

6. Бурдо О.Г., Калинин Л.Г. Прикладное моделирование процессов переноса в технологических системах: Учебник. Одесса: Друк, 2008. 348с.

References

1. Burdo O.G., Ruzhickaya N.V., Makarenko T.A., Malashevich S.A. (2014). Issledovanie vakuum-vyiparnyih apparatov novogo tipa. Naukovi pratsi ONAHT, 45, 2, 212 – 214.
2. Burdo O.G., Rybina O.B. (2010). Processy inaktivacii mikroorganizmov v mikrovolnovom pole [Processes of inactivation of microorganisms in microwave field]. Odessa: Poligraf.
3. Burdo O.G., Ryashko G.M. (2007). Ekstragirovanie v sisteme «kofe - voda» [Extraction in “coffee-water” system], Odessa: TES.
4. Burdo O.G. (2010). Evolyuciya sushil'nyh ustanovok [Dryers evolution], Poligraf, Odessa, Ukraine.
5. Burdo O.G. Terziev S.G., Yarovoj I.I., Ruzhickaya N.V. (2011). Research of module of band dryer for vegetable materials with combined electromagnetic energy supply. Trudy IV Mezhdunarodnoj nauchno-prakticheskoy konferencii «Sovremennye energosbergayushchie teplovye tekhnologii (sushka i termovlazhnostnaya obrabotka materialov SETT-2011)», Vol.1, Moscow, pp. 422 – 426.
6. Burdo O.G., Kalinin L.G. (2008). Prikladnoe modelirovanie protsessov perenosa v tehnologicheskikh sistemah, Odessa: Druk, 348 p.

УДК 663.938

МАТЕМАТИЧНЕ МОДЕЛЮВАННЯ ТА ОПТИМІЗАЦІЯ МІКРОХВИЛЬОВОГО ПРОТИТЕЧІЙНОГО ЕКСТРАКТОРА

Левтринська Ю.О., аспірант, Зиков А.В., к.т.н., доцент, Терзів С.Г., д.т.н., доцент
Одеська національна академія харчових технологій

MATHEMATICAL MODELING AND OPTIMIZATION OF MICROWAVE COUNTER FLOW EXTRACTOR

Levtrinska Yu.O., postgrad. stud., Zykov A.V., Ph.D., assoc. prof., Terziev S.G., d.t.sc., assoc. prof.
Odessa National Academy of Food Technologies

Copyright © 2017 by author and the journal “Scientific Works”.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Анотація. Проаналізовано проблеми моделювання процесу екстрагування у умовах протитечієного руху екстрагенту і твердої фази в умовах мікрохвильового поля. Обґрунтовано доцільність розрахунку та оптимізації мікрохвильових екстракторів. Визначено основні параметри для розрахунку масопереносу в екстракторі. За допомогою методики аналізу розмірностей 12 шуканих параметрів зведено до 3. Узагальнено результати серії досліджень, проведених з використанням меленої кави. Отримано математичну модель у критеріальному вигляді для мікрохвильового екстрактора. Проведено порівняння чисел Стантона розрахункових та отриманих на основі експериментальних даних. Обґрунтовано вибір параметрів оптимізації. Визначено цільову функцію оптимізації. Розроблено програму оптимізації створену на базі мови програмування Borland Delphi.

Abstract. The problems of modeling the extraction process under the conditions of the countercurrent motion of the extractant and the solid phase in the conditions of the microwave field are analyzed. The expediency of calculation and optimization of microwave extractors is substantiated. The basic parameters for calculation of mass transfer in the extractor are determined. On input – indicators characterizing the extractant (initial and final temperature, viscosity, specific heat, density), solid phase (concentration of extractives, density, porosity and thickness of the layer, equivalent diameter of the particle), apparatus (mass and dimensions, extraction of extractant and product), power supply system (rated power, frequency and number of radiators). At the output – the concentration of the extract and specific power. The parameters for calculating the microwave extractor are determined. Using the method of analysis of the dimensions of 12 required parameters is reduced to 3. The results of a series of studies conducted with ground coffee are summarized. The results are presented in the form of tables and charts. The calculations were carried out with using the theory of similarity and dimensional analysis method. The results of calculations of the concentration differences in the solid phase and in the extract, relative error, mass flow, effective mass transfer coefficient, Reynolds and Stanton numbers, etc. are presented, under the influence of the microwave field. Dependences of the parameters

