

ОПТИМІЗАЦІЯ ПОТОЧНИХ МІКРОХВИЛЬОВИХ ЕКСТРАКТОРІВ КАВИ

Терзієв Сергій Георгійович д.т.н.

Левтринська Юлія Олегівна аспірант

Зиков Олександр Вікторович докторант

Одеська національна академія харчових технологій

Terziev S.

Levtrynska Y.

Zycov A.

Odessa national academy of food technologies

Анотація: авторами розроблено математичну модель для вирішення завдання оптимізації техніко-економічних параметрів мікрохвильового екстрактора, яку зведено до пошуку цільової функції. Зважаючи на складність масових та енергетичних потоків у мікрохвильовому екстракторі завдання оптимізації вирішується з застосуванням комп'ютерного моделювання. Авторами розроблено комп'ютерну програму для потреб оптимізації поточних мікрохвильових екстракторів та оптимізовано режими роботи мікрохвильового поточного екстрактора.

Ключові слова: мікрохвильове екстрагування, математична модель, цільова функція, критерій оптимальності, оптимізація, енергоефективність.

Аналіз проблеми

На сьогоднішній день техніка для мікрохвильового екстрагування використовується, переважно, для дослідницьких задач [1]. Доведено, що мікрохвильове поле може ініціювати потужний потік екстрактивних речовин за рахунок виникнення механодифузійного ефекту [2], що особливо важливо при екстрагуванні з рослинної сировини зі складною капілярною структурою, як, наприклад, у кавових зернах.

Дослідження зразку мікрохвильового екстрактора методом калориметрування та його випробування у виробничих умовах дозволяють визначити конструктивні та режимні параметри екстрактора з електромагнітним інтенсифікатором і його енергетичні, а також економічні характеристики. Подальше удосконалення апарату пов'язано із оптимізацією його конструктивних і режимних параметрів [3].

Багато задач оптимізації зводяться до пошуку найменшого (або максимального) значення деякої функції, яку прийнято називати цільовою функцією або критерієм якості. Постановка завдання і методи дослідження істотно залежать від властивостей цільової функції та тієї інформації про неї, яка може вважатися доступною в процесі рішення, а також, яка відома априорі. Однак цього недостатньо для розробки промислового зразка мікрохвильового екстрактора, який міг би забезпечити максимальний енергетичний та економічний ефект.

Аналіз основних досліджень і публікацій

Рішення оптимізаційних задач енергоефективних систем взагалі, і енергоефективного мікрохвильового екстрактора зокрема, неможливо без математичного моделювання. З огляду на складності та різноманіття структури енергетичної системи в даний час використовуються кілька математичних моделей для розв'язання оптимізаційних задач. Найчастіше користуються методом Г.А. Аксельруда [4], який часто застосовується у задачах хімічних виробництв, де сировина несуттєво змінює свої фізичні властивості у процесі екстрагування. Оскільки харчова сировина сильно змінюється у процесі обробки досліджуються інші підходи до моделювання, зокрема методики побудови поверхонь і подальша оптимізація масиву даних [5-8], або комп'ютерне моделювання процесів з використанням пакетів програм типу MATLAB, Excel [9] тощо.

Мета дослідження

Розробка ефективного методу та програмних засобів оптимізації мікрохвильових поточних екстракторів для удосконалення конструкції апарату та впровадження у виробництво.

Результати дослідження

З економічної точки зору доцільно використовувати річне споживання електроенергії і



вартість продукції у критерії якості. Так само має сенс врахувати капітальні витрати на виготовлення установки, тоді критерій може прийняти вигляд:

$$Z = \min \left(\frac{\sum (C \cdot P) + K + \sum (C_E \cdot P_E)}{B} \right), \quad (1)$$

де C, P – вартість і річне споживання сировини відповідно;

K – річні капітальні та інші, пов'язані з ними витрати;

C_E, P_E – вартість і річне споживання енергії для отримання готового продукту.

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

$$Z = \max (C \cdot D - K_y - C_{ey} \cdot P_{ey}), \quad (2)$$

де P_{ey} – річне споживання енергії установкою, кВт·год;

C_{ey} – вартість енергії споживаної установкою, грн/кВт·год;

K_y – вартість установки, грн;

C – оптова ціна одиниці сировини, грн/кг;

D – кількість сировини, яку зекономили за рахунок додаткового вилучення з сировини, кг.

