

УДК 66.061.34: 665.335.2

МАТЕМАТИЧНІ МОДЕЛІ РЕЖИМІВ ФУНКЦІОНУВАННЯ ЕКСТРАКТОРІВ З МІКРОХВИЛЬОВИМ ПІДВЕДЕННЯМ ТЕПЛОТИ

Бандура В.М., кандидат технічних наук, професор

Вінницький національний аграрний університет

Котов Б.І., доктор технічних наук, професор

Подільський державний аграрно-технічний університет

Калініченко Р.А., кандидат технічних наук, доцент

ВП НУБіП України «Ніжинський агротехнічний інститут»

e-mail: bandura_3@ukr.net

Анотація. *Екстрагування цінних компонентів з рослинної олійної сировини відноситься до важливих процесів, підвищення ефективності яких здійснює визначальний вплив на техніко-економічні показники переробної галузі агропромислового виробництва. На сучасному етапі розвитку техніки і технології екстрагування олійної сировини заслуговують на визнання потенційні можливості мікрохвильової технології: використання електромагнітного поля (ЕМП) надвисокої частоти (НВЧ) для інтенсифікації і підвищення ефективності традиційного виробництва олій і отримання продукції з новими, кращими споживчими якостями.*

Стаття присвячена теоретичному обґрунтуванню процесів екстрагування олійної сировини в екстракторах з мікрохвильовим підведенням енергії, а саме впливу ЕМП НВЧ на процеси тепломасопереносу в рідкій і твердій фазі речовини.

Отримані наближені розв'язки наведених теоретичних математичних моделей дозволяють ідентифікувати процеси масопереносу в екстракторах з мікрохвильовим підведенням теплоти для подальшого визначення оптимальних режимів функціонування апаратів з точки зору енерго-ресурсозбереження і якості кінцевого продукту.

Ключові слова: *екстракція, електромагнітне поле, масоперенос, олієвмісний матеріал*

Актуальність. *Основною технологією вилучення олійних речовин із олієвмісної сировини (насіння ріпаку, сої, соняшника, тощо) є використання процесу пресування. Як наслідок, отриманий шрот містить значну кількість олії, яку можна вилучити лише шляхом екстрагування. Процес екстрагування олійних компонентів із шроту досить повільний. Підвищити інтенсивність процесу*

екстракції нагріванням розчину парою призводить до збільшення енерговитрат і металоємності конструкцій апаратів. Ефективним і перспективним напрямком раціональної в плані ресурсозбереження, організації процесу екстракції є використання бародифузійних мікрохвильових технологій, тобто застосування електромагнітного поля надвисокої частоти (ЕМП НВЧ) безпосередньо в процесах екстрагування тверди дисперсної сировини в розчинах.

Аналіз останніх досліджень та публікацій. Теорії процесу екстрагування присвячена достатньо велика кількість робіт [1,2], в тому числі з використанням ЕМП НВЧ [3,4] для інтенсифікації процесу масопереносу. Результати експериментальних досліджень інтенсифікації масопереносу при дії мікрохвильового поля висвітлені в роботах [5,6]. В наукових працях професора О.Бурдо [3,4,7] подано теоретичні передумови інтенсифікації виділення цільового компонента з твердого тіла за рахунок бародифузійного ефекту при дії ЕМП НВЧ. Наведено модельні уявлення на основі яких можна сформулювати вдосконалені математичні моделі екстракції системи «тверде тіло – розчин».

Мета дослідження – теоретичне встановлення впливу ЕМП НВЧ на процес екстракції на основі вдосконалених математичних моделей.

Матеріали і методи дослідження. В основі досліджень використано аналітично-розрахункові методи на основі декомпозиції математичного опису на моделі мікро- і макро рівня. Для опису кінетики на першому рівні використані моделі загальної теорії тепло- і масо переносу О.В.Ликова [8,9], на другому рівні на основі отриманих рівнянь кінетики сформульовані моделі процесів екстракції в апаратах періодичної і безперервної дії.

