

МАТЕМАТИЧНЕ ТА ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНЕ МОДЕЛЮВАННЯ ПРОЦЕСІВ МАСОПЕРЕНОСЕННЯ ПРИ ВИРОБНИЦТВІ ЕФІРНИХ ОЛІЙ

Славинський Р.Л., аспірант кафедри, Славинська В.О., інженер,
Грищенко Р.О., аспірант
Одеський національний технологічний університет, Одеса

Анотація. Важливим інноваційним процесом в технології отримання ефірних олій є обробка рослинної сировини в мікрохвильовому полі, в порівнянні з іншими методами дозволяє отримати більший вихід олій при менших витратах. Вибір енергоефективного режиму обробки є перспективним напрямком, оснований на детальному вивченні фізичних процесів, що протікає в капілярах рослинної матриці та збільшує вихід олій, покращує її якісні показники та знижує енерговитрати. В статті представлено параметричну модель установки, в якій об'єкти визначаються набором параметрів і залежностей між ними, що дозволяє автоматично змінювати і адаптувати модель при зміні цих параметрів. На основі цього запропоновано фізичну модель установки. Це реальний об'єкт, який використовується для дослідження, демонстрації, вивчення властивостей і динаміки системи. Являє собою фізичне втілення об'єкта, яке дозволяє працювати з ним у спрощеному або наочному вигляді, виділяючи тільки найважливіші характеристики для вирішення поставленого завдання. Сформовано нестационарну модель тепломасопереносу в двовимірному просторі та описано за допомогою рівнянь енергії, суцільності та Нав'є-Стокса у відповідних координатах. Визначено граничні умови на межі поділу об'єкта дослідження. Для визначення структури моделі в узагальнених змінних використані методи теорії подібності. Прийнятий кінетичний коефіцієнт - коефіцієнт масовіддачі β_E , що визначає інтенсивність процесу та представлений у загальному вигляді функціональної залежності. Використаний аналіз розмірностей замінив цю функцію залежності між числами подібності. Знайдено рівняння, що використовуються для пошуку співвідношень, які дозволять представити рівняння у вигляді чисел подібності. Наведено критеріальне рівняння у неявній формі для розрахунку інтенсивності фазових перетворень в капілярі рослинної матриці. Для визначення констант в критеріальному рівнянні було виконано ряд дослідів на експериментальній установці з кожурою лимону, в результаті яких отримано інформацію, яку можливо використовувати для відповідних розрахунків, та побудовано відповідні графіки залежностей. Проілюстровано експериментальний стенд для отримання ефірної олії з кожтури лимону методом мікрохвильового екстрагування при атмосферному тиску.

Здобуті результати є базою для організації та визначення енергоефективних режимів обробки рослинної сировини в мікрохвильовому полі завдяки використанню математичного моделювання.

Ключові слова: масоперенесення, математична модель об'єкту досліджень, граничні умови, рівняння енергії та суцільності, критеріальне рівняння.

Вступ. В останні роки інтерес людства до ефірних олій значно зріс. Незважаючи на те що ефективність складових компонентів, що можуть діяти як ароматизатори, була доведена ще здавна, а біологічна активність нещодавно виявлена — це позиціонує їх як натуральну альтернативу для розробки нових застосувань в області особистої гігієни, косметики та продуктів харчування завдяки зростаючій перевазі споживачів до натуральних інгредієнтів. Крім того, очікується, що попит у медичній промисловості, зростаюча обізнаність споживачів про користь для здоров'я та перевагу незначних побічних ефектів ефірних олій стимулюватимуть розширення їх застосування [1]. Таким чином обсяг світового ринку ефірних олій у 2024 році склав майже в 12,5 млрд. доларів США, при цьому дефіцит ринку склав приблизно 87 мільйонів доларів США. Серед країн експортерів лідируючу позицію займає Індія з 912 млн. доларів США, доля країни в світовому експорті складає - 14,5 %, друге місце серед країн експортерів займає США — приблизно 751 млн. доларів США (11,9 % в світовому експорті) та перше місце серед країн імпортерів з 1,3 млрд. доларів США (20,2 % в світовому імпорті) — дефіцит торгового балансу країни дорівнює 540 млн. доларів США. Річне зростання вартості ринку ефірних олій склало майже 11 % [9]. Ефірні олії можна видобувати різними методами, як традиційними (дистиляція, пресування, анфлераж) так і інноваційними (надкритична екстракція рідини, обробка сировини мікрохвильовим полем та ультразвуком) [1]. Сучасні технології дозволяють інтенсифікувати процеси, покращуючи тепло- і масообмін за рахунок нових методів отримання енергії, скорочуючи час обробки, енергоспоживання і вплив на навколишнє середовище [2]. Застосування інноваційних методів отримання ефірних олій у промислових масштабах, як і раніше, обмежене, оскільки їх проектування та експлуатація вимагають сучасного підходу. Розуміння ролі масоперенесення і динаміки нагрівання в ефективності цих інтенсифікованих процесів має вирішальне значення для їх ефективного проектування. Крім того,

економічна доцільність і відповідність процесу вимогам можуть відігравати важливу роль при виборі технології отримання в конкретній ситуації [6].

Математичні моделі є цінним інструментом для вивчення, розробки, проектування та оптимізації промислових процесів. Такі моделі також використовуються для узагальнення експериментальних результатів і дозволяють адаптувати деякі експериментальні дані для моделювання процесу. Для вибору відповідної математичної моделі для моделювання процесу вирішальне значення мають знання та інформація про розподіл ефірної олії в рослинному матеріалі, а також кінетичні дані [5]. Існують різні математичні моделі для опису отримання ефірної олії. В цілому, їх можна розділити на ті, що пояснюють механізми масо- і теплоперенесення, які беруть участь у процесі, і ті, що статистично оцінюють вплив факторів процесу (фактор форми, час, температура, тиск, тип сировини, витрати енергії, вологість) на отриманий вихід екстракції та температурні профілі [3].

Аналіз проблематики та останніх досліджень.

Існують традиційні методи отримання ефірних олій (застарілі, але більш популярні) та інноваційні (високоєфективні), які потребують більш глибоко вивчення завдяки використанню сучасних новітніх та “зелених” технологій [1].

