

ТЕРМОДИНАМІЧНИЙ АНАЛІЗ ТА МОДЕЛЮВАННЯ

УДК 536.24(075.8)

Оцінка граничного часу мікрохвильового нагріву рослинного матеріалу в процесах комбінованої екстракції

І. Л. Бошкова^{1✉}, Н. В. Волгушева², В. О. Волчок³, К. О. Фатєєва⁴, С. Г. Комендант⁵

¹⁻⁵Одеський національний технологічний університет, вул. Канатна, 112, Одеса, 65039, Україна

✉ 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/0009-0002-9445-788X>; ⁴<http://orcid.org/0009-0001-9899-1003>; ⁵<https://orcid.org/0009-0006-7554-9577>

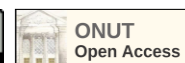
На підставі аналізу сучасних досліджень методів екстрагування речовин з рослинної сировини визначено, що мікрохвильове нагрівання в поєднанні з розчинниками здатне прискорити процес екстракції цільових хімічних речовин з різних рослинних матеріалів. Визначена доцільність вивчення процесу комбінованого мікрохвильового екстрагування, при якому на першому етапі проводиться нагрівання в мікрохвильовому полі в режимах, за якими руйнуються клітинні стінки рослинної тканини. Наголошується, що оптимальні робочі параметри комбінованого мікрохвильового екстрагування мають бути визначені при різних масштабах екстракції та для конкретних мікрохвильових систем. Представлений аналіз ультраструктури рослинної клітини. Наголошується, що при мікрохвильовій обробці температура у клітині зростає, її внутрішній об'єм збільшується та починає тиснути на клітинні стінки, що у кінцевому підсумку призводить до їх розриву. Складено методичку розрахунку граничного часу обробки рослинного матеріалу в мікрохвильовому полі, при перевищенні якого відбуватиметься руйнування клітинних стінок. Виконані розрахунки граничного часу, які ґрунтуються на експериментальних даних по дослідженню нагрівання шару зерна гречки масою 1,2 кг при вихідній потужності магнетрону 1 кВт. Розраховані напруженості електричного поля E в мікрохвильовій камері на підставі даних експерименту та за діелектричними властивостями в залежності від вологості. Розраховані та наведені граничні криві часу обробки зерна гречки у мікрохвильовій камері. Проведено аналіз отриманих результатів та визначений вплив вологості та початкової температури шару зерна на значення граничного часу. Зазначається, що для повного розуміння базових механізмів та оптимізації процесів мікрохвильової обробки потрібні додаткові дослідження впливу мікрохвильового нагрівання на структуру рослинної тканини та визначення раціональних режимів обробки.

Ключові слова: Мікрохвильовий нагрів; Щільний шар; Експеримент; Вологість; Температура; Напруженість електричного поля

doi: <https://doi.org/10.15673/ret.v61i4.3345>

© The Author(s) 2025. 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

Екстракція розчинником часто використовується для вибіркового видалення фітохімічних речовин з рослин, але цей процес вимагає тривалого часу і великих кількостей (часто небезпечних) органічних розчинників, наприклад, метанол, етанол,

ацетон і етилацетат. Мікрохвильове нагрівання може використовуватися в поєднанні з розчинниками для прискорення процесу екстракції цільових хімічних речовин з різних матриць в так званому процесі комбінованої мікрохвильової екстракції (КМЕ). Використання мікрохвильової енергії для екстракції органічних сполук почалося наприкінці

1980-х років. За минулі роки КМЕ показала значні переваги порівняно з традиційною екстракцією, такі як скорочення часу процесу, зниження витрати розчинника та підвищення виходу цільового компоненту. Крім того, поглинена мікрохвильова енергія може нагрівати розчинник, тим самим збільшуючи розчинність цільових хімічних речовин розчинника [1]. В останні роки мікрохвильова екстракція набула широкого цільового застосування для різних рослинних матеріалів [2]. Комбінована мікрохвильова екстракція є гарною альтернативою для екстракції біологічно активних сполук, оскільки забезпечує високий ступінь вилучення цільових компонентів у порівнянні з традиційною екстракцією розчинниками, значно скорочуючи час процесу.

2. Аналітичний огляд результатів досліджень комбінованої мікрохвильової екстракції

При застосуванні методу екстрагування, в якому мікрохвильове нагрівання поєднується з іншими техніками (наприклад, ультразвуковою, ферментативною, рідинною, надкритичною флюїдною екстракцією та ін), або комбінована мікрохвильова екстракція (КМЕ), можливе отримання ряду позитивних ефектів, таких як підвищення виходу цільових речовин, зниження часу обробки та енергоспоживання КМЕ в порівнянні з традиційними ме-

тодами екстракції [3, 4]. Висока ефективність КМЕ в основному пояснюється швидким нагріванням, характерним для мікрохвильової енергії, як показано на рис. 1 [1]. Під час мікрохвильового опромінення енергія може швидко поглинатися водою у клітинах та паренхімі. Швидке випаровування води всередині біоматеріалу створює високий тиск, що призводить до розриву клітин, збільшення площі контакту між твердою та рідкою фазами і, отже, кращого доступу розчинника до цільових компонентів [5].

Найбільш поширеною проблемою традиційних методів є тривалість процесу, він займає 8, 16, 24 години і більше. Процес мікрохвильової екстракції усуває ці недоліки традиційних методів, так як споживає невеликий об'єм розчинника у співвідношенні 1:12 (г/мл) як тверду речовину/рідину [6]. Фактори часу та потужності тісно переплетені один з одним, оскільки зі збільшенням потужності процес займає менше часу, і навпаки. Цей процес також є антитермолабільним. Він зберігає властивості сполуки, які втрачаються при тривалому нагріванні у традиційному методі [6]. Завдяки своїм унікальним властивостям КМЕ, порівняно з традиційною екстракцією розчинником, широко застосовується в лабораторних умовах. Проте масштабування технології є складним завданням, а робочі умови важко оцінити через різні конфігурації, що часто використовуються.