Результати досліджень та їх обговорення. Відповідно до загальної теорії тепло- і масо переносу в капілярно-пористому тілі при підведенні теплоти (внутрішньому або зовнішньому), загальна зміна вологовмісту (масової концентрації речовини в твердому тілі) відбувається в результаті переносу рідкої фази і фазового перетворення рідини в пару [8]. Для нестационарного поля вологовмісту (або концентрації) матеріалу, при нехтуванні величиною потоку

термовологопровідності (яка набагато менша за інші складові масопереносу [9]) справедливе диференціальне рівняння у вигляді:

$$\rho_0 \frac{\partial U}{\partial \tau} = \rho_0 a_m \nabla^2 U + \rho_0 \varepsilon \frac{\partial U}{\partial \tau}; \quad (1)$$

або враховуючи, що об'ємна концентрація $C = \rho_0 U$, отримаємо:

$$\frac{\partial C}{\partial \tau} = D \nabla^2 C + \varepsilon \frac{\partial C}{\partial \tau}; \quad (1a)$$

де U , C – масова і об'ємна концентрація цільового компонента в матеріалі; a_m , D – коефіцієнт дифузійного масо переносу (дифузії); ρ_0 – густина абсолютно сухої речовини; ε – критерій фазового переходу (зміна вологовмісту у вигляді пари до рідкої вологи); $\nabla^2 = \frac{\partial^2}{\partial y^2}$; y – поточна координата.

Друга складова рівняння (1) враховує зміну концентрації речовини в капілярах тіла за рахунок фазового перетворення (пароутворення). Утворення парової фази під дією мікрохвильового поля, підвищує тиск в пароводяній суміші, що інтенсифікує переміщення рідкої фази до поверхні [4,7]. Для врахування і кількісної оцінки впливу ЕМП НВЧ на процес переносу бародифузиею екстрактивних речовин розглянемо тепловий баланс частинки екстрагує мого матеріалу. Енергія мікрохвильового випромінювання, частина якої виділяється в об'ємі частинки $P d\tau$ витрачається на нагрівання речовини (скелет плюс рідина $m_0 c d\theta$) і на перетворення частинки рідини ($\varepsilon \cdot m_0 d\theta$) в пару, що можна виразити рівнянням теплового балансу:

$$P_V d\tau = m \cdot c_m d\theta + r \cdot m_0 \cdot \varepsilon \cdot dU; \quad (2)$$

де $m_0 = V \cdot \rho_0$, V – об'єм матеріалу.

Для визначення залежності інтенсивності пароутворення від теплової потужності внутрішнього джерела теплоти скористаємося визначенням критерію Косовича в модифікованому вигляді, а саме:

$$Ko' = \frac{r \cdot dU}{c_w d\theta}; \quad (3)$$

де, c_w – питома теплоємність рідкої фази.

В такій формі запису число Ko' визначає відношення теплоти пароутворення рідини в пару до теплоти нагріву цієї рідини до стану пароутворення. Із співвідношення (3) отримаємо:

$$Ko' \frac{c_w d\theta}{r \cdot d\tau} = -\frac{dU}{d\tau}; \quad \frac{d\theta}{d\tau} = -\frac{r}{c_w Ko'} \frac{dU}{d\tau}. \quad (4)$$

Підставляючи отримані значення в рівняння (2) після перетворень матимемо:

$$-\frac{dU}{d\tau} = \frac{P}{r \cdot \left(\frac{m \cdot c}{c_w Ko'} + m_0 \varepsilon \right)}. \quad (5)$$

Або через об'ємну концентрацію:

$$-\frac{dC}{d\tau} = \frac{P \cdot \rho_0}{r \cdot \left(\frac{m \cdot c}{c_w Ko'} + m_0 \varepsilon \right)}. \quad (6)$$

Підставляючи значення (6) в рівняння (1а) після перетворень матимемо:

$$\frac{\partial C}{\partial \tau} = D \nabla^2 C + \varepsilon' \frac{P \cdot \rho_0}{r \cdot \left(\frac{m \cdot c}{c_w Ko'} + m_0 \varepsilon' \right)}. \quad (7)$$

Для частинки матеріалу (або елементарного об'єму матеріалу) у формі необмеженої пластини рівняння (7) набуває вигляду:

$$\frac{\partial C}{\partial \tau} = D \nabla^2 C + q_m; \quad (8)$$

де, $q_m = \varepsilon' \frac{P \cdot \rho_0}{r \cdot \left(\frac{m \cdot c}{c_w \cdot Ko'} + m_0 \cdot \varepsilon' \right)}$ – інтенсивність утворення парової фази.

Як показано в роботах [10] при інтенсивному нагріві тіла виникає бародифузійний ефект «видавлювання» рідкої фази з капілярів, який в роботах [3,4] враховується термомеханічним коефіцієнтом χ .