Традиційні методи можуть мати деякі недоліки, такі як деградація ненасичених сполук і втрата деяких компонентів. Ведуться постійні роботи з удосконалення та оптимізації методів екстракції, і що ці методи ретельно підбираються з урахуванням особливостей органу рослини і бажаної якості продукту. Також важливо відзначити, що аналітичний склад ефірних олій може варіюватися в залежності від використовуваного методу, а такі фактори, як тривалість процесу, температура, робочий тиск і якість рослинної сировини, можуть впливати на вихід ефірних олій [10].

До інноваційних методів відносять - мікрохвильову обробку рослинної сировини — революційна технологія, яка викликала великий інтерес. Вона використовує унікальний механізм нагрівання, заснований на принципі “механодифузії”. Цей метод забезпечує більший вихід, коротший час процесу та кращу селективність у порівнянні з традиційними методами. Цей процес також менш складний і витратний у порівнянні з іншими інноваційними методами, не потребує розчинника, та коштовного обладнання. Процес базується на відносно простому принципі, який називається «суха дистиляція з використанням мікрохвиль»: рослинна матриця поміщається в мікрохвильовий реактор без додавання води або органічного розчинника [2].

Перспективним напрямком ефективної організації процесу виробництва ефірних олій є застосування МХ-технологій, використання МХ-енергії електромагнітного поля надвисокої частоти середньо в технологічному процесі [2]. Завдяки накладенню ЕМП на взаємодіючі фази при отриманні олії вдається отримати концентрований екстракт, скоротити тривалість технологічного процесу і істотно інтенсифікувати його, знижуючи при цьому питомі енерговитрати. Для визначення ефективних режимів процесу і параметрів установок, що його реалізують, необхідно мати математичний опис (математичну модель), що адекватно описує досліджуваний процес. Складний характер взаємодії факторів, що визначають інтенсивність процесу обробки рослинної матриці в МХП, не дозволяє встановити точну математичну модель [4]. Тому для дослідження можна вибрати спрощений механізм процесу і використовувати для його формалізації відомий загальний опис явищ тепломасопереносу в капілярно-пористому тілі, а параметри отриманої моделі ідентифікувати за даними експериментальних досліджень. Отримана таким чином модель нестационарних процесів може бути використана для оптимізації параметрів і автоматизації технічних засобів виробництва ефірних олій [7].

В зв'язку з тим, що вартість ефірної олії залежить від її кінцевого складу, і будь-яка математична модель, яка намагається передбачити отримання олії, повинна враховувати всі важливі якісні компоненти суміші, як основні, так і другорядні [4]. Робота, описана в даній статті, являє собою нову модель, яка враховує недоліки раніше відомих моделей і показує, наскільки добре вона відповідає експериментальним даним, отриманим в ході роботи пілотної установи кафедри “ПО та ЕМ” ОНТУ з використанням безпосередньо цитрусових.

Метою роботи є отримання математичної моделі процесу вилучення олійної сировини в електромагнітному полі надвисокої частоти для інтенсифікації його параметрів за даними експериментальних досліджень.

Методи визначення.

Ідея пілотної установки для отримання даних сформульована у наступній гіпотезі: «Вплив на сировину ЕМП різної частоти дозволить ініціювати потік пароповітряної суміші з продукту за рахунок дії бародифузійних рушійних сил, що сприяють зниженню дифузійного опору рослинної матриці». При цьому об'ємне підведення енергії здійснюється магнетронами, завдяки впровадженню яких знижується час процесу та витрати енергії. Запропонуємо параметричну та фізичну моделі процесу екстрагування ефірних олій у системі «сировина - електромагнітне поле» [11]. Запропонуємо параметричну та фізичну моделі процесу екстрагування ефірних олій у системі. Нестационарна модель тепломасопереносу формується у двовимірному просторі з координатами точок (Z, X).

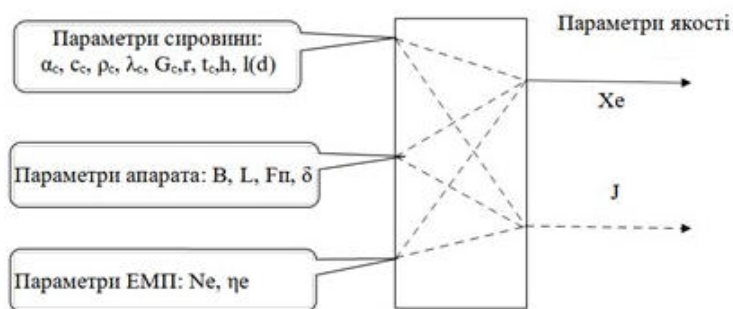


Рис.1 – Параметрична модель

Основними параметрами сировини є: витрати сировини - G_c ; температура t_c ; геометричні параметри: h – висота шару сировини, $l(d)$ – довжина шару сировини (діаметр); фізичні властивості - $\alpha_c, c_c, \rho_c, \lambda_c, \tau$. Ключовими характеристиками апарату є: B — ширина, L – довжина, F_p — площа поверхні, δ — товщина поверхні. Енергетичні параметри магнетрону апарату: потужність - N . ККД - η . Параметри якості моделі: концентрація поліекстракту — X_e (кг/м³), j – питома витрата енергії, (Дж/кг).

Завданням моделювання є формування фізичної схеми екстрактора з МХ генераторами (рис. 2).