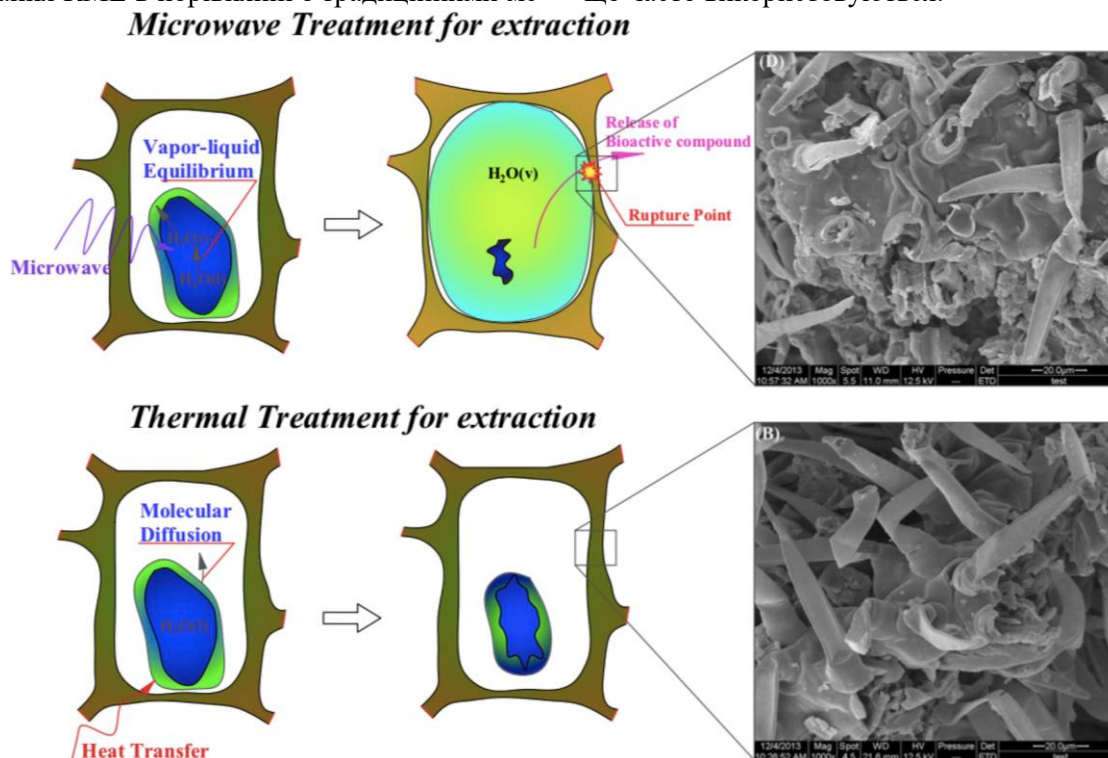


Рисунок 1 – Порівняння методів КМЕ та традиційної екстракції розчинником. Процес руйнування клітин під впливом мікрохвильового випромінювання [1, 7] та традиційної екстракції [8]

Мікрохвильова енергія – це неіонізуюче випромінювання, яке викликає рух молекул за рахунок міграції іонів та обертання диполів, не змінюючи молекулярної структури, що призводить до швидкого нагрівання діелектричних матеріалів. При мікрохвильовому нагріванні домінує механізм втрат на поляризацію. Проте зі збільшенням питомого електричного опору твердих матеріалів механізм втрат на провідність стає дедалі важливішим чинником згасання мікрохвиль, навіть у частоті 2,45 ГГц. Отже, між «гарячим» адсорбентом і

його «холодним» середовищем можуть бути досягнуті високі температурні градієнти. Результати моделювання [9] показали, що за певних умов різниці температур може перевищувати кілька сотень градусів. Іншою важливою характеристикою мікрохвильового нагріву є те, що весь об'єм може нагріватися зсередини, при цьому компоненти з високими діелектричними втратами можуть нагріватися вибірково [10]. Принцип мікрохвильового нагріву, пов'язаний з діелектричними втратами та релаксацийними процесами, відображено на рис. 2.

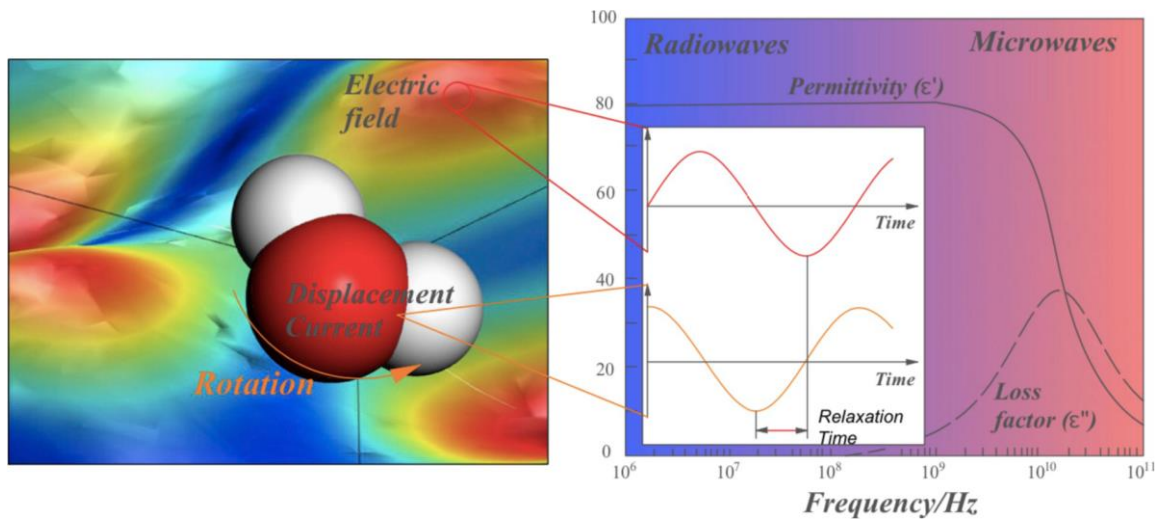


Рисунок 2 – Принцип мікрохвильового нагріву [1], пов'язаний з діелектричними втратами та явищем релаксації [11]

Незважаючи на те, що мікрохвильова обробка продемонструвала великий потенціал для інтенсифікації процесів екстрагування, масштабування процесу пов'язане з низкою труднощів, які потребують подальших досліджень у глобальному масштабі. Крім того, мікроскопічний вплив мікрохвиль на молекулярні системи в даний час вивчено недостатньо, і потрібні глибші дослідження.