of the coefficient of mass deducing on the power of the microwave field and on the thickness of the product layer. A mathematical model is obtained in a criterion for a microwave extractor. A comparison was made between Stanton numbers calculated and obtained based on experimental data. The choice of optimization parameters has been discussed. The target optimization function has been determined by traditional methods of coordinate descent and Gauss-Zeidel. An optimization program developed based on Borland Delphi programming language has been developed. The charts for different parameters combination are obtained.

Ключові слова: оптимізація, цільова функція, теорія подібності, мікрохвильовий екстрактор, аналіз розмірностей, масообмін

Keywords: optimization, goal function, similarity theory, microwave extractor, dimensional analysis, mass-transfer

Вступ. Математичне моделювання – необхідний етап при дослідженні будь якого процесу, чи обладнання. Основна проблема при проектуванні екстрактора пов'язана з розрахунком масопереносу в системі «кавова сировина - вода». Для термобаричного екстракційного обладнання, яке використовується на більшості підприємств, методики моделювання процесів уже розроблено, сформовано глибоке розуміння процесу. Однак, для екстрагування з застосуванням мікрохвильових генераторів необхідно виробити такі підходи.

Формулювання проблеми та аналіз літературних джерел. При створенні нових зразків обладнання та проектуванні апаратів необхідно мати чітку математичну модель. Традиційно на підприємствах харчоконцентратної галузі використовується термобаричне екстракційне обладнання, у якому екстракти нагріваються до високих температур при підвищеному тиску. Традиційна технологія використовується на більшості вітчизняних підприємств при екстрагуванні кави [1]. Значним недоліком таких методів є деградація корисних речовин у продукті при впливі високих температур. Розвиток техніки для екстрагування сьогодні відбувається у двох напрямках: удосконалення традиційних і створенні новітніх методів екстрагування. При обранні першого шляху розвитку модернізується традиційне обладнання, для якого оптимізуються конструктивні та режимні характеристики, встановлюються більш досконалі системи регулювання та енергопідведення [2]. Таким чином вдається підвищити ефективність роботи, проте зростання не може бути вищим на порядки. Другий шлях – розробка новітніх технологій. Новий підхід до організації процесу може дозволити підвищити ефективність у рази, дати можливість отримання інноваційних продуктів. Одним із інноваційних напрямів, що інтенсивно набуває розвитку в Україні та у світі – мікрохвильове екстрагування [3-5]. При використанні мікрохвильової енергії можливо впливати безпосередньо на вологу в продукті, що має місце при екстрагуванні у системах розчинник-тверде тіло [3].

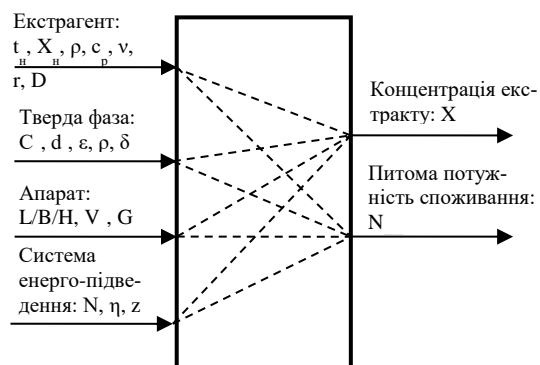


Рис.1. Параметризована модель мікрохвильового екстрактора.