Рис.2 – Фізична модель

Нестационарна модель тепломасопереносу формується у двовимірному просторі з координатами точок (Z, X) . Опишемо процеси що протікають за допомогою рівнянь:

1) При $Z > Z_2$ (повітря):

Рівняння Нав'є — Стокса:

$$\rho_{nos} \omega_{nos} \left(\frac{d \omega_{nos}}{dx} + \frac{d \omega_{nos}}{dz} \right) = \rho_{nos} g - \frac{d P_{nos}}{dx} - \frac{d P_{nos}}{dz} + \mu_{nos} \left(\frac{d^2 \omega_{nos}}{dx^2} + \frac{d^2 \omega_{nos}}{dz^2} \right) \quad (1)$$

Рівняння енергії:

$$\frac{dt}{d\tau} = \alpha \left(\frac{d^2 t_{nos}}{dx^2} + \frac{d^2 t_{nos}}{dz^2} \right) + \frac{q_v}{c_{nos} \rho_{nos}} \quad (2)$$

В зв'язку з тим, що внутрішніх джерел тепла у повітрі немає, то складовою:

$$\frac{q_v}{c_{nos} \rho_{nos}} \quad (3)$$

необхідно знехтувати, тоді вищенаведена формула прийме наступний вигляд:

$$\frac{1}{\rho_{nos}} + \frac{d \rho_{nos}}{dt} + \frac{d \omega_{nos}}{dy} + \frac{d \omega_{nos}}{dz} = 0 \quad (4)$$

Рівняння суцільності:

$$\frac{dt}{d\tau} = \alpha \left(\frac{d^2 t_{nos}}{dx^2} + \frac{d^2 t_{nos}}{dz^2} \right) \quad (5)$$

2) При $Z = Z_2$ (межа контакту фаз «повітря — рослинна сировина»):

В цьому діапазоні діють електромагнітні джерела згідно з граничних умов II роду:

2.1) В рослинній сировині при $Z_2 > Z > Z_1$

Рівняння нергії:

$$\frac{dt}{d\tau} = \alpha \left(\frac{d^2 t}{dx^2} + \frac{d^2 t}{dz^2} + \frac{q_{емп}}{c_{pc} \rho_{pc}} \right) \quad (6)$$

$$\text{Рівняння Фіка:} \quad \frac{dW}{d\tau} = D \left(\frac{d^2 W}{dx^2} + \frac{d^2 W}{dz^2} \right) + \frac{dW}{dz} v_z \quad (7)$$

2.2) При $Z < Z_1$ (на межі контакту «піддону реактору — повітря»)

$$\text{Рівняння Нав'є — Стокса:} \quad \frac{dt}{d\tau} = \alpha \left(\frac{d^2 t_{nos}}{dx^2} + \frac{d^2 t_{nos}}{dz^2} \right) + \frac{q_v}{c_{nos} \rho_{nos}} \quad (8)$$

$$\text{Рівняння енергії:} \quad \rho_{nos} \omega_{nos} \left(\frac{d\omega_{nos}}{dx} + \frac{d\omega_{nos}}{dz} \right) = \rho_{nos} g - \frac{dP_{nos}}{dx} - \frac{dP_{nos}}{dz} + \mu_{nos} \left(\frac{d^2 \omega_{nos}}{dx^2} + \frac{d^2 \omega_{nos}}{dz^2} \right) \quad (9)$$

$$\text{Рівняння суцільності:} \quad \frac{1}{\rho_{nos}} + \frac{d\rho_{nos}}{dt} + \frac{d\omega_{nos}}{dy} + \frac{d\omega_{nos}}{dz} = 0 \quad (10)$$

Виведені рівняння (1 — 10) являють собою нестационарне двовірне поле температур по висоті продукту (координата Z), так і по ширині розташування продукту (координата X).

Граничні умови на межах розділу приведені у таблиці 1.

Таблиця 1

Граничні умови об'єкту досліджень

Граничні умови	Модель ГУ	Координати розташування згідно з рис.2.6	Місце розташування
II роду	$q_v = q_{emf} = \text{const} \quad (11)$	$Z_1 > Z > Z_2$	Рослинна сировина
III роду	$\frac{dt_{пов}}{d\tau} = -\frac{a_{пов}}{\lambda_{pc}} (t_{pc} - t_{пов}) \quad (12)$	$Z = Z_2$	Межа контакту «рослинна сировина - повітря»
	$\frac{dt_{пов}}{d\tau} = -\frac{a_{пов}}{\lambda_{np}} (t_{np} - t_{пов}) \quad (13)$	$Z < Z_1$	Межа контакту «піддон реактору — повітря»
IV роду	$\lambda_{pc} \frac{dt}{dn} \Big _{CT1} = \lambda_{np} \frac{dt}{dn} \Big _{CT2} \quad (14)$	$Z = Z_1$	Межа контакту «піддон реактору — рослинна сировина»

Наведені рівняння (1 — 14) представляють собою нестационарну модель поєднаних масообмінних процесів перенесення та тепло аеродинамічних процесів. Цю систему необхідно доповнити рівняннями, які характеризують початкові умови, та співвідношення відповідного середовища та рослинної сировини.

Для вирішення завдання вважатимемо, що потік маси визначається ефективним специфічним коефіцієнтом масовіддачі β_p та різницею тисків у капілярі P_k (надлишковий тиск у капілярі) і P_o (тиск навколишнього середовища). Цей потік створюється потужною рушійною гідродинамічною силою, який турбує пригнаний шар та зазвичай у багато разів більше традиційного дифузійного потоку [11]. Як ми знаємо неможливе іншого рішення даної моделі ніж аналітичне. Відтак подальші дослідження повинні бути спрямовані на спрощення поставленої моделі за допомогою теорії подоби. Завдяки чому запропонований безрозмірний комплекс — число енергетичної дії [11] фізичний зміст, якого визначає співвідношення витрат енергії ЕМП (Q) та базового варіанту (Q_o). З огляду на сказане число Бурдо має наступний вигляд:

$$Bu = Q / Q_o \quad (15)$$

$$Q = N\eta/\phi \quad (\text{Вт/кг}) \quad (16)$$

де: N – потужність ЕМП (Вт), η – ККД мікрохвильового апарата, ϕ — вологомісткість (кг);

$$Q_o = 1 \quad (\text{Вт/кг}) \quad (17)$$

$$Bu = N\eta/\phi \quad (18)$$

Для визначення структури моделі в узагальнених змінних необхідно залучити методи теорії подоби. В основі розрахунку використовується друга теорема подоби Федермана-Бекінгема, яка представляє собою методику постановки експериментів і обробки відповідних результатів.

