

**МОДЕЛЮВАННЯ КОМБІНОВАНИХ ПРОЦЕСІВ ПЕРЕНОСУ.
ОПТИМІЗАЦІЯ ОБЛАДНАННЯ ТА СИСТЕМ**

References

1. Akulich, P.V. (2002), *Termogidrodinamicheskiye protsessy v tekhnike sushki* [Thermohydrodynamic processes in drying technology], NANB Institut teplo- i massoobmena im. A.V. Lykova, Minsk, Belarus.
2. Snezhkin, Yu.F. and Korenchuk, D.N. (2004), "The model of high-temperature drying of peat particles spherical and its experimental verification", *Industrial Heat Engineering*, vol. 26, no. 6, pp. 134 -137.
3. Mushtaev, V.I. and Ulyanov, V.M. (1988), *Sushka dispersnykh materialov* [Drying of disperse materials], Khimiya, Moscow, Russia.
4. Nikitenko, N.I., Snezhkin Yu.F. and Sorokovaya, N.N. (2005), 'Mathematical modeling of heat and mass transfer, phase changes and the shrinkage in order to optimize the drying process of heat-sensitive materials', *Journal of Engineering Physics and thermophysics*, vol. 78, no. 1, pp. 74 -87.
5. Nikitenko, N.I. (2000), "Problems of the theory of radiation heat and mass transfer in solid and liquid media", *Journal of Engineering Physics and thermophysics*, vol. 73, no. 4, pp. 851-839.
6. Nikitenko, N.I. (2002), "Investigation of the dynamics of evaporation of condensed bodies on the basis of spectral intensity particle radiation law", *Journal of Engineering Physics and thermophysics*, vol. 75, no. 3, pp. 128-134.
7. Nikitenko, N.I., Snezhkin Yu.F., Sorokovaya, N.N. and Kolchik Yu.N. (2014), *Molekulyarno-radiatsionnaya teoriya i metody rascheta teplo- i massoobmena* [Molecular Radiation theory and methods of calculation of heat and mass transfer], Naukova dumka, Kyiv, Ukraine.
8. "Investigation of sorption isotherms and desorption", (2015), available at: http://mechtrans.ru/info/issledovanie_izoterm_sorbtsii_i_desorbtsii (Accessed 3 March 2016).
9. Kutateladze S. S. (1979), *Osnovy teorii teploobmena* [Fundamentals of heat transfer theory], Edition 5th revised and enlarged, Atomizdat, Moscow, Russia, available at: http://info.sernam.ru/book_ott.php?id=127 (Accessed 30 March 2016).
10. Nikitenko, N.I. (1983), *Teoriya teplomassoperenosa* [The theory of heat and mass transfer], Naukova dumka, Kyiv, Ukraine.

УДК 664.061.4:084

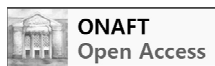
**МАТЕМАТИЧНИЙ ОПИС ГІДРОДИНАМІЧНОЇ СТРУКТУРИ
ПОТОКІВ ПРИ БЕЗПЕРЕРВНОМУ ВІБРОЕКСТРАГУВАННІ НА ОСНОВІ
КОМІРКОВОЇ МОДЕЛІ ІЗ ЗАСТІЙНИМИ ЗОНАМИ
MATHEMATICAL DESCRIPTION OF FLOWS HYDRODYNAMICAL STRUCTURE
AT CONTINUOUS VIBROECSTRACTION BASED ON NETWORK WITH DEAD ZONEZ**

**Мисюра Т.Г., канд. техн. наук, доцент, Зав'ялов В.Л., докт. техн. наук, проф.,
Лобок О.П., канд. фіз.мат. наук, доцент, Бодров В.С., канд. техн. наук, професор,
Попова Н.В., Запорожець Ю.В., канд-ти техн. наук, доценти
Національний університет харчових технологій, м. Київ
Mysiura T.H., Zav'ialov V.L., Lobok O.P., Bodrov V.S., Popova N.V., Zaporozhets Iu.V.
National University of Food Technologies, Kyiv, Ukraine**

Copyright © 2016 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/>



В процесі роботи колонних віброекстракторів безперервної дії під впливом низькочастотних механічних коливань транспортувально-сепарувальних пристроїв (тарілок) в робочому об'ємі апарата утворюється основний двофазовий потік, який можна умовно розбити на ряд послідовно з'єднаних комірок. В таких умовних комірках окрім основного потоку утворюються застійні зони, де затримується частина середовища, зворотні потоки та байпаси (коли частина потоку минає об'єм комірки і відразу попадає на вихід із неї). При такому виникає необхідність визначення характеристик названих гідродинамічних структур, з метою зменшення або повної ліквідації їх негативного впливу на гідродинаміку процесу цілому – способом вибору їх оптимальних співвідношень щодо результируючих ефектів.