Головними незалежними вхідними параметрами є: початковий стан екстрагента, твердої фази і продуктивність апарату. Для розрахунку необхідно знати основні параметри мікрохвильового екстрактора (рис. 1), такі як концентрації екстрактивних речовин в твердому тілі (C_p) і екстракті (X_n), температуру екстрагента (t) і тиск в апараті. Важливу роль відіграють властивості екстрагента: щільність (ρ), теплоємність (c_p), в'язкість (ν), питома теплота фазового переходу (γ) і коефіцієнт дифузії (D). Для твердої фази слід враховувати еквівалентний розмір частки (d), пористість шару (ϵ) і його товщину (δ). Сам апарат характеризується габаритними розмірами, об'ємом реакційної зони (V_p) і масою завантаження твердої фази ($G_{ш}$).

Загалом, зазначені вище параметри є традиційними для всіх екстракторів [6, 7]. Принципово вперше враховуються характеристики системи підведення енергії. Визначальними тут вважаються потужність одного генератора (N), його ККД (η) і кількість випромінювачів (z) (рис. 1). Змінними параметрами в даному випадку приймаються витрата екстрагента, концентрація розчину на виході з апарату, температура процесу, потужність мікрохвильового поля, конструктивні характеристики масообмінних модулів екстрактора.

Для розрахунку гідравлічних і термічних опорів і відповідних коефіцієнтів переносу, можливо, отримати структуру критеріального рівняння використовуючи метод аналізу розмірностей [2]. Для цього необхідно скористатися загальними принципами даного методу моделювання, що дозволить встановити вид критеріального рівняння для розрахунку коефіцієнтів масовіддачі при комбінованому протіканні процесів екстрагування за схемою, що враховує вплив мікрохвильового поля. У загальному випадку вплив на величину ефективного коефіцієнта масовіддачі β_E мають висоти шару сировини H , густину ρ і в'язкість екстрагенту μ , швидкість

його руху w , коефіцієнт дифузії D . Група цих параметрів характеризує інерційні властивості потоку. Гідродинамічна ситуація при формуванні граничного шару на вході в канал виражається співвідношенням висоти шару H і довжини шару L [2]. Внесок природної конвекції встановлюється різницею концентрацій в потоці ΔX і гравітаційним полем. Дія бародифузії [1] за рахунок мікрохвильового поля визначається різницею тисків в зонах каналу.

Величина цієї різниці є пропорційною енергії випромінювання і тієї енергії, яка необхідна для пароутворення. Тобто величинам питомої теплоти пароутворення r і потужності поля N .

Тоді вихідна функціональна залежність загального вигляду буде:

$$\beta_{\Sigma} = f(H, L, \rho, \mu, w, D, r, N, k, \Delta X, g).$$

Список перерахованих параметрів представлений в таблиці 1. Всі ці параметри містять тільки три основних розмірності: довжину (L), масу (M) і час (τ).

Таблиця 1 – Список параметрів для розрахунку

Назва параметру	Символ	Розмірність
Ефективний коефіцієнт масовіддачі	β_E	$m \cdot c^{-1}$
Висота шару	H	m
Довжина шару	L	m
Середня щільність потоку	ρ	$kg \cdot m^{-3}$
Середня в'язкість потоку	μ	$kg \cdot m^{-1} \cdot c^{-1}$
Середня швидкість потоку	w	$m \cdot c^{-1}$
Коефіцієнт дифузії	D	$m^2 \cdot c^{-1}$
Прихована теплота пароутворення	r	$m^2 \cdot c^{-2}$
Потужність мікрохвильового поля	N	$kg \cdot m^2 \cdot c^{-3}$
Проникність шару	k	m^2
Різниця концентрацій	ΔX	$kg \cdot m^{-3}$
Прискорення вільного падіння	g	$m \cdot c^{-2}$

Для рівняння (2) розмірна матриця має вигляд (табл. 2):

Таблиця 2 – Розмірна матриця

	a	b	c	g	Рівняння
M		1	1		$b + c = 0$
L	1	-3	-1	1	$a - 3b - c + g = 0$
τ			-1	-1	$-c - g = 0$

Користуючись аналізом розмірностей, замінимо цю функцію залежністю між критеріями подібності. В даному випадку число змінних $n = 12$, число їх одиниць вимірювання $m = 3$. Тоді, згідно з π -теоремою, число безрозмірних комплексів, що описують процес, має дорівнювати $(n - m) = 9$.