У загальному випадку термoeкономiчний критерiй оптимальностi має вигляд:

$$Z_{\Sigma} = \left(\frac{\sum_n P_n C_n + \overline{K}_n}{\sum_k e_k} \right), \quad (3)$$

де P_n, C_n – вартість і річне споживання ексергії із зовнішніх джерел;

\overline{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.

Застосування математичних методів оптимізації мікрохвильового екстрактора ускладнюється характером математичних моделей установки, складною структурою масових і теплових потоків. У зв'язку з цим доцільне проведення оптимізації з використанням засобів обчислювальної техніки, а також аналіз впливу конструктивних і режимних параметрів проектного екстрактора на техніко-економічні показники установки. А потім провести серію комп'ютерних експериментів для уточнення режимних параметрів, та обрання рекомендованих режимів функціонування екстрактора для різних продуктивностей установки.

Обробка масиву експериментальних даних дозволяє рекомендувати для розрахунку інтенсивності масопереносу під час вилучення з кавової сировини в умовах дії мікрохвильового поля наступне співвідношення: [9]

$$St_m = 0,004 \cdot (Re)^{-0,5} \cdot (Sc)^{0,43} \cdot (\Pi)^{0,6} \cdot (Bu)^{0,33} \quad (4)$$

Отримано критеріальне рівняння для розрахунку інтенсивності масопереносу під час екстрагування з кавової сировини в умовах дії мікрохвильового поля (4) і запропонована інженерна методика розрахунку мікрохвильових екстракторів, яка ефективно використовувалася для проведення комп'ютерного моделювання.

Розглянемо узагальнений алгоритм перевірного розрахунку мікрохвильового екстрактора, вхідними параметрами якого є початкові параметри екстрагента і кавової сировини, витратні і енергетичні параметри процесу. Алгоритм розрахунку наведено на рис. 1, 2.

Для розрахунку задаються наступні вхідні характеристики (блок 1): температури екстрагента на вході (t_E') і на виході (t_E''), початкові концентрації екстрактивних речовин в сировині (X') та у екстракті (C'), висота оброблюваного шару продукту (δ_3), щільність сировини (ρ_3), площа шару продукту (F_3) і число робочих модулів (z).

У блоках 2, 3 представлені розрахунки витрат кавової сировини (G_3) і витрати температури і модуля (Δt_E) відповідно. Далі ведеться розрахунок масопереносу для кожного i -го модуля мікрохвильового екстрактора (рис. 1) в порядку їх розташування по висоті апарату (блоки 4, 5, 6).

У блоці 7 величина M показує середню масову витрату екстрактивних речовин, що перейшли з твердої фази в розчин, а N – сумарну потужність, що підводиться мікрохвильового поля екстрактора.

У блоці 8 розраховують вихідні параметри мікрохвильового екстрактора.

Ключовою ланкою в алгоритмі розрахунку мікрохвильового екстрактора є розрахунок масопереносу по кожному його модулю, блок-схема якого показана на рис. 2.

Порівняння розрахункових значень кінцевих параметрів екстракту за вище викладеним алгоритмом з експериментальними даними результатів випробувань дослідно-промислової установки (рис. 1,2) наведено у таблиці 1.