Приймаємо, що кінетичним коефіцієнтом, визначаючим інтенсивність процесу екстрагування, вважається коефіцієнт масовіддачі - β_E [11]. Процес екстрагування здійснюється конвективно-дифузійним та гідродинамічним потоком. Результатом перетворень стане модель в узагальнених змінних, яка буде враховува-

ти специфіку задачі. Залежність ефективного коефіцієнту масовіддачі від основних параметрів екстрагування сформуємо з допомогою параметричної моделі процесу (рис. 1).

Таким чином конвективно-дифузійний потік визначається щільністю потоку пароповітряної фази ρ ; та в'язкістю μ ; товщиною шару сировини h ; рушійною силою процесу, тобто різницею концентрацій ΔX ; гравітаційною константою g [4].

Значення гідродинамічного потоку залежить від наступних параметрів: N – потужність випромінювання, r – питома теплота фазового переходу, h – висота шару сировини, l – довжина шару сировини. Тоді у загальному виді функціональна залежність масовіддачі матиме наступний вигляд:

$$\beta_E = f(h, l, \rho, \mu, r, N, \Delta X, D, g) \quad (19)$$

Вищенаведені параметри представимо у таблиці 2. В зв'язку з тим, що вказані параметри мають три основні розмірності: довжина та висота шару (L), масу (m), час (τ) [5].

Таблиця 2

Параметри процесу екстрагування у ЕМП

Параметри	Позначення	Розмірність
Ефективний коефіцієнт масовіддачі	β_E	$m \cdot c^{-1}$
Висота шару сировини	h	m
Довжина шару сировини	l	m
Середня щільність потоку	ρ	$kg \cdot m^{-3}$
Середня в'язкість потоку	μ	$kg \cdot m^{-1} \cdot c^{-1}$
Питома теплота фазового переходу	r	$m^2 \cdot c^{-2}$
Потужність мікрохвильового поля	N	$kg \cdot m^2 \cdot c^{-3}$
Гравітаційна постійна	g	$m \cdot c^{-2}$
Різниця концентрацій	ΔX	$kg \cdot m^{-3}$
Коефіцієнт дифузії	D	$m^2 \cdot c^{-1}$

Використовуючи аналіз розмірностей замінимо цю функцію залежністю між числами подоби. У нашому випадку число змінних $n = 10$, число одиниць вимірювання $m=3$. Відповідно до π — теореми число безрозмірних комплексів, які описують процес, повинно бути рівним:

$$(n-m)=7 \quad (20)$$

Параметри h, ρ, μ беремо загальними для всіх безрозмірних груп. Для першої групи запишемо:

$$\pi_1 = h^a \rho^b \mu^c \beta_E^d \quad (21)$$

У розмірному вигляді вираз прийме вигляд:

$$1 = [L]^a \left[\frac{M}{L^3} \right]^b \left[\frac{M}{L\tau} \right]^c \left[\frac{L}{\tau} \right]^d \quad (22)$$

Розмірна матриця для рівняння (22) має наступний вигляд (див. табл.2):

Таблиця 3

Розмірна матриця

	a	b	c	d	Рівняння
M		1	1		$b+c=0$ (23)
L	1	-3	-1	1	$a-3b-c+d=0$ (24)
τ			-1	-1	$-c-d=0$ (25)

Рішенням системи рівнянь (23 — 25) є: $a = b = -c = d$.

Відтак рівняння (21) прийме вид:

$$\pi_1 = \frac{h \rho \beta_E}{\mu} \quad (26)$$

Комплекси, які залишилися, необхідно визначити аналогічним шляхом, об'єднавши h, ρ, μ з невизначеними параметрами в таблиці 2.4.

$$\pi_2 = \frac{h^2 \rho^2 r}{\mu^2} ; \quad \pi_3 = \frac{h \rho^2 N}{\mu^3} ; \quad \pi_4 = \frac{h^3 \rho^2 g}{\mu^2} \quad (27)$$

$$\pi_5 = \frac{\Delta X}{\rho} \quad \pi_6 = \frac{\rho D}{\mu}$$

Виразимо комплекс, що залежить від геометричних параметрів:

$$\pi_7 = \frac{l}{h} \quad - \text{співвідношення параметрів сировини;} \quad (28)$$

Рівняння (26 — 28) використовують для пошуку співвідношень, які дадуть можливість представити рівняння у вигляді узагальнених змінних (табл. 4).

Таблиця 4

Числа подібності та співвідношення

№	Комплекс	Модель	Числа подібності в узагальненому виді
1	π_1	$\frac{h \rho \beta_E}{\mu} \quad (29)$	Коефіцієнт масовіддачі
2	$\frac{\pi_1}{\pi_6}$	$Sh = \frac{h \rho \beta_E}{\mu} * \frac{\mu}{\rho D} = \frac{\beta_E h}{D} \quad (30)$	Число Шервуда
3	$(\pi_6)^{-1}$	$Sc = \frac{\mu}{\rho D} \quad (31)$	Число Шмидта
4	$\pi_4 \pi_5 (\pi_7)^3$	$Gr = \frac{h^3 \rho^2 g}{\mu^2} * \frac{\Delta X}{\rho} * \left(\frac{l}{h}\right)^3 = gl^3 \rho \Delta X \mu^{-2} \quad (32)$	Число Грасгофа
5	π_7	$f(c) = \frac{l}{h} \quad (33)$	Параметр сировини
6	-	$Bu = \frac{N \eta}{\varphi} \quad (34)$	Число Бурдо

Для мікрохвильового поля враховується енергетичним числом Бурдо (Bu), при цьому базова енергія вважається та, яка потрібна для виходу пароповітряної суміші із капіляру сировини. В представленому завданні доцільним вважається співвідношення сумарної енергії ЕМП та енергії потрібної для перетворення вмісту капіляру в пароповітряну суміш [8]. Залежність числа Бурдо (Bu) від потужності ЕМП (N) прямопропорційне, також зростає різниця тисків, яка прискорює та збільшує вихід суміші з капілярів. Вищенаведене сприяє росту коефіцієнту масовіддачі β_E сумісно з цим відбувається турбулентність прикордонного шару.

Отримуємо наступний вираз:

$$Sh = A \cdot (Sc)^c (Gr)^k (Bu)^p (f(c))^u \quad (35)$$

Число Шервуда в рамках завдання відображає інтенсивність масовіддачі у безрозмірній формі, яке дорівнює відношенню конвективного перенесення до дифузії.