Параметри H, ρ, μ приймаємо загальними для всіх безрозмірних груп. Тоді, для першої групи запишемо:

$$\pi_1 = H^a \rho^b \mu^c \beta_E^g \quad (1)$$

Або, в розмірній формі:

$$1 = [L]^a \left[\frac{M}{L^3} \right]^b \left[\frac{M}{L\tau} \right]^c \left[\frac{L}{\tau} \right]^g \quad (2)$$

Результати досліджень. Отримані дані експериментальних залежностей оброблено за допомогою програмного пакету Microsoft Excel з метою оцінки швидкості процесу, визначення значень відповідних коефіцієнтів масовіддачі. Приклад розрахунку коефіцієнта β для умов проведених дослідів представлений в табл. 1 і 2. Аналогічні розрахунки були проведені для всіх серій дослідів при інших умовах.

Таблиця 3 – Розрахунок параметрів потоку під впливом мікрохвильового поля

$C_s, \%$	$X_{тек}, \%$	$J \cdot 10^4, \%/c$	$\Delta \tau, c$	$\delta \cdot 10^3, m$	Re
при $N=450$ Вт/кг					
91,13	1,19	73,91	120	4	36,35
92,87	0,74	59,44	120	7	26,82
93,93	1	50,57	120	10	21,22
94,96	0,5	41,93	120	20	19,50

У розрахунках використовувалися такі дані: висота каналу – $8 \cdot 10^{-3} \dots 27 \cdot 10^{-3}$ м, ширина каналу $13,5 \cdot 10^{-2}$ м.

Таблиця 4 – Розрахунок параметрів масовіддачі під впливом мікрохвильового поля

$\Delta C, \%$	$w \cdot 10^4, \text{ м/с}$	$Vp \cdot 10^6, \text{ м}^3/\text{с}$	$C_s, \%$	$\beta \cdot 10^8, \text{ м/с}$
при $N=450 \text{ Вт/кг}$				
8,87	13,2	1,17	91,13	5,23
7,13	9,91	0,72	92,87	4,23
6,07	7,54	0,98	93,93	2,41
5,04	5,86	0,49	94,96	2,04

Після обробки результатів отримано значення коефіцієнта масовіддачі (рис. 2 а) від швидкості руху екстрагента всередині екстрактора. При збільшенні шару меленої кави у масо обмінному модулі в 1,75... 4 рази коефіцієнт масовіддачі збільшується в 1,2 ... 2,5 разів відповідно.

Для обробки результатів дослідів використовувалися константи при числі Sc встановлені для класичних задач масообміну, описаних у літературі [3-5], при числах Re , Π та Bu – розрахункові. У такий же спосіб оброблено результати експериментів по визначенню впливу потужності мікрохвильового поля, витрати екстрагенту, товщини шару продукту у масообмінному модулі, що доводить (рис. 2 б), зростання при однакових числах Re і безрозмірній параметричній проникності Π значення коефіцієнта масовіддачі β у 4 рази при збільшенні потужності мікрохвильового поля N в 2 (з 450 до 900 Вт/кг) рази.

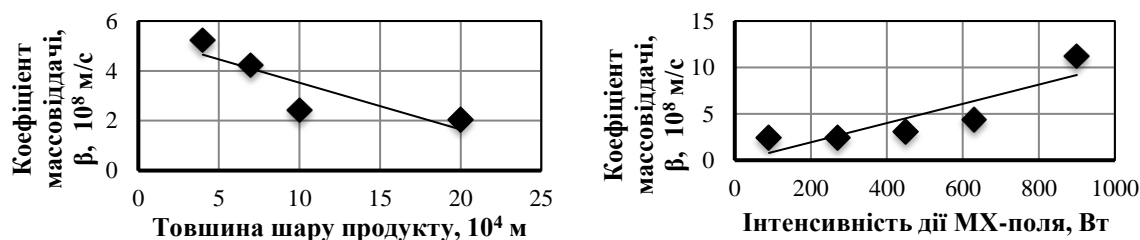


Рис. 2. Залежність коефіцієнта масовіддачі від товщини шару продукту (а) і від потужності (б).