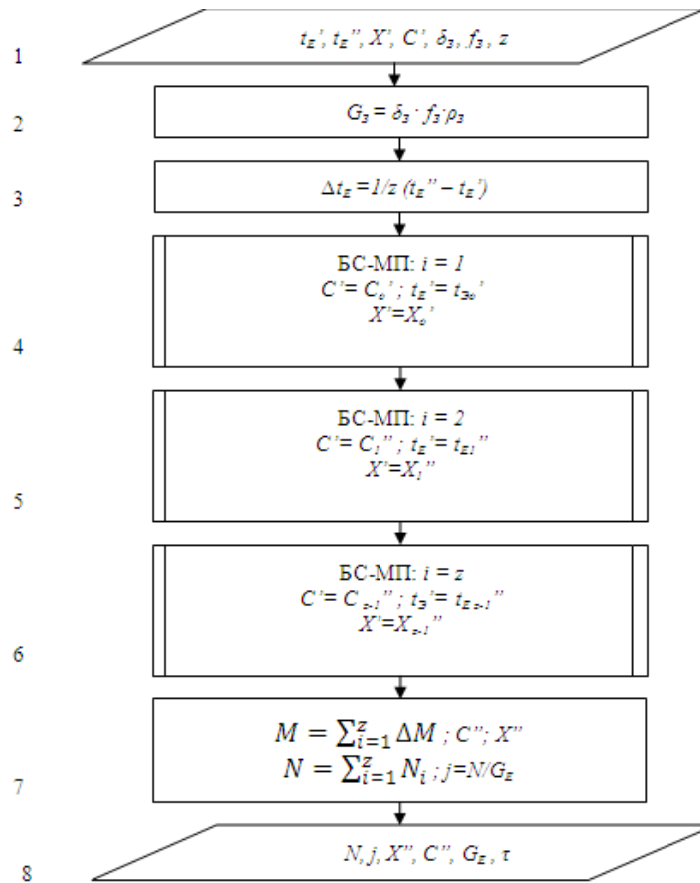


Рис. 1. Алгоритм розрахунку мікрохвильового екстрактора

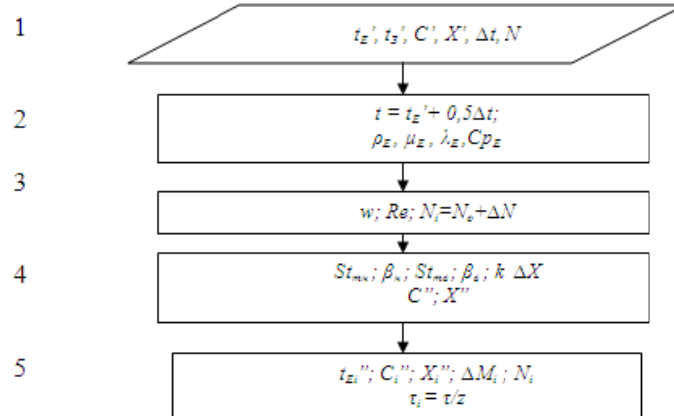


Рис. 2. Блок-схема розрахунку масопереносу i – го модуля мікрохвильового екстрактора

Таблиця 1

Порівняння дослідних і розрахункових даних

№ п/п	Параметри	t _k , °C	Ge, л/год	Gc, кг/ГОД	H, м	N, кВт/кг	Xe, %
1	Експеримент	60	7,2	3,6	0,008	0,59	2,2
	Розрахунок					0,54	1,9
2	Експеримент	75	7,2	3,6	0,008	0,99	2,8
	Розрахунок					0,85	2,4
3	Експеримент	85	7,2	3,6	0,008	1,48	3,5
	Розрахунок					1,29	3,0

Порівняння розрахованих даних з експериментальними показує адекватність розробленої моделі дійсності, а максимальна відносна похибка обчислень не перевищує 15 %.



Мета експерименту – аналіз впливу технологічних і режимних параметрів на процес екстрагування для розробки рекомендацій по режимам проведення процесу. Комп'ютерний експеримент проводився з використанням комп'ютерної техніки та прикладних програмних пакетів Microsoft Excel, Delphi (об'єктно-орієнтована мова програмування).

Авторами розроблено програми для оптимізації конструктивних та економічних параметрів мікрохвильового екстрактору. Скріншот головного вікна програми «EXTRACTOR.1» для проведення комп'ютерного експерименту по заданих параметрах мікрохвильового екстрактора безперервної дії представлений на рис. 3.а.

Для виконання завдання виявлення впливу параметрів, що оптимізуються на техніко-економічні показники установки, застосовували програму «EXTRACTOR.2». Скріншот головного вікна програми показано на рис. 3.б. Обидві програми написані на мові програмування Pascal, в середовищі Borland Delphi 7.0.

Порівняння експериментально-промислових даних з програмно-розрахунковими значеннями кінцевих параметрів екстракту проводилося для конструкції створеного мікрохвильового екстрактора [9]. Масообмінний модуль, виконаний з радіопроникного матеріалу, розміри якого становлять: довжина 0,22 м, висота 0,04 м, ширина 0,135 м. Модуль був заповнений кавовим шламом з розмірами 0,5 ... 2 мм. Система управління дозволяла регулювати потужність установки і в кожну резонаторних камеру подавалася енергія мікрохвильового генератора ($N_i = 0,148; 0,247; 0,370$ кВт/кг). Об'ємна витрата рідини дорівнювала 7,2 л/год (або $2 \cdot 10^{-6}$ м³/с). Продуктивність по сировині 3,6 кг/год (або $1 \cdot 10^{-3}$ кг/с). Висота шару продукту в масообмінних модулях 0,008 м.