КМЕ – метод екстракції, що широко використовується для вилучення активних сполук з рослин [4]. Його робочі параметри, такі як співвідношення розчинника та вихідної сировини (S/F), потужність мікрохвильового випромінювання та час екстракції часто оптимізуються за допомогою методу статистичної оптимізації. Однак оптимальні умови екстракції, описані в літературі, обмежені, оскільки вони можуть бути застосовані лише до конкретних мікрохвильових систем. Різні мікрохвильові системи при використанні в однакових робочих умовах дають різну ефективність нагріву та продуктивність екстракції. Оптимальні робочі параметри КМЕ при різних масштабах екстракції

були визначені відповідно до запропонованого методу і оцінено їх ефективність екстракції [4]. Вплив співвідношення S/F на вихід КМЕ для питомій потужності мікрохвильового поля 0,43 Вт/мл через 10 хв екстракції представлено на рис. 3.

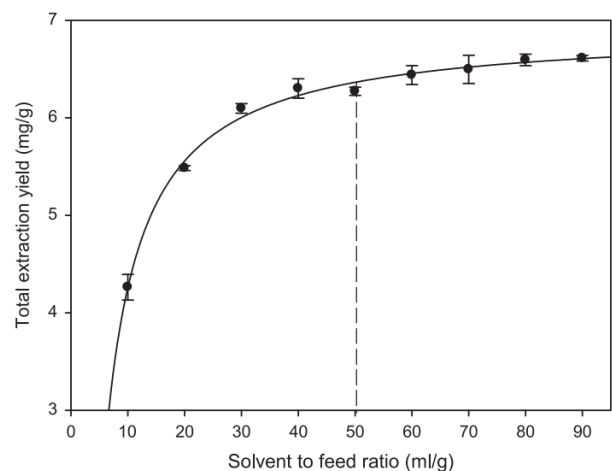


Рисунок 3 – Однофакторна оптимізація співвідношення розчинника та вихідної сировини при постійному обсязі. Умови КМЕ: 50 мл, 100 Вт, 10 хв та 0,43 Вт/мл [4]

Результат показує, що збільшення співвідношення S/F за постійного об'єму покращує виходи екстракції КМЕ. При збільшенні співвідношення вище оптимального значення, тобто 50 мл/г, приріст виходу екстракції стає незначним [12]. З іншого боку, якщо співвідношення S/F оцінюється при постійній масі зразка, зміна об'єму розчинника через різне співвідношення може вплинути на поглинання мікрохвильової енергії. Це може призвести до низького виходу екстракції через недостатню потужність нагрівання [13]. Враховуючи як витрату розчинника, так і ефективність екстракції КМЕ, виходячи з тенденції екстракції (рис. 3), для подальшої оптимізації рекомендовано співвідношення S/F при постійному об'ємі 50 мл/г.

У рослинних матеріалах, що нагріваються в мікрохвильовій камері, спостерігається п'ять різних явищ, а саме: утворення мікропор, усадка, руйнування клітинної структури та горіння (у разі нагрівання матеріалів з низькою вологістю), рис. 4 [14]. Рівень МХ потужності, тривалість обробки та поточний вміст води, а також види рослинних матеріалів визначають, які типи явищ мають місце під час мікрохвильового нагріву. Коли рослинні матеріали піддаються впливу мікрохвиль, відбувається локальний перегрів, оскільки нагріті області сприйнятливі до поглинання додаткової енергії. Горіння та руйнування також відбуваються в області гарячих точок. Аналогічним чином, через вищу температуру всередині зразка в кінцевому підсумку відбувається швидкий фазовий перехід і має місце спучування.

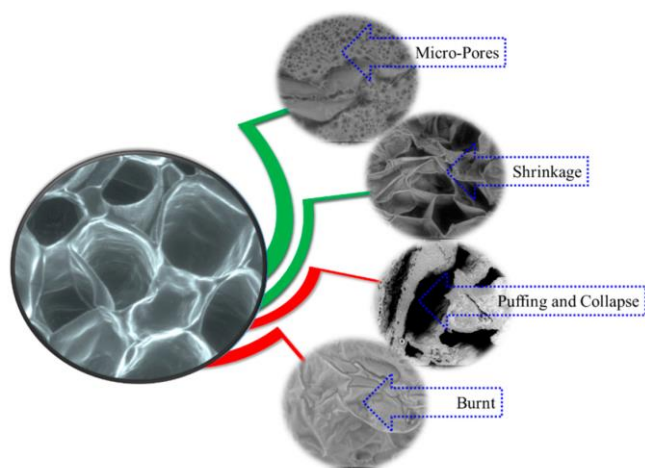


Рисунок 4 – Морфологічні зміни, що відбуваються при мікрохвильовому нагріванні [14].

У процесі мікрохвильового нагріву відбуваються складні мікроструктурні зміни внаслідок су-

путнього тепло- та масопереносу, які суттєво впливають на кінетику та якість сушіння. Результати дослідження показують, що наномікропори характерні виключно для переривчастого мікрохвильово-конвективного нагрівання, оскільки безперервне мікрохвильове нагрівання призводить до обгорання або руйнування клітинної стінки, в той час як конвективне сушіння не призводить до утворення нано-пор NM. Дані демонструють пряму кореляцію між потужністю мікрохвиль та зростанням пор. Кількість і розмір пор збільшуються зі збільшенням потужності мікрохвиль, що обумовлено особливим розподілом температури та характером випаровування води.