Величина термомеханічного коефіцієнта зв'язана з коефіцієнтом фазового перетворення співвідношенням [10]:

$$\varepsilon' = (1 - \chi) \cdot \varepsilon; \quad \chi = 1 - \frac{T^*}{Ko \cdot U^*}; \quad T^* = \frac{\theta - \theta_0}{t_p - \theta_0}; \quad U^* = \frac{U_0 - U}{U_0 - U_p}. \quad (9)$$

Отримане рівняння (8) за своєю структурою ідентичне диференціальному рівнянню теплопровідності необмеженої пластини з внутрішнім джерелом безпереводіючих тепловиділень, і за граничних умов I-III роду з відомим розв'язком [11].

Граничні умови при екстракції твердого тіла в рідкому екстрагенті прийнято [2] задавати для конвективного масообміну, тобто III роду:

$$-D \cdot \left(\frac{\partial C}{\partial x} \right) + \beta(C - C_p) = 0; \quad (10)$$

де β – коефіцієнт масообміну, C_p – концентрація екстрагуємої речовини в розчині.

Розв'язок рівняння (8) при граничних умовах (10) і початкових умовах:

$\tau = 0; C = C_0; \frac{\partial C}{\partial x} = 0$ можна записати за аналогією з [11] у вигляді:

$$\frac{C(x, \tau) - C_p}{C_0 - C_p} = \frac{1}{2} + \frac{Po_m}{2} \left(1 - \frac{x^2}{R^2} + \frac{2}{Bi_m} \right) - \sum_{n=1}^{\infty} \left(1 + \frac{Po_m}{\mu_n^2} \right) A_n \cdot \cos \left(\mu_n \frac{x}{R} \right) \cdot \exp(-\mu_n^2 Fo_m); \quad (11)$$

де, $Po_m = \frac{a_m \cdot R^2}{D(C_0 - C_p)}$ – критерій Померанцева масообмінний (дифузійний);

$Fo_m = \frac{D}{R^2} \tau$ – критерій Фур'є масообмінний; $2R$ – товщина пластини; $Bi_m = \frac{\beta}{D} R$ –

критерій Біо масообмінний.

Рівняння (11) описує розподіл концентрації за товщиною пластини в будь-який момент часу.

Зміна в часі середньої за перерізом частинки концентрації цільового компоненту, що визначає кінетику екстракції отримують з рівняння (11) при

використанні очевидного співвідношення $-\bar{C} = \frac{1}{R} \int_0^R C(x, \tau) dx$.

Інтегруючи отримане рівняння (11) матимемо:

$$\frac{\bar{C}(\tau) - C_p}{C_0 - C_p} = \frac{Po_m}{3} \left(1 + \frac{3}{Bi_m} \right) - \sum_{n=1}^{\infty} \left(1 + \frac{Po_m}{\mu_n^2} \right) \cdot B_n \cdot \exp \left(-\mu_n^2 \frac{D}{R^2} \tau \right). \quad (12)$$

В рівняннях (11) і (12) позначено: $A_n = \frac{2 \cdot \sin \mu_n}{\mu_n + \sin \mu_n \cos \mu_n}$; $B_n = \frac{A_n \cdot \sin \mu_n}{\mu_n}$;

$\mu = Bi_m \operatorname{ctg} \mu$ – корні характеристичного рівняння.

Швидкість екстракції (зміни концентрації речовини в твердому тілі) отримують диференціюванням рівняння (12) за часом, попередньо обмежившись, розглядом одного (першого) члена ряду ($B_n = B_1, \mu_n = \mu_1$):

$$\frac{\bar{C}(\tau) - C_p}{C_0 - C_p} = \frac{Po_m}{3} \left(1 + \frac{3}{Bi_m}\right) - \left(1 + \frac{Po_m}{\mu_n^2}\right) \cdot B_1 \cdot \exp\left(-\mu_1^2 \frac{D}{R^2} \tau\right). \quad (13)$$

Продиференціювавши рівняння (13) за часом матимемо:

$$-\frac{d\bar{C}(\tau)}{d\tau} = (C_0 - C_p) \cdot \mu_1^2 \frac{D}{R^2} \cdot B_1 \cdot \exp\left(-\mu_1^2 \frac{D}{R^2} \tau\right). \quad (14)$$

Виключивши з рівняння (13) і (14) складову $B_1 \Delta C \cdot \exp(-\mu_1^2)$ де $\Delta C = C_0 - C_p$, отримаємо після перетворень:

$$-\frac{d\bar{C}(\tau)}{d\tau} = K_E \cdot (C(\tau) - C_p) + Q_m, \quad (15)$$

де $Q_m = \frac{q_m R^2}{D} \left(1 + \frac{3}{Bi_m}\right)$; $K_E = \mu_1^2 \frac{D}{R^2}$ – коефіцієнт екстракції.