Виходячи з аналізу експериментальних та теоретичних досліджень для складання математичного опису

МОДЕЛЮВАННЯ КОМБІНОВАНИХ ПРОЦЕСІВ ПЕРЕНОСУ. ОПТИМІЗАЦІЯ ОБЛАДНАННЯ ТА СИСТЕМ

гідродинамічної структури двофазового потоку в колонному віброекстракторі за основу нами прийнято відомий опис структури комірковій моделі – з послідовними "додаванням – ускладненням" її математичними описами "аномальних" структур застійних зон способом складання та вирішення відповідних рівнянь матеріальних балансів для екстрагенту та твердої фази та для умов протис-прямованого руху тарілок відповідно, вверх і вниз.

Представлені аналітичні дослідження структури гідродинамічних робочих потоків в умовах твердофазового безперервного віброекстрагування з урахуванням щільності зовнішніх джерел накопичення цільового компонента на основі коміркової моделі із застійними зонами. Аналітичні результати можуть бути використані на стадії проектування, конструювання віброекстракційної апаратури та при розв'язанні оптимізаційних задач.

The main two-phase flow, which can be divided into a number of series-connected cells, is formed in the process of operation of a columnar vibration extractor under the continuous exposure to low frequency mechanical vibrations of transport and separation units (plates) in the working volume of the device. Stagnant zones are formed in such conventional cells, where the part of the medium, backflows and bypasses (when the volume of the flow passes the cell and immediately gets on the way out of it) are held. Therefore, it is necessary to determine the characteristics of these hydrodynamic structures in order to reduce or eliminate their negative impact on the hydrodynamics of the process as a whole. This can be done by selecting the best ratio as to their resulting effects.

After the analysis of experimental and theoretical data on mathematical description of hydrodynamic structure of two-phased flow in columnar vibration extractor, we chose the description of the structure of a cell model, that is, with successive "addition – complication", its mathematical descriptions of "abnormal" structures of stagnant zones means of generating and solving the equations of material balances for an extractant and solid phase and for the conditions of the opposing motion of plates up and down.

Presented analytical studies of the structure of hydrodynamic workflows in terms of solid phase extraction continuous vibration considering external sources of accumulation density target component-based model of the collar stagnant zones. Analytical results can be used at the design stage, construction of vibration equipment and extraction in solving optimization problems.

Ключові слова: математична модель, структура потоків, застійна зона, коміркова модель, віброекстрагування, розподілення речовини.

Keywords: mathematical model, flow structure, congestive zone cellular model, vibration extraction, distribution of matter.

Розроблення нової високоефективної екстракційної апаратури на основі використання низькочастотних механічних коливань в певній мірі віддзеркалює один із основних актуальних напрямів удосконалення виробничої бази переробних галузей промисловості. Поряд із загальними закономірностями, що характеризують інтенсивність масообміну в екстракційній апаратурі, суттєву роль відіграє конструктивне оформлення процесу, яке формує певні гідродинамічні особливості його проведення. Тому, для встановлення, обґрунтованого в заданих технологічних межах зв'язку між конструктивними та технологічними параметрами процесу, ефективним методом є застосування аналітичної теорії структури потоку, що визначає хід технологічного процесу в апараті в цілому [1,2].

Для опису гідродинаміки найбільш поширеними моделями структури потоків апаратів є моделі ідеального витіснення та ідеального перемішування. Однак, в реальних умовах потоки фаз ніколи не відповідають повністю ідеалізованому стану, — задача полягає у встановленні реалій гідродинаміки потоків, особливо в апаратах з розвинутою турбулізацією фаз. Основна складність полягає в описі закономірностей структури потоку, створених поширенням нестационарних знакозмінних струменів - імпульсів, генерованих вібруючими перегородками (тарілками) зі струминними елементами. Так, у порожнинах струменевих елементів та в окремих зонах міжтарілочного простору відбуваються складні гідродинамічні явища, що роблять істотний вплив на вихідні характеристики апарата. Зрозуміло, точний облік всіх реальних явищ, супутніх функціонуванню струминного віброперемішувального пристрою, представляє практично нездійсненне завдання. Однак, на підставі експериментальних та аналітичних досліджень можна дати ряд рекомендацій щодо вибору геометричних параметрів елементів тарілок, достатніх для практичного використання.

Аналітичний опис структури потоків розглядався для конструкції пілотного віброекстрактора безперервної дії, показаного на рис. 1. В основі транспортувальної здатності віброекстрактора лежать механізми розділення фаз поперечними вібруючими перегородками, які секціонують віброекстрактор, залишаючи можливість з різним гідравлічним опором проникнення твердої фази через їх живий переріз. Ці ефекти доповнюються механізмами фіксації (накопичення) виділеної твердої фази на поверхні тарілок та в міжтарілочному просторі та її подальшого перенесення в зону дії наступної тарілки [3,4,5].