Обробка масиву експериментальних даних дозволяє рекомендувати для розрахунку інтенсивності масо-переносу при екстрагуванні з кавової сировини в умовах дії мікрохвильового поля наступне співвідношення:

$$St_m = 0,004 (Re)^{-0,5} (Sc)^{0,43} (\Pi)^{0,6} (Bu)^{0,33}. \quad (3)$$

Далі наводиться графік залежності експериментальних $St_{\text{мехр}}$ від розрахункових $St_{\text{мтеор}}$ даних для безперервного режиму обробки (рис. 3).

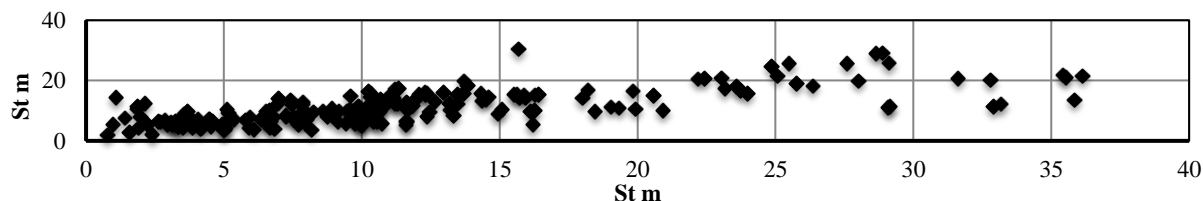


Рис.3. Співвідношення розрахункових і експериментальних даних.

Максимальна відносна похибка розрахунку по співвідношенню (3) складає 38,98 % і спостерігається при великих значеннях числа Стантона.

Завдання оптимізації, як правило, зводяться до відшукування найменшого (або максимального) значення деякої функції, яку прийнято називати цільовою функцією або критерієм якості. З огляду на структуру розробленої математичної моделі екстрактора використаний метод оптимізації параметрів установки, заснований на дослідженні просторів параметрів R_n шляхом рівномірного його заповнення точками $x_j, j = 1, 2, \dots, N$, по всьому простору. У кожній з x_j обчислюється значення цільової функції Z . Отримана інформація використовується в процедурі вдосконалення завдання і оптимізації рішення. Багатовимірні точки $x_j = \{x_{1j}, \dots, x_{nj}\}$ послідовності знаходяться за співвідношенням:

$$x_{ij} = x_i^h + q_{ij} (x_i^g - x_i^h), \quad (4)$$

$$i = 1, 2, \dots, n; j = 1, 2, \dots, N,$$

тобто x_i^g, x_i^h – відповідно верхня і нижня межі варіювання i -того параметра; N – число пробних точок рівномірно розподіленим послідовності $x_1 \dots x_N$; $0 < q_{ij} < 1$. Далі рекомендується послідовно переходити в околиці точок, де отримані найкращі результати, поступово уточнюючи границю x_i^g, x_i^h . Для звууження

простору пошуку слід використовувати додаткову інформацію, отриману шляхом дослідження спрощених залежностей або наближених рішень. У загальному випадку термоекономічний критерій оптимізації має вигляд:

$$Z_{\Sigma} = \left(\frac{\sum_n C_n \Pi_n + \overline{K_n}}{\sum_k e_k} \right), \quad (5)$$

де C_n, Π_n – вартість і річне споживання ексергії із зовнішніх джерел; K_n – річні капітальні та інші, пов'язані з ними витрати в n -му елементі; e_k – річна витрата ексергії для отримання k -го продукту.

Таким чином, завдання оптимізації в загальному випадку може бути зведена до пошуку екстремуму функції.

$$Z_{opt} = \min Z_{\Sigma} \quad (6)$$

Очевидно, більш наочно з економічної точки зору використовувати річне споживання електроенергії і вартість продукції в критерії (5). Так само має сенс врахувати капітальні витрати на виготовлення установки, тоді критерій може прийняти вигляд:

$$Z = \min \left(\frac{\sum(C \cdot \Pi) + K + \sum(C_e \cdot \Pi_e)}{B} \right), \quad (7)$$

де C, Π – вартість і річне споживання сировини; K – річні капітальні та інші, пов'язані з ними витрати; C_e, Π_e – вартість і річне споживання енергії для отримання готового продукту.