Концентрація речовини в розчині є змінною величиною.

Кінетика масо передачі в процесі екстракції (змінна концентрація розчину в часі), як відомо [11] визначається рівнянням:

$$\frac{dC_p(\tau)}{d\tau} = \beta \cdot F_V \cdot (C(\tau) - C_p(\tau)), \quad (16)$$

де $C(\tau), C_p(\tau)$ – середньооб'ємні значення концентрації цільового компонента в твердому тілі і розчині, $F_V = \frac{F}{V}$ – питома об'ємна поверхня розділу фаз.

Розв'язуючи рівняння (15) і (16) як замкнену систему, за початкових умов: $\tau = 0, C = \bar{C}_0, C_p = \bar{C}_{p0}$ (де \bar{C}_0, \bar{C}_{p0} – значення концентрації на початку процесу) після відповідних перетворень отримаємо рівняння кінетики екстракції: змін в часі середньооб'ємних концентрацій твердої фази і розчину:

$$C(\tau) = C_0 - \frac{K_E}{K} Q_m \tau - \frac{K_E}{K} \left(\frac{Q_m}{K} - \Delta C_0\right) (1 - e^{-K\tau}); \quad (17)$$

$$C_p(\tau) = C_{p0} - \frac{\beta \cdot F_V}{K} Q_m \tau - \frac{\beta \cdot F_V}{K} \left(\frac{Q_m}{K} - \Delta C_0\right) (1 - e^{-K\tau}); \quad (18)$$

де $K = K_E + \beta \cdot F_V$.

В екстракторі безперервної дії концентрація змінюється в робочому об'ємі апарату не тільки в часі, а і за координатою в напрямку руху потоків (вісь OY), що треба враховувати в розрахунках.

Розкривши повні диференціали: $dC = \frac{\partial C}{\partial \tau} d\tau + \frac{\partial C}{\partial y} dy$ і врахувавши, що $\frac{dy}{d\tau} = v$ –

швидкість переміщення, перепишемо рівняння (15) і (16) у вигляді:

$$-\left(\frac{\partial C}{\partial \tau} + v_T \frac{\partial C}{\partial y}\right) = K_E (\bar{C} - C_p) + Q_m; \quad (19)$$

$$\frac{\partial C_p}{\partial \tau} + v_p \frac{\partial C_p}{\partial y} = \beta \cdot F (\bar{C} - C_p) + Q_m; \quad (20)$$

де, v_p, v_T – швидкість переміщення рідкої і твердої фаз.

Розглянемо стаціонарний режим процесу екстракції, коли в кожній точці робочого об'єму камери концентрація речовини в обох фазах (твердої $C(y)$ і рідкої

$C_p(y)$) в часі не змінюється і можна прийняти: $\frac{dC}{d\tau} = \frac{dC_p}{d\tau} = 0$.

Розглянемо стаціонарний (встановлений) режим роботи екстрактора безперервної дії за схемою (рис.1).

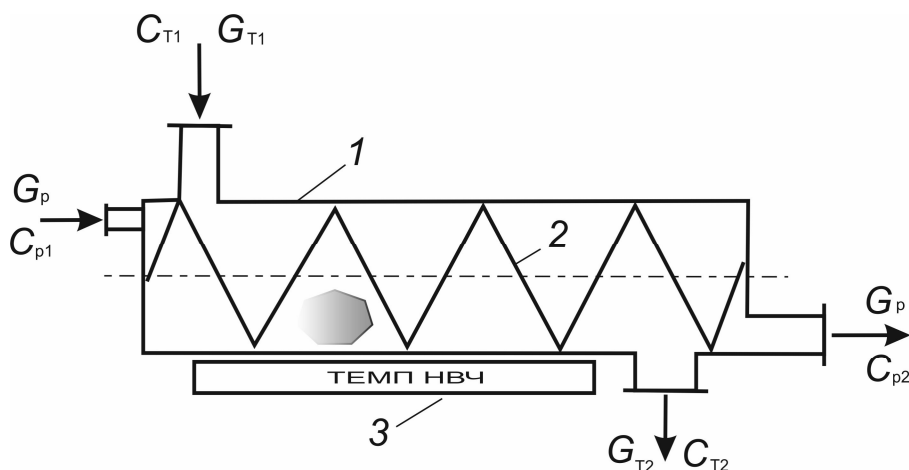


Рис.1. Розрахункова схема проточного екстрактора з мікрохвильовим генератором

(1– корпус; 2 – транспортуючий шнек; 3 – генератор електромагнітного поля надвисокої частоти)