Для виявлення ефектів впливу МХ поля на рослинну тканину насамперед слід провести аналіз структури узагальненої рослинної клітини. При всьому відносному різноманітті зовнішніх форм існування рослинної сировини (трава, листя, гілки, коріння тощо), рослинна клітина залишається не порушеною основою, основною «цеглиною» структури. Розглядаючи типову структуру рослинної клітини [15], було визначено таке. Основний вміст клітини укладено в межах замкнутої клітинної стінки, яка має форму багатогранника і стикається з сусідніми клітинами по всій поверхні за допомогою мікроканалів-плазмодесм. До стінки клітини зсередини притиснута плазматична мембрана (плазмалема), що обмежує внутрішній об'єм (цитоплазму). В даний час загально визнаною моделлю біологічної мембрани є рідинно-мозаїчна модель Ніколсона та С. Сінгера [16].

Природну структуру рослинної клітини можна розглядати як замкнутий об'єм, а комбінація таких клітин утворює складнішу систему, в якій клітини контактують з міжклітинним простором, що утворює систему капілярних каналів. Клітинні стінки є радіопрозорими. Основний вміст клітин становить вода та розчини речовин на її основі. Високі властивості міцності стінки визначаються впорядкованістю молекулярних ланцюжків полімерів целюлози. Можна уявити клітину як замкнутий об'єм, а система (ансамбль) клітин є структурою, яка поєднує безліч замкнутих об'ємів. Стінки рослинної клітини є досить міцним і жорстким каркасом, пори в якому заповнені рідиною. Клітинна мембрана еластична, через неї здійснюється надходження поживних речовин та рідини в клітину та виведення продуктів життєдіяльності шляхом дифузії та осмосу. При мікрохвильовій обробці температура у клітині зростає, цитоплазма розширюється і по-

чинає тиснути на клітинні стінки. Далі тиск у клітині наростає й у кінцевому підсумку призводить до розриву мікрофібрил клітинних стінок.

3. Розрахунок граничного часу обробки рослинного матеріалу у мікрохвильовому полі

Складено методику розрахунку граничного часу обробки рослинного матеріалу $\tau_{\text{гр}}$ в мікрохвильовому полі, тобто часу, при перевищенні якого відбуватиметься порушення цілісності клітинних стінок [17]. Маючи в своєму розпорядженні ці дані, можна визначити рекомендовану тривалість мікрохвильової обробки в технологіях екстрагування біологічно активних речовин: $\tau_{\text{обр}} = 1,13 \tau_{\text{гр}}$. Множник 1,13 було визначено з міркувань енергетичної ефективності на підставі аналізу експериментальних даних дослідження теплового впливу мікрохвильового поля на рослинну тканину.

У загальному вигляді розрахунок пропонується проводити за таким алгоритмом.

1. Для рослинної клітини визначити граничний об'єм $V_{\text{гр}}$ тобто той об'єм, що може бути досягнутий при термічному розширенні протоплазми без руйнування клітинних стінок.

2. Зміна температури у процесі збільшення об'єму клітини від V_0 до $V_{\text{гр}}$ визначається із співвідношення: $\Delta t = (V_{\text{гр}} - V_0) / \beta V_0$, де β – коефіцієнт температурного розширення води з урахуванням вмісту вологовмісту розрахункової одиниці. Звідси можна визначити граничну температуру нагрівання, за якою під дією мікрохвильового поля руйнуються клітинні стінки.

3. Визначається кількість поглиненої теплоти, витрачену на нагрівання всього об'єму рослинної тканини масою m до розрахункової температури:

$$Q = m \cdot c_p \cdot \Delta t + \Delta m \cdot r, \text{ Дж} \quad (1)$$

4. Час, протягом якого це тепло було отримано:

$$\tau = Q / (q \cdot V), \text{ с} \quad (2)$$

де V – об'єм матеріалу, q – питома теплота перетворення мікрохвильової енергії у внутрішню енергію матеріалу:

$$q = 0.556 \cdot 10^{-10} \cdot f \cdot \varepsilon'' \cdot E^2, \text{ Вт/м}^3 \quad (3)$$

де $f = 2450 \text{ МГц}$ – частота мікрохвильового елек-

ромагнітного поля, ε'' – коефіцієнт діелектричних втрат, E – напруженість електричного поля, В/м.

При перевищенні цього часу клітинні стінки (оболонки) не можуть збільшувати свій об'єм. Усередині об'єкта при подальшому підведенні енергії МХ поля починає різко зростати тиск, викликаючи розрив клітинних стінок. Іншими словами, мікрохвильова енергія перетворюється на внутрішню енергію тіла, що реалізується у збільшенні температури тіла та зміні тиску, призводячи до розриву мікрофібрил клітинних стінок.

Для визначення залежності напруженості електричного поля E від виду рослинної тканини, його маси та діелектричних характеристик, можна застосовувати формулу (4) і дані експериментів, в ході яких контролювалася зміна температури t матеріалу масою m і теплоємністю c , зміна маси тіла за рахунок випаровування Δm (якщо цей процес мав місце). З використанням рівняння теплового балансу (без урахування втрат у навколишнє середовище) значення напруженості електричного поля виражається такою залежністю:

$$E = \sqrt{\frac{Q_{\text{кор}}}{5,56 \cdot 10^{-11} f \cdot \varepsilon' \cdot \text{tg} \delta}} = \sqrt{\frac{m \cdot c_p \cdot \Delta t + \Delta m \cdot r}{5,56 \cdot 10^{-11} f \cdot \varepsilon' \cdot \text{tg} \delta \cdot V \cdot \tau}}, \text{ Вт/м} \quad (4)$$

де питомий тепловий потік $Q_{\text{кор}}$, що витрачається на нагрівання досліджуваного зразка об'ємом V і випаровування вологи за час τ , визначається залежністю:

$$Q_{\text{кор}} = (m \cdot c_p \cdot \Delta t + \Delta m \cdot r) / (V \cdot \tau), \text{ Вт/м}^3 \quad (5)$$

Залежність (5) можна уточнити, врахувавши втрати в довкілля, які визначаються променистою $Q_{\text{пром}}$ та конвективною $Q_{\text{конв}}$ складовою. Крім того, точність розрахунку залежить також від точності визначення величин діелектричних постійних і від рівномірності розподілу електромагнітного поля в матеріалі.