В даному завданні можливо знехтувати числом Грасгофа, через малий вплив природної конвекції. Внаслідок чого показник ступеню k прагне до нуля.

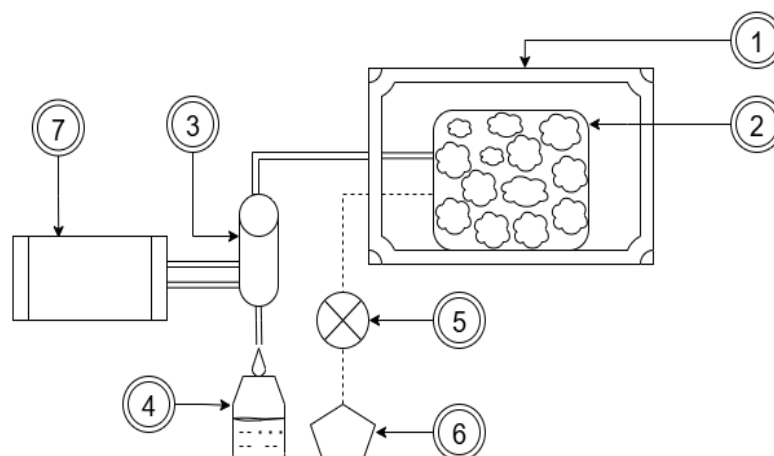
При цьому структура критеріального рівняння прийме наступний вигляд:

$$Sh = A \cdot (Sc)^c (Bu)^p (f(c))^u \quad (36)$$

Проаналізувавши вищенаведену схему масоперенесення можливо зробити наступний висновок, значення β_E для мікрохвильового екстрактора визначається інерцією потоку, розміри установки не впливають на масовіддачу [12]. Константи в рівнянні (36) визначають при розрахунку відповідних даних, отриманих в результаті проведення досліджень: **A, c, p, u**.

Матеріали досліджень та аналіз отриманих результатів.

На рисунку 1 показана малогабаритна пілотна установка, використана для отримання експериментальних результатів при обробці шкіри цитрусових плодів. Оскільки конструкція обладнання забезпечувала адіабатичні умови, необхідно враховувати тільки механізми перенесення компонентів. Наша модель розглядає ефірну олію як суміш різних органічних компонентів і враховує перенесення окремих компонентів олії [13].



1 – резонаторна камера; 2 – радіо прозора ємність з сировиною; 3 – конденсатор; 4 – ємність для збору рідини; 5 – манометр; 6 – вакуум-насос; 7 – холодильна установка

Рис 1 – Схема експериментального стану

У резонаторній камері 1 розташована радіопрозора ємність з сировиною 2, яка приєднана до конденсатора 3, де паровоз-душна фаза конденсується завдяки охолоджувальній рідині, яка поступає з холодильної установки 7, після чого дистилат потрапляє у ємність для збору рідини. При необхідності тиск в резонаторній камері знижується підключенням до системи вакуум-насоса 6 та контролюється манометром 5. Далі за допомогою шприца відбирали прошарок з ділільних воронок та зважували на лабораторних вагах для визначення виходу олії.

На вищевказаній установці була проведена серія експериментальних досліджень з визначення параметрів обробки в МХП, які забезпечують найбільший вихід цільових компонентів. Дослідження кінетики основних факторів проводили на кожурі цитрусових, визначаючи вплив на процес наступних технологічних параметрів: витрат енергії (N, Вт); температури (t, °C); часу екстракції (τ, с); тиску (P, МПа); типу сировини; факторів форми; вологості (φ, %).

При проведенні експериментальних досліджень використовувалися контрольно-вимірювальні прилади, обладнання та експериментальні стенди. У лабораторній установці потужність магнетронів може варіюватися від 0,34 до 1,2 кВт. Частота МХ - випромінювання становить 2450 МГц.

Аналітичні розрахунки проводили з використанням пакетів програм для ПК: Excel (Office 2020) та побудовано наступні графіки на основі проведених експериментів з корою лимону при атмосферному тиску [15].

Результати досліджень приведено на нижчевказаних графіках.

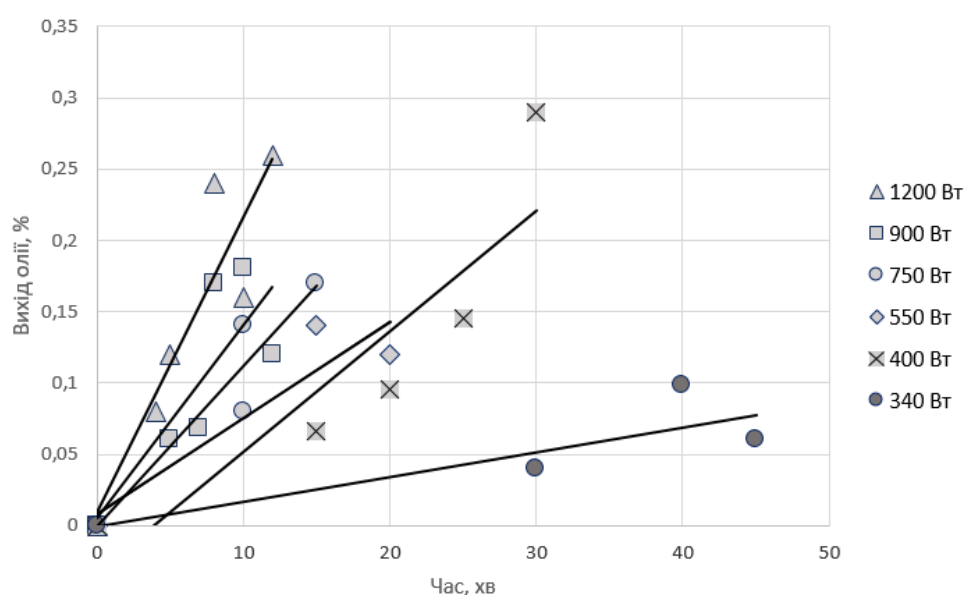


Рис.2 – Графік кінетики виходу ефірної олії

Інформація приведена на графіку (рис.2) свідчить про те що вихід ефірної олії при обробці рослинної сировини в МХП прямопропорційно потужності електромагнітного поля. Так при режимі роботи мікрохвильової печі 1,2 КВт вихід найбільший.