З рівняння (19)-(20) матимемо:

$$-v_T \frac{d\bar{C}}{dy} = K_E (\bar{C} - C_p) + Q_m; \quad (21)$$

$$v_p \frac{d\bar{C}_p}{dy} = \beta F_V (\bar{C} - C_p) + Q_m. \quad (22)$$

Для практичних розрахунків доцільніше використовувати не швидкості руху взаємодіючих фаз, а їх об'ємні витрати. Використовуючи очевидні співвідношення: $G_p = v_p \cdot S_k \cdot \varepsilon$, $G_T = v_T \cdot S_k \cdot (1 - \varepsilon)$ (де площа поперечного перерізу каналу, ε – переріз шару твердого компонента, G_p і G_T – об'ємні витрати твердої і рідкої фаз). Запишемо рівняння у вигляді системи:

$$\begin{cases} -G_T L \frac{d\bar{C}}{dy} = K_E (\bar{C} - C_p) + Q_m; \\ G_p L \frac{d\bar{C}_p}{dy} = \beta F_V (\bar{C} - C_p) + Q_m; \end{cases} \quad (23)$$

де L – довжина каналу робочої зони.

Звівши рівняння системи (23) до одного:

$$A \frac{d^2 C_p}{dy^2} + B \frac{dC_p}{dy} = D, \quad A = T_1 T_2, \quad B = T_1 - T_2, \quad D = b_2 - b_1. \quad (24)$$

$$\text{де, } T_1 = \frac{G_T L}{K_E}; \quad T_2 = \frac{G_p L}{\beta \cdot F}; \quad b_1 = \frac{Q_m}{K_E}; \quad b_2 = \frac{Q_m}{\beta \cdot F}.$$

Ров'язуючи рівняння (24) при граничних умовах:

$$y = 0; \quad C_p = C_{p1}; \quad \frac{dC_p}{dy} = \frac{\beta F}{C_p L} (\bar{C}_1 - C_{p1}), \quad \text{де } \bar{C}_1, C_{p1} - \text{концентрації речовин у твердій}$$

і рідкій фазі на вході в канал. Після перетворень отримаємо:

$$C_p(y) = \frac{b_2 - b_1}{T_1 + T_2} y + \frac{T_1 T_2}{T_1 + T_2} \left[\frac{b_2 - b_1}{T_1 + T_2} - \frac{\beta \cdot F}{G_p L} (\bar{C}_1 - C_{p1}) \right] \exp\left(-\frac{T_1 + T_2}{T_1 \cdot T_2} y\right). \quad (25)$$

Таким чином система рівнянь (17)-(18) описує процес екстракції твердодисперсної сировини при дії джерела електромагнітного поля надвисокої частоти в апаратах періодичної дії. Для конкретизації об'ємів взаємодіючих фаз використовується балансове рівняння у вигляді:

$$V_p dC_p = -V_T d\bar{C}; \quad (26)$$

або після інтегрування матимемо:

$$V_p \cdot (C_{p2} - C_{p1}) = -V_T \cdot (\bar{C}_1 - C_2); \quad (27)$$

де V_p , V_T – об'єми рідкої і твердої фаз, C_1 , C_{p1} , C_2 , C_{p2} – початкові і кінцеві значення концентрацій.

Рівняння (25) описує розподіл концентрації цільового компонента екстрагенту в робочій камері екстрактора. Значення кінцевої концентрації на виході з апарату отримують підстановкою $y=L$. Величина D визначає значення "рівноважної" концентрації цільової речовини в твердій і рідкій фазі яке може бути досягнене за даних параметрів процесу. При цьому $C_{p2} = \bar{C}_2$.

Рівняння (17), (18) і (27) можуть бути використані при ідентифікації параметрів процесу (K_E , βF , Q_m) за даними експериментів використовуючи методику [13].