Для спрощення завдання можна буде враховувати в критерії тільки змінну складову, тоді:

$$Z = \max (C \cdot D - K_y - C_{ey} \cdot \Pi_{ey}), \quad (8)$$

де Π_{ey} – щорічне споживання енергії установкою, кВт·год; C_{ey} – вартість одиниці енергії, грн / кВт·год; K_y – вартість установки, грн; D – кількість сировини, зекономленої за рахунок додаткового вилучення з кавової сировини, яка розраховується за формулою:

$$D = G_{ocm} \cdot (C_n - C_{ocm}) \cdot k_{ze}, \quad (9)$$

де k_{ze} – коефіцієнт, що враховує втрати екстрактивних речовин зі шламом по відношенню до вихідної сировини (сирим зернам кави) і дорівнює 1,3.

Або:

$$Z = \min (C \cdot O + K_y + C_{ey} \cdot \Pi_{ey}), \quad (10)$$

де O – вартість сировини, витраченої на компенсацію втрат продукту з шламом:

$$O = C_{ocm} \cdot G_{ocm} \cdot k_{ze}, \quad (11)$$

де G_{ocm} – маса кавового шламу, кг; C_n – концентрація екстрактивних речовин в кавовій сировині на вході в установку, %; C_{ocm} – залишкова концентрація екстрактивних речовин в шламі, %.

Після аналізу запропонованих критеріїв (7), (10), для вирішення поставлених завдань оптимізації МХ-екстрактора прийнято критерій (10), який відображає ефективність ступеня додаткового вилучення екстрактивних речовин з кавової сировини. Оптимізація установки – це пошук максимального значення цільової функції Z .

Застосування відомих математичних методів для оптимізації МХ-екстрактора ускладнюється характером математичних моделей установки, складною структурою масових і теплових потоків. У зв'язку з цим доцільно проводити оптимізацію і аналізувати вплив конструктивних та режимних параметрів проектного екстрактора на техніко-економічні показники установки з використанням засобів обчислювальної техніки.

Реалізація алгоритму покоординатного спуску здійснюється по кожній координаті локального оптимуму. В результаті визначаються поля концентрацій в екстракторі. Для аналізу впливу конструктивних параметрів: довжини масообмінного модуля L , ширини масообмінного модуля B , висоти масообмінного модуля h і кількості масообмінних модулів n на техніко-економічні показники проводився комп'ютерний експеримент. Для вирішення завдання оптимізації обраний математичний метод, який перш за все приводив би до кінцевих результатів з найменшими витратами на обчислення. Вибір методу покоординатного спуску або метод Гаусса-Зейделя в значній мірі визначався постановкою завдання, а також математичною моделлю об'єкта оптимізації. Даний метод є класичним ітераційним методом. Відзначимо, що цей метод зводить задачу пошуку найбільшого значення функції кількох змінних до багаторазового вирішення одновимірних задач оптимізації.

Знаходження рішення при використанні принципу максимуму зводилося до задачі рівномірного заповнення досліджуваної області обчисленими значеннями цільової функції (10). На область зміни змінних були накладені обмеження. Для виконання поставленого завдання застосовували програму «EXTRACTOR.2», написану на мові програмування Pascal, в середовищі Borland Delphi 7.0, наведену на рис. 4.