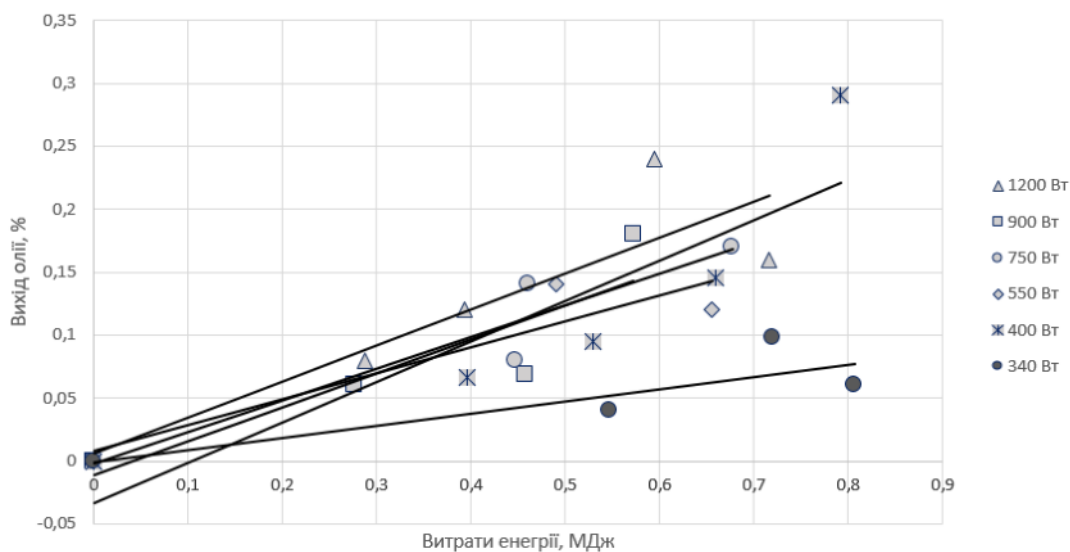


Рис.3 – Графік кінетики виходу ефірної олії

Отримані результати свідчать про те що вихід ефірної олії збільшується з витратами енергії. При потужності мікрохвильового поля 0,4 КВт та витратах енергії близько 0,8 МДж вихід олії максимальний.

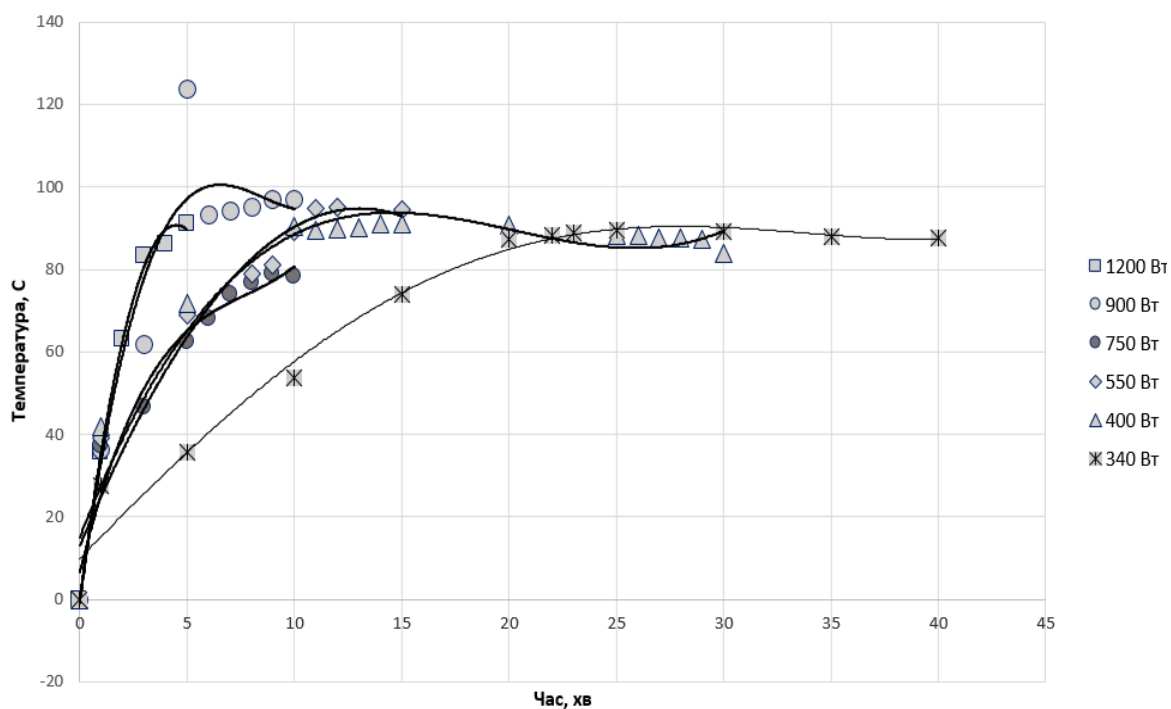


Рис.4 – Термограма

Після близько 5...12 хвилин проведення експерименту температура у резонаторній камері досягає близько 100 °C і далі практично не змінюється, що свідчить про стабілізацію процесу масоперенесення. Це характерно для різних потужностей МХП.