Висновки і перспективи. Розроблена теоретична математична модель процесу екстракції у електромагнітному полі надвисокої частоти, що дозволяє її використовувати для опису процесів масообміну в твердій і рідкій фазі олієвмісного матеріалу.

Отримані наближені розв'язки наведених теоретичних математичних моделей дозволяють ідентифікувати процеси масопереносу в екстракторах з мікрохвильовим підведенням теплоти для подальшого визначення оптимальних режимів функціонування екстракторів з точки зору енерго-ресурсозбереження і якості кінцевого продукту.

Список літератури

1. Аксельруд Г. А. Экстрагирование. Система: твердое тело – жидкость / Г.А.Аксельруд. – Л.: Химия, 1974. – 256 с.
2. Романков П. Г. Массообменные процессы химической технологии / П. Г. Романков, В. Ф. Фролов. –Л.– Химия, 1990. – 384с.
3. Бурдо О. Г. Нанопищевые энерготехнологии / О. Г.Бурдо. – Херсон: Издательство Гринь Д.С, 2013. – 304 с.
4. Бурдо О. Г. Экстрагирование в системе "кофе-вода" / О. Г. Бурдо. –Одесса: "ТЕС", 2017. – 176 с.
5. Коляновська Л. М. Інтенсифікація процесів екстрагування при виробництві олії з сої та ріпаку. Автореф. дис. канд. техн. наук. – Вінниця, 2014. – 23 с.

6. Бандура В. М. Інтенсифікація екстрагування рослинних олій електромагнітним полем / В. М. Бандура, Л. М. Коляновська // Збірник наукових праць ОНАХТ. – 2011. – Вип.39, т.2. – С.186-190.
7. Бурдо О. Г. Наномасштабные эффекты в пищевых технологиях / О. Г. Бурдо // Инженерно-физический журнал. – 2005. – Т.78. м №1. – С.83-93.
8. Лыков А. В. Тепломассообмен. Справочник / А. В. Лыков. – М.: Энергия, 1972. – 560с.
9. Беляев М. М. Теоретические основы комбинированных способов тепловой обработки пищевых продуктов / М. М. Беляев, П. А. Тахомов. – Харьков: ХИОП, 1991. – 160с.
10. Романовский С. Г. Процессы термической обработки влажных материалов / С. Г. Романовский. – М.: Энергия, 1976. – 328с.
11. Лыков А. В. Теория теплопроводности / А. В. Лыков. – М.: Высшая школа, 1967. – 600с.
12. Аксельруд Г. А. Массообмен в системе “твердое тело-жидкость” / Г. А. Аксельруд. – Львів: вид-во Львівського університету, 1970. – 188с.
13. Калініченко Р. А. Визначення теплофізичних коефіцієнтів в розв'язках рівняння теплопровідності для ідентифікації процесів термообробки зерно матеріалів / Р. А. Калініченко // Науковий вісник НУБіП України. Серія: Техніка та енергетика АПК. – 2016. – Вип. 241. – С. 325-333.

Referenses

1. Aksel'rud, H. A. (1974). Ekstrahirovanye. Systema: tverdoe telo – zhydkost' [Extraction System: solid - liquid]. Leningrad: Chemistry, 256.
2. Romankov, P. H., Frolov, V. F. (2013). Massobmennyye protsessy khymicheskoy tekhnolohyy [Mass transfer processes of chemical technology]. Leningrad: Chemistry, 384.
3. Burdo, O. H. (2013). Nanopyshchevyye enerhotekhnolohyy [Nanopis energy technologies]. Kherson: Publisher Grin D.S., 304.
4. Burdo, O. H. Ekstrahirovanye v systeme “kofe-voda” [Extraction in the system “coffee-water”]. Odessa: “TES”, 176.
5. Kolyanovskaya, L. M. (2014) Intensyfikatsiya protsesiv ekstrahuvannya pry vyrobnytstvi oliyi z soyi ta ripaku [Intensification of extraction processes in the production of soybean and rapeseed oil]. Vinnytsya, 23.
6. Bandura, V. M., Kolyanovskaya, L. M. (2011). Intensyfikatsiya ekstrahuvannya roslynnykh oliy elektromahnitnym polem [Intensification of extraction of vegetable oils by electromagnetic field]. Zbirnyk naukovykh prats' ONAKHT, 39 (2), 186 - 190.
7. Burdo, O. H. (2005). Nanomasshtabnye éffekty v pyshchevykh tekhnolohyyakh [Nanoscale effects in food technology]. Ynzhenerno-fyzycheskyy zhurnal, 78 (1), 83 – 93.
8. Lykov, A.V. (1972) Teplomassooben. Spravochnyk [Heat and mass exchange. Directory]. Moscow: Energy, 560.
9. Belyaev, M. M. Takhomov, P. A. (1991). Teoretycheskiye osnovy kombynyrovannykh sposobov teplovoy obrabotky pyshchevykh produktov [The