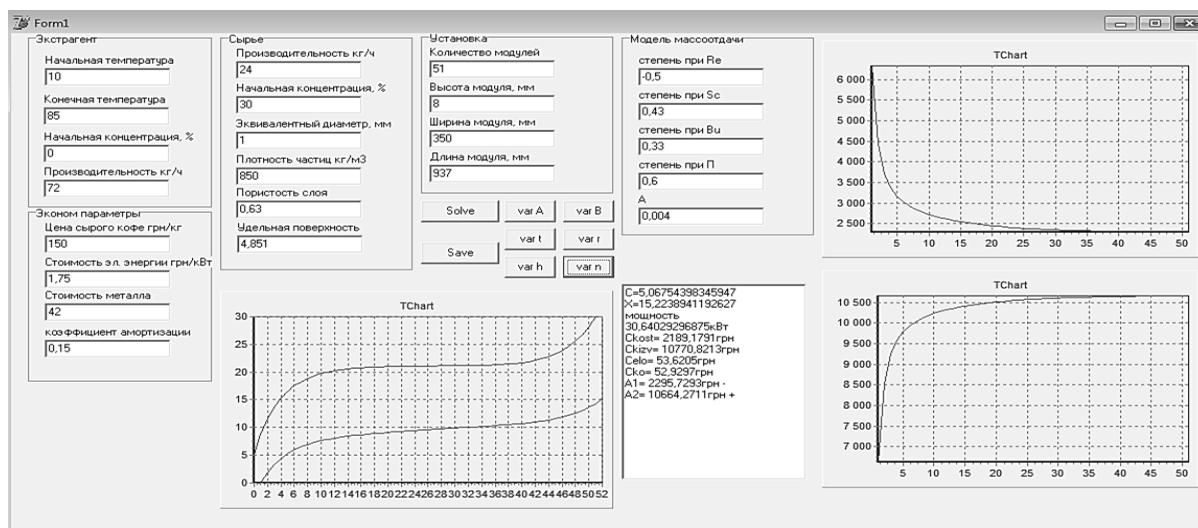


Рис. 4. Скріншот головного вікна програми «EXTRACTOR.2».

Програма дозволяє варіювати параметри оптимізації в заданих діапазонах, розраховувати значення цільової функції і будувати графіки її залежності від обраного параметра при фіксованих значеннях інших параметрів. При цьому визначалося значення параметра, відповідне максимуму цільової функції, яке фіксувалося; далі переходили до варіювання наступного параметра. Після знаходження локального оптимуму за останнім параметром знову проводиться перехід до першого. Процедура оптимізації рішення триває до моменту, поки розбіжності між критеріями оптимізації в попередньому і наступному етапі не стане менше наперед заданої похибки.

На рис.5 представлено залежності, отримані для кавової сировини з початковою концентрацією 30 % екстрактивних речовин.

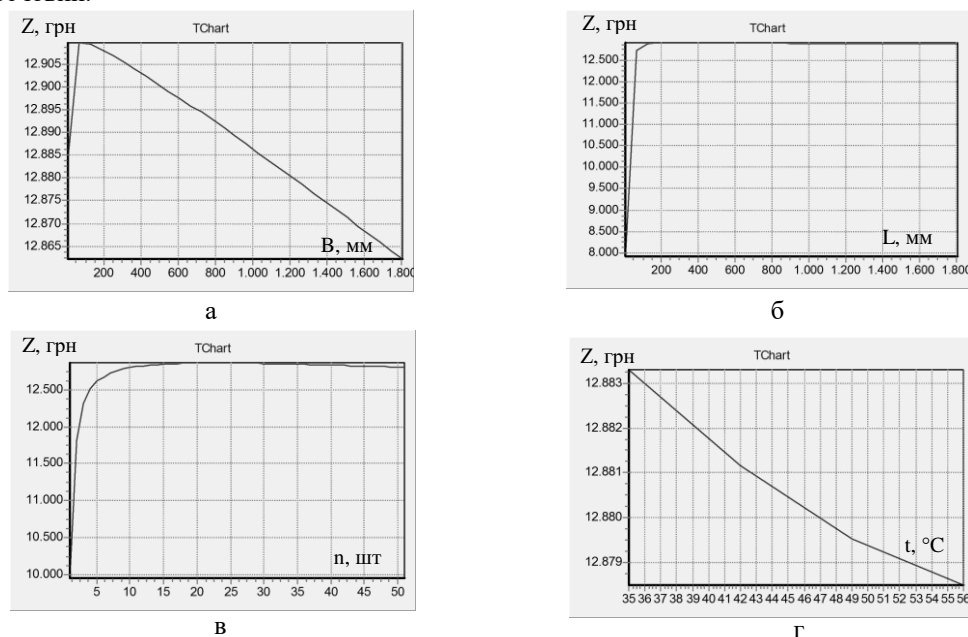


Рис. 5. Відповідність локального максимуму функціоналу економічної ефективності Z показникам а) ширини модуля, б) довжини модуля, в) кількості модулів, г) кінцевої температури.