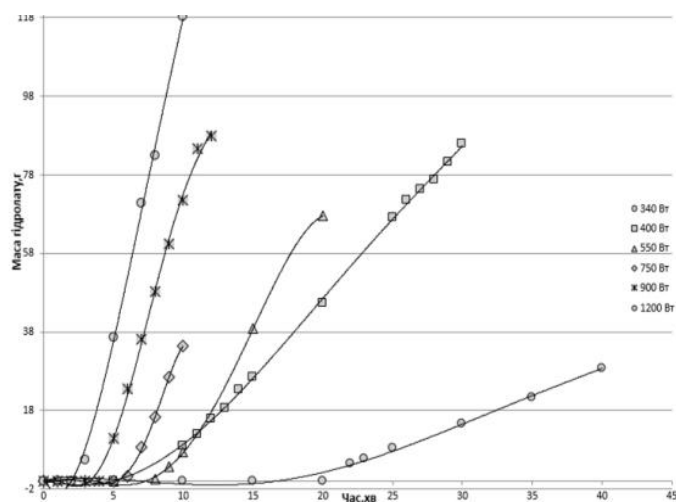


Рис.5 – Графік кінетики маси гідролату

Найбільша масу гідролату та вихід ефірної олії отримані при потужності МХП 1,2 кВт та часу проведення експерименту близько 10 хвилин. Це свідчить про те що потужність МХП позитивно впливає на зростання виходу ефірної олії [14].

Висновки. 1. Представлена математична модель процесу обробки рослинної сировини під дією МХП розширює фізичні уявлення про процеси тепломасоперенесення в системі «тверде тіло — пароповітряна суміш - рідина», дозволяє кількісно оцінити параметри процесу.

2. Запропонований метод параметричної ідентифікації математичного опису динаміки екстракції дозволяє визначити кінетичні коефіцієнти процесу з експериментального досвіду на діючій установці.

3. Розроблено загальну математичну модель та чисельний метод розрахунку динаміки та кінетики тепло- та масообміну, а також фазових перетворень під час МХ обробки сировини; яка дозволяє визначити необхідні параметри режиму, з урахуванням конструктивних особливостей обладнання.

References

1. Kovalenko, O., Slavinskyi, R., Fedosov, Ya., & Slavinska, V. (2024, September). Innovative methods of essential oil production. *Scientific Works*, 88(1), 149–155. <https://doi.org/10.15673/swonaft.v88i1.2978>
2. Lainez-Cerón, E., Ramírez-Corona, N., López-Malo, A., & Franco-Vega, A. (2022, June). An overview of mathematical modeling for conventional and intensified processes for extracting essential oils. *Chemical Engineering and Processing – Process Intensification*, 109032. <https://doi.org/10.1016/j.cep.2022.109032>
3. Maharaj, S., & McGaw, D. (2020, August). Mathematical model for the removal of essential oil constituent during steam distillation extraction. *Processes*, 8, 400. <https://doi.org/10.3390/pr8040400>
4. Araújo dos Santos, A. C. (2020). Mathematical modeling of the extraction process of essential oils *Schinus terebinthifolius Raddi* using supercritical fluids. *Journal of Bioengineering and Technology Applied to Health*, 2(4), 130–135. <https://doi.org/10.34178/jbth.v2i4.91>
5. Hamid, K. J., Kurji, B. M., & Abed, K. M. (2021). Extraction and mass transfer study of *Cupressus sempervirens* L. oil by hydro-distillation method. *Materials Today: Proceedings*, 42(5), 2227–2232. <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2020.12.308>
6. Lainez-Cerón, E., Jiménez-Munguía, M. T., López-Malo, A., & Ramírez-Corona, N. (2021). Effect of process variables on heating profiles and extraction mechanisms during hydrodistillation of eucalyptus essential oil. *Heliyon*, 7(10), e08234. <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2021.e08234>
7. Bandura, V., Kotov, B., Gyrych, S., Gricshenko, V., Kalinichenko, R., & Lysenko, O. (2021). Identification of mathematical description of the dynamics of extraction of oil materials in the electric field of high frequency. *Agraarteadus*, 32(1), 8–16. <https://doi.org/10.15159/jas.21.01>
8. Teshale, F., Narendiran, K., Beyan, S. M., & Srinivasan, N. R. (2022). Extraction of essential oil from rosemary leaves: Optimization by response surface methodology and mathematical modeling. *Applied Food Research*, 2(2). <https://doi.org/10.1016/j.afres.2022.100133>
9. International Trade Centre. (n.d.). *Trade statistics for international business development*. Trade Map – Trade Statistics for International Business Development. <https://www.trademap.org>
10. Souiy, Z. (2023). Essential oil extraction process. In *Biochemistry*. IntechOpen. <https://doi.org/10.5772/intechopen.113311>
11. Burdo, O., et al. (2020, June). Electrodynamics technologies – effective solution to the food industry problems. *Elektronna Obrobka Materialiv*, 56(3–4), 74–88. <https://doi.org/10.5281/zenodo.3970438>
12. Sliczniuk, O., & Oinas, P. (2024, November). Mathematical modelling of essential oil supercritical carbon dioxide extraction from chamomile flowers. *The Canadian Journal of Chemical Engineering*.

<https://doi.org/10.1002/cjce.25557>

13. Joco, R. A., et al. (2023, October). Recent development on the extraction process of plant essential oils and its effect on chemical composition: A review. *Advanced Journal of Graduate Research*, 14(1), 9–20. <https://doi.org/10.21467/ajgr.14.1.9-20>
14. Cueto, S., & Schwartz, M. (2024, September). Extraction, properties and uses of essential oils in the food industry: A review. *Journal of Agricultural Sciences Research*, 4(12), 2–25. <https://doi.org/10.22533/at.ed.9734122419096>
15. Ravindran, A., Jayashree, E., & Anees, K. (2025, February). Recent advances in the extraction of spice essential oil and oleoresin: A review. *Agricultural Reviews*, 46(1). <https://doi.org/10.18805/AG.R-2519>

MATHEMATICAL AND EXPERIMENTAL MODELLING OF MASS TRANSFER PROCESSES IN THE PRODUCTION OF ESSENTIAL OILS

Slavinsky R.L., graduate student, Slavinska V.O., engineer, Grishenko. R. A., graduate student
Odesa National University of Technology, Odesa