Розрахунок напруженості електричного поля проведено для зерна гречки масою 1,2 кг при товщині шару $\delta = 0,03 \text{ м}$ та площі поверхні $F_{\text{пов}} = 47 \cdot 10^{-3} \text{ м}^2$. Для зерна гречки фактор діелектричних втрат на частоті $f = 2450 \text{ МГц}$ при вологості 17 % дорівнює $\varepsilon'' = 2,35$, при вологості 9% – $\varepsilon'' = 1,18$ [18]. Вихідна потужність магнетрону в усіх експе-

риментах становила $P = 1$ кВт.

Об'єм рослинної клітини зародка зерна за даними [15] орієнтовно становив $V_0 = 3,35 \cdot 10^{-14}$ м³. Максимально допустимий об'єм клітини, оцінку якого проведено за даними [15], становить $V_{\text{гр}} = 3,366 \cdot 10^{-14}$ м³. Для цих умов отримано, що гранична температура становитиме $t_{\text{гр}} = 46,2$ °С.

Теплоємність вологого рослинного матеріалу визначається за залежністю від вологості:

$$c = 0,01[c_0(100 - w) + c_w \cdot w] \quad (6)$$

де w – вологість матеріалу, c_0 – теплоємність сухо-

го матеріалу.

При розрахунку напруженості електричного поля E враховувався вплив вологості w на фактор діелектричних втрат ϵ'' . Для визначення корисного теплового потоку використовувалися результати експериментів, проведених на гречаному зерні. Корисна теплота $Q_{\text{кор}}$ – кількість теплоти, отримана матеріалом при обробці в мікрохвильовому полі, визначається за результатами експерименту, Дж; Q – кількість теплоти, яка потрібна для нагрівання до граничної температури, Дж.

Нижче наведено результати розрахунків, отримані при різних значеннях вологості для початкової температури зерна 20 °С.

Таблиця 1 – Результати розрахунку граничного часу обробки зерна гречки у мікрохвильовому полі. Маса матеріалу $m = 1,2$ кг, час мікрохвильової обробки $\tau = 180$ с

w	c_p , Дж/(кг·К)	Δt , кг	$Q_{\text{пол}}$, Дж	ϵ''	E , В/м	Q , Дж	$\tau_{\text{гр}}$, с
0,09	1788	$1 \cdot 10^{-3}$	88081	1,18	1469	58257	119
0,13	1893	$2,1 \cdot 10^{-3}$	91233	1,77	1221	56258	111
0,17	1999	$5 \cdot 10^{-3}$	109636	2,35	1162	64866	106
0,2	2078	$6,2 \cdot 10^{-3}$	112632	2,93	1054	65019	104

Приклад розрахунку наведено нижче для вологості матеріалу $w = 0,09$, дані щодо кількості вологи, що випарувалася, і кінцевій температурі шару визначалися в експерименті.

1. Кількість теплоти, отримана матеріалом при обробці в мікрохвильовому полі:

$$Q_{\text{кор}} = 1,2 \cdot 1788 \cdot 40,0 + 1 \cdot 10^{-3} \cdot 2256800 = 101169 \text{ Дж.}$$

2. Напруженість електричного поля:

$$E = \sqrt{\frac{88081}{5,56 \cdot 10^{-11} 2450 \cdot 10^6 \cdot 1,18 \cdot 1,41 \cdot 10^{-3} \cdot 180}} = 1469 \text{ В/м.}$$

3. Кількість теплоти, необхідне для нагрівання матеріалу до граничної температури:

$$Q = 1,2 \cdot 1788 \cdot 26,1 + 1 \cdot 10^{-3} \cdot 2256800 = 58257 \text{ Дж.}$$

4. Граничний час обробки:

$$\tau = \frac{58257}{5,56 \cdot 10^{-11} 2450 \cdot 10^6 \cdot 1,18 \cdot 1469^2 \cdot 1,41 \cdot 10^{-3}} = 119 \text{ с}$$

За наведеним алгоритмом було розраховано також граничний час для початкової температури

10 і 15 с. Результати розрахунків наведено на рис. 5. При розрахунку передбачалося, що початкова температура зерна та температура довкілля однакові.

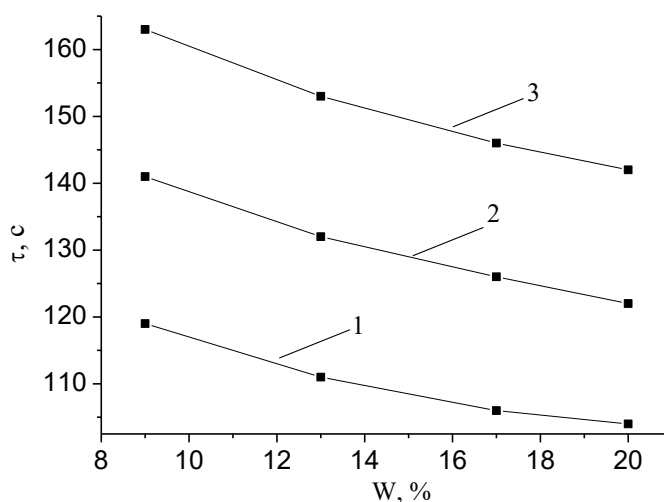


Рисунок 5 – Граничні криві часу обробки зерна гречки у мікрохвильовій камері залежно від вологості. Вихідна потужність магнетрону – 1 кВт: 1 – початкова температура 20 °С; 2 – початкова температура 15 °С; 3 – початкова температура 10 °С.

Можна відзначити, що зі зниженням початкової температури матеріалу за однакової вологості значення граничного часу збільшуються, що

пов'язано з необхідністю більшого підведення енергії до досягнення граничної температури. Зі збільшенням вологості тривалість мікрохвильової обробки трохи знижується, що пояснюється зростанням фактора діелектричних втрат – у досліджуваному діапазоні ε'' збільшилася у 2,5 разів, тоді як квадрат напруженості електричного поля зменшився у 1,9 разів.