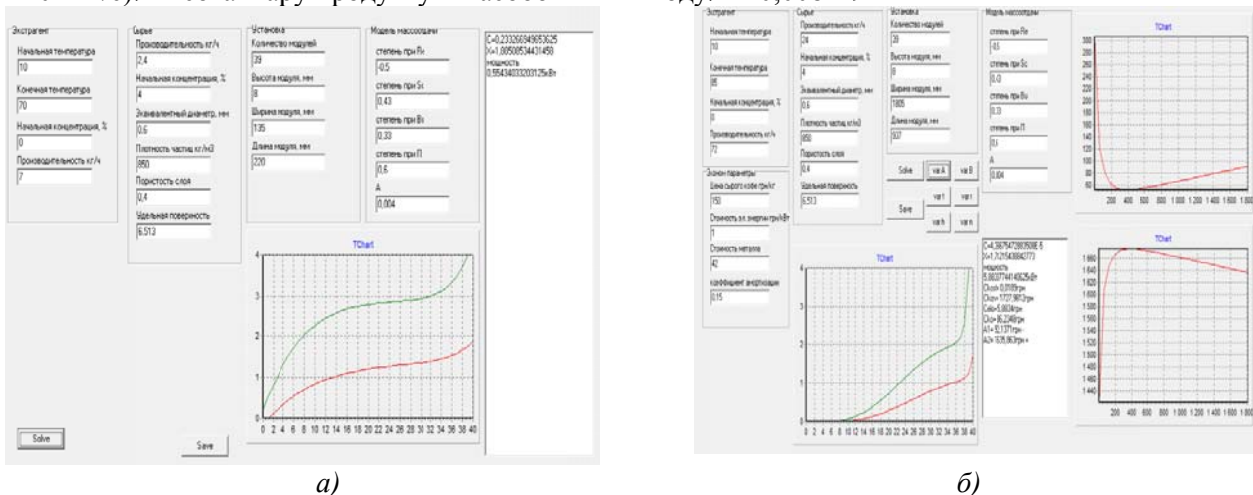


Рис. 3. Скріншот головного вікна програм «EXTRACTOR.1» (а) та «EXTRACTOR.2» (б)

Внаслідок того, що більш потужні магнетрони мають більшу вартість, загальні капітальні витрати мають певний оптимум, що в свою чергу вплине на загальні витрати. Так зі збільшенням продуктивності установки зростає функціонал економічної ефективності Z внаслідок більш раціонального використання енергії, що підводиться (рис. 4). При збільшенні потужності в 4,5 раз показник економічної ефективності зростає в 8 разів.

Магнетрони повинні забезпечувати ефективне ведення процесу при можливо менших економічних витратах.

В даному випадку, можливо, виявити загальні тенденції впливу продуктивності і потужності, що підводиться, та мікрохвильових інтенсифікаторів на конструктивні і економічні параметри самого екстрактора.

Використовуючи розроблену структуру, проведена оптимізація режимів роботи і конструктивних параметрів мікрохвильової установки. Аналіз варіантів с різною продуктивністю наведено на рис. 4 та в табл. 2.

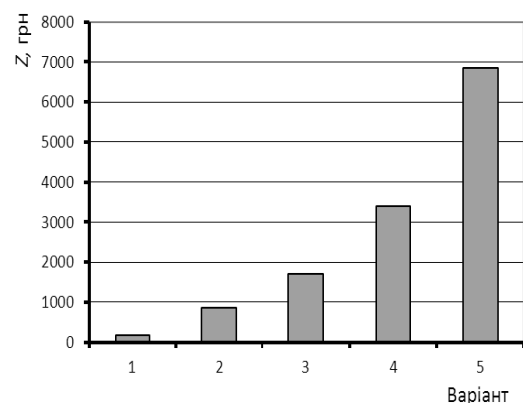


Рис. 4. Результати оптимізації



Таблиця 2

Результати оптимізації

Варіант	1	2	3	4	5
Продуктивність по кавовому шламу G_c , кг/год	6	12	24	48	96
Гідромодуль системи «кавова сировина – вода» q	1,2	4,0	3,0	2,6	3,0
Кінцева температура екстрагенту t_k , °C	60	90	85	85	96
Потужність, кВт/кг	1,0	4,4	6,1	10,5	26,0
Ширина масообмінного модуля B , мм	65	240	350	1140	1800
Довжина масообмінного модуля L , мм	350	550	937	1180	1500
Функціонал економічної ефективності Z , грн/змiна	168	826	1696	3400	6843
Концентрація екстрагенту X_e , %	2,14	1,60	1,67	1,68	1,61
Капітальні витрати, тис. грн	30	85	160	300	550
Строк окупності, років	0,41	0,23	0,21	0,20	0,18

За підсумками оптимізації розроблений типорозмірний ряд мікрохвильових екстракторів безперервної дії для екстрагування кави продуктивністю 6 ... 96 кг/год, потужність, що підводиться електромагнітних інтенсифікаторів становить до 26 кВт. При цьому термін окупності запропонованих установок не перевищує 0,5 року.