theoretical basis of the combined methods of heat treatment of food]. Kharkov:KHUOP, 160.

10. Romanovskyy , S. H. (1976). Protsessy termycheskoy obrabotky vlazhnykh materyalov [Heat treatment processes for wet materials]. Moscow: Energy, 328.

11. Lykov, A. V. (1967). Teoryya teploprovodnosti [Theory of heat conduction]. Moscow : High School, 600.

12. Aksel'rud H. A. (1970). Massoobmen v systeme "tverdoe telo-zhydkost' " [Mass transfer in the system "solid-liquid"]. Lviv: Vyd-vo Lvivskoho universytetu, 188.

13. Kalinichenko, R. A. (2016). Vyznachennya teplofizychnykh koefitsiyentiv v rozvyazkakh rivnyannya teploprovodnosti dlya identyfikatsiyi protsesiv termoobrobky zernomaterialiv [[Definitions thermal index in heat equation solutions for identification of thermal processes grain material](#)]. Naukovyy visnyk NUBiP Ukrayiny. Seriya: Tekhnika ta enerhetyka APK, 241, 325 – 333.

МАТЕМАТИЧЕСКИЕ МОДЕЛИ РЕЖИМОВ ФУНКЦИОНИРОВАНИЯ ЭКСТРАКТОРОВ С МИКРОВОЛНОВЫМ ПОДВОДОМ ТЕПЛОТЫ

В. Н. Бандура, Б. И. Котов, Р. А. Калиниченко

Аннотация. *Экстрагирования ценных компонентов из растительного масличного сырья относится к важным процессам, повышение эффективности которых осуществляет определяющее влияние на технико-экономические показатели перерабатывающей отрасли агропромышленного производства. На современном этапе развития техники и технологии экстрагирования масличного сырья заслуживают признания потенциальные возможности микроволновой технологии: использование электромагнитного поля (ЭМП) сверхвысокой частоты (СВЧ) для интенсификации и повышения эффективности традиционного производства масел и получения продукции с новыми, лучшими потребительскими качествами.*

Статья посвящена теоретическому обоснованию процессов экстрагирования масличного сырья в экстракторе с микроволновым подводом энергии, а именно воздействия ЭМП СВЧ на процессы теплопереноса в жидкой и твердой фазе вещества.

Полученные приближенные решения приведенных теоретических математических моделей позволяют идентифицировать процессы массопереноса в экстракторе с микроволновым подводом теплоты для дальнейшего определения оптимальных режимов функционирования экстракторов с точки зрения энерго- ресурсосбережения и качества конечного продукта.

Ключевые слова: *экстракция, электромагнитное поле, массоперенос, масличный материал*

MATHEMATICAL MODELS OF OPERATING MODES OF EXTRACTORS WITH MICROWAVE HEATING

V. Bandura, B. Kotov, R. Kalinichenko

Abstract. *Extraction of valuable components from vegetable oilseed raw materials is one of the important processes, which increase the effectiveness of which has a decisive influence on the technical and economic indicators of the processing industry of agro-industrial production. At the present stage of development of technology and technology of extraction of oilseed raw materials, the potential possibilities of microwave technology deserve recognition: the use of electromagnetic fields (EMF) of ultra-high frequency (UHF) to intensify and increase the efficiency of traditional oil production and to obtain products with new, better consumer qualities.*

The article is devoted to the theoretical substantiation of the processes of extraction of oilseeds in the extractor with a microwave energy supply, namely the effects of EMF microwave on the processes of heat and mass transfer in the liquid and solid phase of the substance.

The obtained approximate solutions of the above theoretical mathematical models allow us to identify the processes of mass transfer in the extractor with microwave heat supply to further determine the optimal operating modes of the extractors in terms of energy saving and quality of the final product.

Key words: *extraction, electromagnetic field, mass transfer, oilseed material*