence of soil texture and soil moisture on electric field penetration, operating conditions and energy costs. *Journal of Soils and Sediments*, 16(4), 1330-1344.
12. Chantrey, P. (1983). Industrial Microwave Heating. *Electronics and Power*. 29 (9), 659.
13. Acierno, D., Barba, A. A., d'Amore, M. (2003). Microwaves in soil remediation from VOCs. 1: Heat and mass transfer aspects. *AIChE Journal*, 49(7), 1909-1921.
14. Boshkova, I. L., Volgusheva, N. V., Boshkov, L. Z., Bondarenko, O. S., Hrechanytskyi, A. P. (2023). Experimental study of drying zeolite "4a" in a microwave field. *Refrigeration Engineering and Technology*, 59(3), 197-204.
15. V. P. Isachenko et al. (2000). Heat transfer. *University Press of the Pacific*, 556.
16. Basok B.I., Vorobyov L.Y., Mykhailik V.A., Lunina A.O. (2008). Thermophysical properties of natural soil. *Industrial heat engineering*, 30, 4, 77-85.
17. X. Chen et al (2023). Microwave Heating Remediation of Light and Heavy Crude Oil-Contaminated Soil. *Energy & Fuels*.
18. Yang X. H., Tang J. (2002) Advances In Bioprocessing Engineering. *World scientific*.
19. Gao, L., Song, X.-N., Leng, P., Ma, J.-W., Zhu, X.-M., Hu, R.-H., Wang, Y.-F., Zhang, Y.-N., Yin, D.-W. (2022). Impact of soil salinity on soil dielectric constant and soil moisture retrieval from active microwave remote sensing. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 1.
20. Zheng, D., Li, X., Zhao, T., Wen, J., Van Der Velde, R., Schwank, M., Wang, X., Wang, Z., Su, Z. (2020). Impact of Soil Permittivity and Temperature Profile on L-Band Microwave Emission of Frozen Soil. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 1-14.
21. Suhak, V.G. (2007). Dynamics of electrical characteristics of soils depending on the filtration properties of rocks and stratification of the aeration zone. *Radio physics and electronics*. 12(1), 185-191.

Received 27 August 2024

Approved 16 September 2024

Available in Internet 30 September 2024