Економічною оцінкою організаційних і технічних заходів служить показник річного економічного ефекту [10]:

$$E_T = [(C_1 - C_2) - E_n \cdot K_{зуд}] \cdot A_2, \quad (5)$$

де C_1 , C_2 – собівартість одиниці продукції до і після проведення заходу модернізації, грн; E_n – номінальне споживання енергії;

$K_{зуд}$ – питомі капітальні витрати після проведення заходу, грн / т.

Річний обсяг виробництва розчинної кави до і після проведення заходу залишається постійним $A_1 = A_2 = 1300$ т.

Сумарна зміна собівартості одиниці продукції з урахуванням статей витрат:

$$\Delta C = -0,07 + 0,0025 + 0,01 + 0,002 = -0,06 \text{ грн/кг.}$$

Відповідно до отриманих даних внесено зміни до статті калькуляції.

З огляду на зміни собівартості одиниці продукції, отримуємо річний економічний ефект:

$$E_T = [0,06 - 0,15 \cdot 0,026] \cdot 1300 \cdot 1000 = 65826 \text{ грн/рік.}$$

Розрахунок проведено для ПАТ «Енні Фудз».

Висновки

При порівнянні розрахункових даних з експериментальними даними підтверджена адекватність розробленої моделі дійсності з максимальною відносною похибки обчислень що не перевищує 15%. Серія комп'ютерних експериментів дозволила оптимізувати конструктивні і режимні параметри функціонування екстрактора. Розроблено типорозмірний ряд мікрохвильових екстракторів для екстрагування кавової сировини продуктивністю 6 ... 96 кг / год, потужність, що підводиться до електромагнітних інтенсифікаторів у межах до 26 кВт. При цьому термін окупності запропонованих установок не перевищує - 0,5 року.

Для оцінки ефективності впровадження мікрохвильового екстрактора слід враховувати енергетичні та економічні параметри. Прибуток визначається різницею між зміною собівартості одиниць продукції після впровадження і питомих капітальних витрат після проведення заходу з урахуванням обсягу річного виробництва підприємства. Загальна доцільність впровадження технології мікрохвильового екстрагування визначається співвідношенням (5).

Список літератури

1. *Enhancing extraction processes in the food industry* / N. Lebovka, E. Vorobiev, F. Chemat/ Taylor & Francis Group, LLC – 2012 – 518 p.
2. Бурдо О.Г. *Пищевые наноэнерготехнологии* – Херсон, 2013 – 294 с.
3. Макиевская, Т.Л. *Повышение энергетической эффективности процесса экстрагирования при производстве кофе* / Т.Л. Макиевская // *Наук. пр. / ОНАХТ.* – О., 2013. – Вып. 43, т.2. – С. 113-116.
4. Аксельруд Г.А., Лысянский В.М. *Экстрагирование. Система твердое тело-жидкость.* – Л.: Химия. – 1974. – 256 с.
5. *Optimization of Microwave-Assisted Extraction of Phenolic Antioxidants from Grape Seeds (Vitis*



vinifera)/K. Krishnaswamy, V.Orsat, Y.Gariépy, K. Thangavel // *Food Bioprocess Technol*; 2012, pp. 441-445.

6. Optimization of microwave-assisted extraction of flavonoid from Radix Astragali using response surface Methodology; Weihua Xiao, Lujia Han, Bo Shi; *Separation science and Technology*, – 2008, Vol. 43: pp. 671-681.

7. Optimisation of Ultrasonic-Microwave-Assisted Extraction Conditions for Polysaccharides from Mulberry (*Morus atropurpurea* Roxb) Leaves and Evaluation of Antioxidant Activities in vitro / F. Liu, R.Hou, S.Liao, Y. Zou, G. Xiao // *Med. chem.* – 2015, Vol.5(2) <http://dx.doi.org/10.4172/2161-0444.1000248> – pp. 90-95.