Необхідно глибше розібратися про вплив вмісту води рослинної тканини на ефекти мікрохвильового нагріву як специфічного нагріву, що дасть можливість надалі доповнити методіку розрахунку граничного часу. Вплив води та високої температури на клітинні стінки рослинних тканин вивчався під мікроскопом на прикладі плодів яблука, коренеплодів моркви та картоплі [19]. Плоди обробляли парою протягом періоду до однієї години. У жодному разі клітинні стінки не руйнувалися, структура тканини змінювалася лише за рахунок поділу цілих клітин. Однак руйнування клітинної стінки – відомий ефект мікрохвильового нагріву, що призводить до пошкодження або утворення нано-мікропор за високої потужності. Наголошується, що початковий вміст води суттєво впливає на ступінь цієї структурної зміни, причому більш високий вміст води потенційно призводить до більш швидкого нагрівання та вищої ймовірності розриву клітини, що підтверджується характером кривих на рис. 5. При цьому не існує єдиного максимального вмісту води, що викликає руйнування клітинної стінки при мікрохвильовому нагріванні, оскільки результат визначається складною взаємодією факторів, включаючи вологість, потужність мікрохвиль, тривалість дії та тип тканини. В даний час є ефективний метод визначення мікрофібрилярного кута сухих та витриманих целюлозних волокон [20], який може бути застосований для аналізу змін у структурі тканини при дії мікрохвильового поля. У дослідженнях [21] було вивчено вплив мікрохвильового нагріву на макроскопічні та мікроскопічні тріщини, пошкодження клітинних стінок трахеїд та хімічну структуру деревини китайської ялиці. Результати показали, що початковий вміст води та щільність енергії мікрохвиль значно впливають на характеристики тріщин та структуру клітинної стінки, а також незначно впливають на хімічний склад та кристалічну структуру целюлози клітинної стінки ялиці китайської. Зазначається, що на виникнення тріщин у деревині впливає початкова вологість зразка, причому зразки з нижчою воло-

гістю демонструють підвищену ймовірність утворення тріщин. Це явище можна пояснити високою швидкістю нагріву всередині деревини, що прискорює процес випаровування, внаслідок чого виникає значний перепад тиску між внутрішнім та зовнішнім середовищем деревини. Така різниця сприяє легкому утворенню тріщин у структурі деревини. Навпаки, швидкість нагрівання деревини з вищою вологістю була повільною, оскільки мікрохвильова енергія поглинається надлишком води; при цьому вона демонструє рівномірнішу внутрішню температуру нагрівання. Порівняння напруги та градієнту вологості по товщині дошки представлено в [22]. При порівнянні зразків з однаковою вологістю визначено, що підвищене поглинання енергії корелює зі зменшенням часу, необхідного для випаровування води, що призводить до більш високого тиску пари та більшої руйнівної сили. Для повного розуміння базових механізмів та оптимізації процесів мікрохвильової обробки з метою підвищення якості цільового компонента, одержуваного в результаті екстракції, потрібні подальші дослідження.

4. Висновки

У процесі мікрохвильового нагріву відбуваються складні мікроструктурні зміни внаслідок супутнього тепло- та масопереносу, які суттєво впливають на цілісність клітинних целюлозних стінок рослинної тканини. Комбінована екстракція із застосуванням на початковій стадії мікрохвильового нагріву здатна призвести до інтенсифікації виходу цільових компонентів у розчинник на наступній стадії екстрагування біологічно активних речовин із рослинного матеріалу.

Основною проблемою ефективного використання методу комбінованої мікрохвильової екстракції є визначення граничного часу мікрохвильової обробки, при якому відбувається руйнування клітинних стінок у рослинній тканині.

Методика розрахунку, що ґрунтується на рівнянні теплового балансу, дозволяє оцінити граничний час залежно від вологості матеріалу та початкової температури з урахуванням ультраструктури рослинної клітини. Розрахунки проведені для граничної температури 46,2 °C як оцінки. Значення граничної температури доцільно визначати на основі додаткових експериментів для матеріалів, призначених для проведення екстракції.

Отримано, що зі зниженням початкової тем-

ператури матеріалу (щільний шар зерна гречки) за однакової вологості значення граничного часу збільшуються, що пов'язано з необхідністю більшого підведення енергії до досягнення граничної температури. Зі збільшенням вологості граничний час мікрохвильової обробки трохи знижується, що пояснюється зростанням фактора діелектричних втрат – у досліджуваному діапазоні ϵ'' збільшилася у 2,5 разів, тоді як квадрат напруженості електричного поля зменшився у 1,9 разів.