Abstract. An important innovative process in the technology of obtaining essential oils is the treatment of plant raw materials in a microwave field, which, compared to other methods, allows for a higher oil yield at lower costs. The selection of an energy-efficient processing mode is a promising direction based on a detailed study of the physical processes occurring in the capillaries of the plant matrix, which increases oil yield, improves its quality indicators and reduces energy costs. The article presents a parametric model of the installation, in which objects are defined by a set of parameters and dependencies between them, which allows the model to be automatically changed and adapted when these parameters change. Based on this, a physical model of the installation is proposed. This is a real object used for research, demonstration, and study of the properties and dynamics of the system. It is a physical embodiment of the object, which allows you to work with it in a simplified or visual form, highlighting only the most important characteristics for solving the task at hand. A non-stationary model of heat and mass transfer in two-dimensional space has been formed and described using energy, continuity and Navier-Stokes equations in the corresponding coordinates. Boundary conditions at the boundary of the object under study are determined. Methods of similarity theory are used to determine the structure of the model in generalised variables. The accepted kinetic coefficient is the mass transfer coefficient βE , which determines the intensity of the process and is represented in the general form of a functional dependence. The dimensional analysis used replaced this function with the dependence between similarity numbers. Equations were found that are used to search for relationships that will allow the equations to be represented in the form of similarity numbers. A criterion equation in implicit form is given for calculating the intensity of phase transformations in the capillary of the plant matrix. To determine the constants in the criterion equation, a series of experiments were carried out on an experimental setup (see Fig. 1) with lemon peel, which yielded information that can be used for the corresponding calculations, and the corresponding graphs of dependencies were constructed. An experimental stand for obtaining essential oil from lemon peel by microwave extraction at atmospheric pressure is illustrated.

The results obtained are the basis for organising and determining energy-efficient modes of processing plant raw materials in a microwave field through the use of mathematical modelling.

Key words: mass transfer, mathematical model of the research object, boundary conditions, energy and continuity equations, criterion equation.

Список використаної літератури

1. Коваленко, О., Р. Славинський, Я. Федосов, і В. Славинська. «Інноваційні методи виробництва ефірних олій.» *Scientific Works*, Vol 88, no 1, Sept. 2024, pp 149-55, [doi:10.15673/swonaft.v88i1.2978](https://doi.org/10.15673/swonaft.v88i1.2978)
2. Elizabeth Lainez-Cerón, Nelly Ramírez-Corona, Aurelio López-Malo, Avelina Franco-Vega «An overview of mathematical modeling for conventional and intensified processes for extracting essential oils.» *Chemical Engineering and Processing - Process Intensification*, June. 2022, p. 109032, [doi:10.1016/j.cep.2022.109032](https://doi.org/10.1016/j.cep.2022.109032).
3. Maharaj, S.; McGaw, D. «Mathematical model for the removal of essential oil constituent during steam distillation extraction.» *Processes* 2020, August, p. 400, doi.org/10.3390/pr8040400.
4. Araújo dos Santos, Ana Carolina. «Mathematical modeling of the extraction process essential oils schinus terebinthifolius raddi using supercritical fluids.» *Journal of bioengineering and technology applied to health*, v. 2, 4, 2020, p. 130-35, [doi:10.34178/jbth.v2i4.91](https://doi.org/10.34178/jbth.v2i4.91).
5. Khaled J. Hamid, Badoor M. Kurji, Khalid M. Abed, «Extraction and mass transfer study of cupressus sempervirens l. oil by hydro-distillation method», *Materials today: Proceedings*, v. 42, part 5, 2021, p. 2227-2232, doi.org/10.1016/j.matpr.2020.12.308
6. Elizabeth Lainez-Cerón, María Teresa Jiménez-Munguía, Aurelio López-Malo, Nelly Ramírez-Corona, «Effect of process variables on heating profiles and extraction mechanisms during hydrodistillation of eucalyptus essential oil», *Heliyon*, Volume 7, Issue 10, 2021, e08234, doi.org/10.1016/j.heliyon.2021.e08234.

7. Bandura, V., Kotov, B., Gyrych, S., Gricshenko, V., Kalinichenko, R., Lysenko, O. 2021. «Identification of mathematical description of the dynamics of extraction of oil materials in the electric field of high frequency.» *Agraarteadus*, 32(1):8–16. doi.org/10.15159/jas.21.01
8. Frew Teshale, K. Narendiran, Surafel M. Beyan, N. R. srinivasan, «Extraction of essential oil from rosemary leaves: optimization by response surface methodology and mathematical modeling», *Applied food research*, volume 2, issue 2, 2022, doi.org/10.1016/j.afres.2022.100133.
9. International Trade Centre. «Trade statistics for international business development.» Trade Map - Trade Statistics for International Business Development, www.trademap.org.
10. Souiy, Zoubaida. «Essential oil extraction process.» *Biochemistry, IntechOpen*, 2023, [doi:10.5772/intechopen.113311](https://doi.org/10.5772/intechopen.113311).
11. Burdo, O., et al. «Electodynamic technologies – effective solution to the food industry problems.» *Електронна обробка матеріалів*, vol. 56, no. 3-4, Zenodo, June 2020, с. 74–88, doi.org/10.5281/zenodo.3970438.
12. Sliczniuk, Oliwer, and Pekka Oinas. «Mathematical modelling of essential oil supercritical carbon dioxide extraction from chamomile flowers.» *The Canadian Journal of Chemical Engineering*, Nov. 2024, [doi:10.1002/cjce.25557](https://doi.org/10.1002/cjce.25557)
13. Joco, Randy A. et al., «Recent Development on the Extraction Process of Plants Essential Oil and its Effect on Chemical Composition: A Review». *Advanced Journal of Graduate Research*, v. 14, № 1, October. 2023, p. 9-20, [doi:10.21467/ajgr.14.1.9-20](https://doi.org/10.21467/ajgr.14.1.9-20).
14. Cueto, S., M. Schwartz. «Extraction, properties and uses of essential oils in the food industry: a review.» *Journal of Agricultural Sciences Research* (2764-0973), vol. 4, № 12, Septem. 2024, p. 2-25, [doi:10.22533/at.ed.9734122419096](https://doi.org/10.22533/at.ed.9734122419096).
15. Archana Ravindran, E. Jayashree, K. Anees «Recent Advances in the Extraction of Spice Essential Oil and Oleoresin: A Review» 2025, *Agricultural Reviews*, Volume 46 Issue 1 (February 2025) doi.org/10.18805/AG.R-2519.

Отримано в редакцію 11.06.2025
Прийнято до друку 02.09.2025

Received 11.06.2025
Approved 02.09.2025