З отриманих залежностей видно, що функціонал економічної ефективності Z найбільший при ширині модулів 150...180 мм, довжині 200...900 мм, кількості модулів 20...30 шт, та тим більший, чим нижча температура екстракту на виході.

Висновки. Використання мікрохвильової техніки для екстрагування має значні резерви для підвищення ефективності здійснення процесу. Використання теорії подібності та методу аналізу розмірностей дозволяє

визначити неявну математичну модель, значно спростити план проведення дослідів та обробку експериментальних даних, отримати критеріальне рівняння, що може використовуватись при інженерних розрахунках. Розроблені підходи до математичного моделювання та оптимізації дозволяють обрати доцільні конструктивні показники для мікрохвильового екстрактора. Розроблена програма «EXTRACTOR.2» дозволяє отримати чіткі залежності функціоналу економічної ефективності в залежності від різноманітних факторів в окремість та у комплексі.

Література

1. Бурдо О.Г., Пищевые нанотехнологии. Херсон, 2013. 294 с.
2. Процессы переработки кофейного шлама / Бурдо О.Г. и др. Киев: «ЭнтерПринт», 2014. 228 с.
3. A generalized energy-based kinetic model for microwave-assisted extraction of bioactive compounds from plants / C.-Hung Chan et.al. // *Water Environment Research*. 2015. Vol. 88, Num. 10. P.1192-1229.
4. Microwave-assisted extraction of Eucalyptus robusta leaf for the optimal yield of total phenolic compounds / Bhuyan D.J., et.al. // *Industrial Crops and Products*. 2015. Vol. 69. P.1–10.
5. Optimization of microwave-assisted extraction of polyphenols from Myrtus communis L. leaves / Dahmoune F. et.al. // *Food Chemistry*. 2015. Vol. 166, P. 585–595.
6. Аксельруд, Г.А., Лысянский В.М. Экстрагирование. Система твердое тело – жидкость. Л.:Химия, 1974. 256 с.
7. Бурдо О.Г., Калинин Л.Г.. Прикладное моделирование процессов переноса в технологических системах. Одесса: Друк, 2008. 348 с.

References

1. Burdo O.G. (2013). *Pischevyie nanoenergotehnologii*, Grin D.S.: Herson, 294 p.
2. Burdo O.G., Terziev S.G., Ruzhitskaya N.V., Makievskaya T.L. (2014). *Protsessyi pererabotki kofeynogo shlama*, «EnterPrint»:Kiev, 228 p.
3. Hung Chan C., Lima J.-J., Yusoff R., Ngoh G.-C. (2015). A generalized energy-based kinetic model for microwave-assisted extraction of bioactive compounds from plants, *Water Environment Research*, 88(10), 1192–1229.
4. Bhuyan D.J., Vuong Q.V., Chalmers A.C., van Altena I.A., Bowyer M.C., Scarlett C.J. (2015). Microwave-assisted extraction of Eucalyptus robusta leaf for the optimal yield of total phenolic compounds, *Industrial Crops and Products*, 69, 1–10.
5. Dahmoune F., Nayak B., Moussi K., Remini H., Madani K. (2015). Optimization of microwave-assisted extraction of polyphenols from Myrtus communis L. leaves, *Food Chemistry*, 166, 585–595.
6. Akselrud, G.A., Lyisyanskiy V.M. (1974) *Ekstragirovanie. Sistema tverdoe telo-zhidkost*, L.:Himiya, 256 p.
7. Burdo O.G., Kalinin L.G. (2008). *Prikladnoe modelirovanie protsessov perenosa v tehnologicheskikh sistemah*, Odessa: Druk, 348 p.