Особистий внесок авторів CRediT

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

Література

1. **H. Li et al.** Fundamentals and applications of microwave heating to chemicals separation processes // *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. – 2019. – Vol. 114. – P. 109316. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2019.109316>.
2. **Y. Nikhita et al.** Microwave assisted extraction of bioactive compounds: A brief review // *Journal of Indian Chemical Society*. – 2020. – Vol. 97, No. 10a. – P. 1751-1756. <https://doi.org/10.5281/zenodo.5957288>.
3. **Jiménez-Amezcu et al.** Simultaneous microwave-assisted extraction of bioactive compounds from aged garlic // *Journal of Chromatography A*. – 2023. – P. 464128. <https://doi.org/10.1016/j.chroma.2023.464128>.
4. **Chan C.-H., Yusoff R., Ngoh G.-C.** Optimization of microwave-assisted extraction based on absorbed microwave power and energy // *Chemical Engineering Science*. – 2014. – Vol. 111. – P. 41-47. <https://doi.org/10.1016/j.ces.2014.02.011>.
5. **W. Zhang et al.** Simultaneous extraction and purification of alkaloids from *Sophora flavescens* Ait. by microwave-assisted aqueous two-phase extraction with ethanol/ammonia sulfate system // *Separation and Purification Technology*. – 2015. – Vol. 141. – P. 113-123. <https://doi.org/10.1016/j.seppur.2014.11.014>.
6. **Wang L., Qin P., Hu Y.** Study on the microwave-assisted extraction of polyphenols from tea // *Frontiers of Chemical Engineering in China*. – 2010. – Vol. 4, no. 3. – P. 307-313. <https://doi.org/10.1007/s11705-009-0282-6>.
7. **C.-H. Chan et al.** A first-principles model for plant cell rupture in microwave-assisted extraction of bioactive compounds // *Journal of Food Engineering*. – 2016. – Vol. 188. – P. 98-107. <https://doi.org/10.1016/j.jfoodeng.2016.05.017>.
8. **X.-L. Qi et al.** Solvent-free microwave extraction of essential oil from pigeon pea leaves and evaluation of its antimicrobial activity // *Industrial Crops and Products*. – 2014. – Vol. 58. – P. 322-328. <https://doi.org/10.1016/j.indcrop.2014.04.038/>
9. **W. Wang et al.** Numerical simulation of hot-spot effects in microwave heating due to the existence of strong microwave-absorbing media // *RSC Advances*. – 2016. – Vol. 6, no. 58. – P. 52974-52981. <https://doi.org/10.1039/c6ra05191j/>
10. **C. Gabriel et al.** Dielectric parameters relevant to microwave dielectric heating // *Chemical Society Reviews*. – 1998. – Vol. 27, no. 3. – P. 213. <https://doi.org/10.1039/a827213z>
11. **Ulaby F. T., Jedlicka R. P.** Microwave Dielectric Properties of Plant Materials // *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*. – 1984. – GE-22, no. 4. – P. 406-415. <https://doi.org/10.1109/tgrs.1984.350644>.
12. **Spigno G., De Faveri D. M.** Microwave-assisted extraction of tea phenols: A phenomenological study // *Journal of Food Engineering*. – 2009. – Vol. 93, no. 2. – P. 210-217. <https://doi.org/10.1016/j.jfoodeng.2009.01.006>
13. **Mandal V., Mandal S. C.** Design and performance evaluation of a microwave based low carbon yielding extraction technique for naturally occurring bioactive triterpenoid: Oleanolic acid // *Biochemical Engineering Journal*. – 2010. – Vol. 50, no. 1-2. – P. 63-70. <https://doi.org/10.1016/j.bej.2010.03.005>.
14. **Joardder M. U. H., Karim A.** Pore Evolution in Cell Walls of Food Tissue during Microwave-Assisted Drying: An In-Depth Investigation // *Foods*. – 2023. – Vol. 12, no. 13. – P. 2497. <https://doi.org/10.3390/foods12132497>.
15. **T. Noguchi et al.** *Atlas of Plant Cell Structure*. – Tokyo: Springer Japan, 2014. – 202 p.
16. **Suzuki K. G. N., Kusumi A.** Refinement of Singer-Nicolson fluid-mosaic model by microscopy imaging: Lipid rafts and actin-induced membrane compartmentalization // *Biochimica et Biophysica Acta (BBA) - Biomembranes*. – 2023. – Vol. 1865, no. 2. –

- P. 184093. <https://doi.org/10.1016/j.bbame.2022.184093>.
17. **N. Volgusheva et al.** Study into effects of a microwave field on the plant tissue // Eastern-European Journal of Enterprise Technologies. – 2017. – Vol. 6, no. 8 (90). – P. 47-54. <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2017.115118>.
 18. **Xinhua Zhu et al.** Sensing Moisture Content of Buckwheat Seed from Dielectric Properties // Transactions of the ASABE. – 2013. – P. 1855-1862. <https://doi.org/10.13031/trans.56.10220>.
 19. **Sterling C.** Effect of moisture and high temperature on cell walls in plant tissues. Journal of Food Science. – 1955. – Vol. 20, no. 5. – P. 474-479. <https://doi.org/10.1111/j.1365-2621.1955.tb16857.x>.
 20. **Rekha B., Nagaraja Ganesh B.** X-ray Diffraction: An Efficient Method to Determine Microfibrillar Angle of Dry and Matured Cellulosic Fibers // Journal of Natural Fibers. – 2020. – P. 1-8. <https://doi.org/10.1080/15440478.2020.1848720/>.
 21. **X. Liao et al.** Effect of High-Intensity Microwave Treatment on Structural and Chemical Characteristics of Chinese Fir // Forests. – 2024. – Vol. 15, no. 3. – P. 516. <https://doi.org/10.3390/f15030516/>.
 22. **He Q., Wang X.** Drying Stress Relaxation of Wood Subjected to Microwave Radiation // BioResources. – 2015. – Vol. 10, no. 3. – P. 4441-4452. <https://doi.org/10.15376/biores.10.3.4441-4452>.

Отримана в редакції 21.10.2025, прийнята до друку 28.11.2025

Estimation of the limit time of microwave heating of plant material in combined extraction processes

Iryna Boshkova¹✉, Natalya Volgusheva², Victor Volchok³, Kristina Fateeva⁴, Serhii Komendant⁵

¹⁻⁵Odesa National University of Technology, 112 Kanatnaya Str., Odessa, 65039, 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/0009-0002-9445-788X>; ⁴<http://orcid.org/0009-0001-9899-1003>; ⁵<https://orcid.org/0009-0006-7554-9577>

Based on the analysis of modern research on methods for extracting substances from plant raw materials, it was determined that microwave heating in combination with solvents can accelerate the process of extracting target chemicals from various plant materials. The feasibility of studying the process of combined microwave extraction was determined, in which the first stage is heating in a microwave field in modes that destroy the cell walls of plant tissue. It is emphasized that the optimal operating parameters of combined microwave extraction should be determined at different scales of extraction and for specific microwave systems. An analysis of the ultrastructure of a plant cell is presented. It is emphasized that during microwave treatment, the temperature in the plant cell increases, its internal volume increases and begins to put pressure on the cell walls, which ultimately leads to their rupture. A method for calculating the maximum time for processing plant material in a microwave field, exceeding which will cause the destruction of the cell walls, has been developed. Calculations of the limiting time were made, which are based on experimental data on the study of heating a layer of buckwheat grain weighing 1.2 kg at a magnetron output power of 1 kW. The electric field strengths E in the microwave chamber were calculated based on the experimental data and dielectric properties depending on humidity. The limiting curves of the processing time of buckwheat grain in the microwave chamber were calculated and presented. The results were analyzed and the influence of humidity and the initial temperature of the grain layer on the limiting time value was determined. It is noted that for a full understanding of the basic mechanisms and optimization of microwave processing processes, additional studies of the influence of microwave heating on the structure of plant tissue and the determination of rational processing modes are required.