8. Optimization studies on microwave assisted extraction of dragon fruit (*Hylocereus polyrhizus*) peel pectin using response surface methodology / Rahmati, S., *Abdullah, A., Momeny, E. and Kang, O. L.// *IFRJ – Vol.22(1)*: pp. 233-239

9. Процессы переработки кофейного шлама / О.Г. Бурдо, С.Г. Терзиев, Н.В. Ружницкая, Т.Л. Макиевская. – Киев: Энтерпринт, 2014. – 228 с.

10. Плотникова, В.В. Кинетические закономерности процесса экстрагирования при производстве растворимого кофе : дис... канд. техн. наук.: 05.18.12/ В.В. Плотникова – К., 1983. – 134 с.

References

1. Enhancing extraction processes in the food industry / N. Lebovka, E. Vorobiev, F. Chemat/ Taylor & Francis Group, LLC – 2012 – 518 p.

2. Burdo O.G. Pischevyie nanoenergotehnologii – Herson, 2013 – 294 s.

3. Makievskaya, T.L. Povyshenie energeticheskoy effektivnosti protsessa ekstragirowaniya pri proizvodstve kofe / T.L. Makievskaya // *Nauk. pr. / ONAHT.* – O., 2013. – Vip. 43, t.2. – S. 113-116.

4. Akselrud G.A., Lyisyanskiy V.M. Ekstragirowanie. Sistema tverdoe telo-zhidkost. – L.: Himiya. – 1974. – 256 s.

5. Optimization of Microwave-Assisted Extraction of Phenolic Antioxidants from Grape Seeds (*Vitis vinifera*)/K. Krishnaswamy, V.Orsat, Y.Gariépy, K. Thangavel // *Food Bioprocess Technol*; 2012, pp. 441-445.

6. Optimization of microwave-assisted extraction of flavonoid from Radix Astragali using response surface Methodology; Weihua Xiao, Lujia Han, Bo Shi; *Separation science and Technology*, – 2008, Vol. 43: pp. 671-681.

7. Optimisation of Ultrasonic-Microwave-Assisted Extraction Conditions for Polysaccharides from Mulberry (*Morus atropurpurea* Roxb) Leaves and Evaluation of Antioxidant Activities in vitro / F. Liu, R.Hou, S.Liao, Y. Zou, G. Xiao // *Med. chem.* – 2015, Vol.5(2) <http://dx.doi.org/10.4172/2161-0444.1000248> – pp. 90-95.

8. Optimization studies on microwave assisted extraction of dragon fruit (*Hylocereus polyrhizus*) peel pectin using response surface methodology / Rahmati, S., *Abdullah, A., Momeny, E. and Kang, O. L.// *IFRJ – Vol.22(1)*: pp. 233-239

9. Protsessyi pererabotki kofeynogo shlama / O.G. Burdo, S.G. Terziev, N.V. Ruzhitskaya, T.L. Makievskaya. – Kiev: Enterprint, 2014. – 228 s..

10. Plotnikova, V.V. Kineticheskie zakonomernosti protsessa ekstragirowaniya pri proizvodstve rastvorimogo kofe : dis... kand. tehn. nauk.: 05.18.12/ V.V. Plotnikova – К., 1983. – 134 s.

ОПТИМИЗАЦИЯ ТЕКУЩИХ МИКРОВОЛНОВЫХ ЭКСТРАКТОРОВ КОФЕ

Аннотация: авторами разработана математическая модель для решения задачи оптимизации технико-экономических параметров микроволнового экстрактора, которая сведена к поиску целевой функции. Ввиду сложности массовых и энергетических потоков в микроволновом экстракторе задача оптимизации решается с применением компьютерного моделирования. Авторами разработана компьютерная программа для нужд оптимизации проточных микроволновых экстракторов. Оптимизированы режимы микроволнового противоточного экстрактора.

Ключевые слова: микроволновое экстрагирование, математическая модель, целевая функция, критерий оптимальности, оптимизация, энергоэффективность.

CURRENT OPTIMIZATION MICROWAVE EXTRACTOR COFFEE

Summari: authors developed a mathematical model for solving the problem of optimizing technical and economic parameters of the microwave extractor, which one reduced to the search of objective function. In view of the complexity of mass and energy flows in the microwave extractor, optimization problem is solved using computer simulation. Authors developed a computer program for optimization of in-flow microwave extractors. Microwave in-flow extractor working modes are optimized.

Keywords: microwave assisted extraction, mathematical model, objective function, optimality criterion, optimization, energy efficiency.