Keywords: Microwave heating; Dense layer; Experiment; Humidity; Temperature; Electric field strength

References

1. **Li, H., Zhao, Z., Xiouras, C., Stefanidis, G. D., Li, X., & Gao, X.** (2019). Fundamentals and applications of microwave heating to chemicals separation processes. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 114, 109316.
2. **Nikhita, Y., Shubham, S., Jaison, S. J., & Sushil,**

- K. (2020). Microwave assisted extraction of bioactive compounds: A brief review. *Journal of Indian Chemical Society*, 97, 10a, 1751-1756.
3. Jiménez-Amezcu, González-Prada, A., Díez-Municio, M., Soria, A. C., Ruiz-Matute, A. I., & Sanz, M. L. (2023). Simultaneous microwave-assisted extraction of bioactive compounds from aged garlic. *Journal of Chromatography A*, 464128.
4. Chan, C.-H., Yusoff, R., & Ngoh, G.-C. (2014). Optimization of microwave-assisted extraction based on absorbed microwave power and energy. *Chemical Engineering Science*, 111, 41–47.
5. Zhang, W., Zhu, D., Fan, H., Liu, X., Wan, Q., Wu, X., Liu, P., & Tang, J. Z. (2015). Simultaneous extraction and purification of alkaloids from *Sophora flavescens* Ait. by microwave-assisted aqueous two-phase extraction with ethanol/ammonia sulfate system. *Separation and Purification Technology*, 141, 113-123.
6. Wang, L., Qin, P., & Hu, Y. (2010). Study on the microwave-assisted extraction of polyphenols from tea. *Frontiers of Chemical Engineering in China*, 4(3), 307–313.
7. Chan, C.-H., Yeoh, H. K., Yusoff, R., & Ngoh, G. C. (2016). A first-principles model for plant cell rupture in microwave-assisted extraction of bioactive compounds. *Journal of Food Engineering*, 188, 98-107.
8. Qi, X.-L., Li, T.-T., Wei, Z.-F., Guo, N., Luo, M., Wang, W., Zu, Y.-G., Fu, Y.-J., & Peng, X. (2014). Solvent-free microwave extraction of essential oil from pigeon pea leaves and evaluation of its antimicrobial activity. *Industrial Crops and Products*, 58, 322-328.
9. Wang, W., Wang, B., Sun, J., Mao, Y., Zhao, X., & Song, Z. (2016). Numerical simulation of hot-spot effects in microwave heating due to the existence of strong microwave-absorbing media. *RSC Advances*, 6(58), 52974-52981.
10. Gabriel, C., Gabriel, S., H. Grant, E., H. Grant, E., S. J. Halstead, B., & Michael P. Mingos, D. (1998). Dielectric parameters relevant to microwave dielectric heating. *Chemical Society Reviews*, 27(3), 213.
11. Ulaby, F. T., & Jedlicka, R. P. (1984). Microwave Dielectric Properties of Plant Materials. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, GE-22(4), 406-415.
12. Spigno, G., & De Faveri, D. M. (2009). Microwave-assisted extraction of tea phenols: A phenomenological study. *Journal of Food Engineering*, 93(2), 210-217.
13. Mandal, V., & Mandal, S. C. (2010). Design and performance evaluation of a microwave based low carbon yielding extraction technique for naturally occurring bioactive triterpenoid: Oleanolic acid. *Biochemical Engineering Journal*, 50(1-2), 63-70.
14. Joardder, M. U. H., & Karim, A. (2023). Pore Evolution in Cell Walls of Food Tissue during Microwave-Assisted Drying: An In-Depth Investigation. *Foods*, 12(13), 2497.
15. Noguchi, T., Kawano, S., Tsukaya, H., Matsunaga, S., Sakai, A., Karahara, I., & Hayashi, Y. (2014). Atlas of Plant Cell Structure. *Springer Japan*, 202
16. Suzuki, K. G. N., & Kusumi, A. (2023). Refinement of Singer-Nicolson fluid-mosaic model by microscopy imaging: Lipid rafts and actin-induced membrane compartmentalization. *Biochimica et Biophysica Acta (BBA) - Biomembranes*, 1865(2), 184093.
17. Volgusheva, N., Altman, E., Boshkova, I., Titlov, A., & Boshkov, L. (2017). Study into effects of a microwave field on the plant tissue. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*, 6(8 (90)), 47-54.
18. Xinhua, Z., Wenchuan, G., Shaojin, W. (2013) Sensing Moisture Content of Buckwheat Seed from Dielectric Properties. (2013). *Transactions of the ASABE*, 1855-1862.
19. Sterling, C. (1955). Effect of moisture and high temperature on cell walls in plant tissues. *Journal of Food Science*, 20(5), 474-479.
20. Rekha, B., & Nagaraja Ganesh, B. (2020). X-ray Diffraction: An Efficient Method to Determine Microfibrillar Angle of Dry and Matured Cellulosic Fibers. *Journal of Natural Fibers*, 1-8.
21. Liao, X., Fang, X., Gao, X., Yi, S., & Zhou, Y. (2024). Effect of High-Intensity Microwave Treatment on Structural and Chemical Characteristics of Chinese Fir. *Forests*, 15(3), 516.
22. He, Q., & Wang, X. (2015). Drying Stress Relaxation of Wood Subjected to Microwave Radiation. *BioResources*, 10(3).

Received 21 October 2025

Approved 28 November 2025

Available in Internet 30 December 2025