МОДЕЛЮВАННЯ КОМБІНОВАНИХ ПРОЦЕСІВ ПЕРЕНОСУ. ОПТИМІЗАЦІЯ ОБЛАДНАННЯ ТА СИСТЕМ

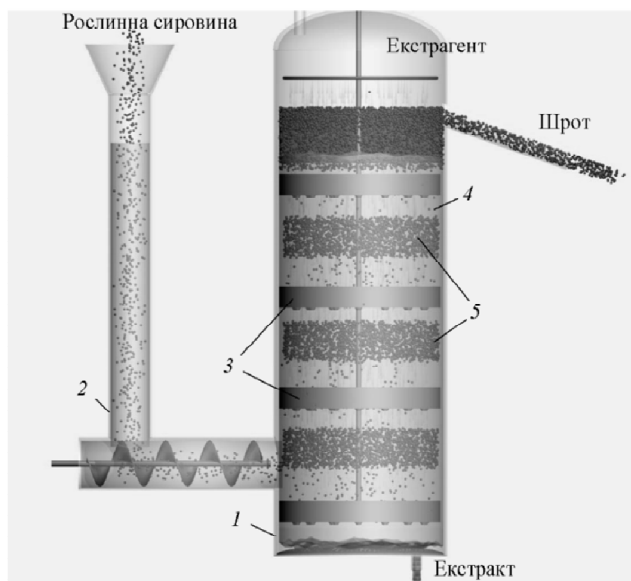


Рис. 1 – Схема утворення рухомих шарів твердої фази у міжтарілковому просторі робочої зони апарата під час протічечного розділення фаз у віброекстракторі безперервної дії. 1 — корпус; 2 — завантажувальний пристрій; 3 — вібротранспортувальна тарілка; 4 — зона псевдозрідження; 5 — рухомий шар твердої фази

дньо була прийнята коміркова модель апарата із застійними зонами. При цьому, оцінка структури потоку передбачає такі припущення: концентрація трасера постійна в даному перетині і її зміна є безперервною функцією координати відстані; коефіцієнт поздовжнього перемішування і об'ємна швидкість потоку не змінюються по довжині й перетину каналу.

Під час роботи апарата загальний робочий потік умовно поділено на ряд послідовно з'єднаних комірок. Припустимо, що в цих умовних комірках утворюються застійні зони, в яких затримується частина середовища, зворотні потоки та байпаси (коли частина потоку мінає об'єм комірки і відразу попадає на вихід із неї). При такому виникає необхідність визначення характеристик названих гідродинамічних структур, з метою їх зменшення або повної ліквідації, способом вибору оптимальних значень характеристик, які впливають на гідродинаміку процесу.

Розміри застійних зон, зворотних та байпасних потоків визначаються складанням та вирішенням відповідних рівнянь матеріальних балансів для екстрагенту та твердої фази.

В загальному випадку основні рівняння коміркової моделі з застійними зонами (для i -тої комірки) за рідкою фазою (рис. 2) мають вигляд:

$$\begin{cases} V_{1,i} \cdot \frac{dC_{1,1,i}}{d\tau} = Q_i \cdot C_{1,1,i-1} - Q_i \cdot C_{1,1,i} + \tilde{Q}_i \cdot C_{1,2,i} - \tilde{Q}_i \cdot C_{1,1,i}, \\ V_{2,i} \cdot \frac{dC_{1,2,i}}{d\tau} = \tilde{Q}_i \cdot C_{1,1,i} - \tilde{Q}_i \cdot C_{1,2,i} \end{cases} \quad (1)$$

де $0 \leq \tau \leq T$ — поточний час перебування індикатора рідкої фази в комірці, с; $V_{1,i}$, $V_{2,i}$ — об'єм, відповідно, проточної і застійної зони i -тої комірки, м³; $C_{1,1,i}$, $C_{1,2,i}$ — концентрація індикатора, відповідно, в проточній і застійній зоні i -тої комірки, кг/м³; $\tilde{Q}_i$ — об'ємна швидкість потоку в напрямку застійної зони і назад, м³/с.

$$\tilde{Q}_i = \beta_{1,i} \cdot Q_i \quad (2)$$

де $0 \leq \beta_{1,i} \leq 1$ — частка об'ємних витрат основного потоку, якою обмінюються проточна та застійні зони робочого об'єму апарата.

У реальних умовах частка надлишку осаду, зафіксованого на тарілці та у міжтарілковому просторі може гіпотетично розглядатись як така, що протягом певного проміжку часу знаходиться у застійній зоні. Тобто, встановлені в отворах живого перерізу перегородки насадки з різним гідравлічним опором у протилежних напрямках руху створюють різну рушійну силу фільтрування і, як результат, — більше нагромадження осаду твердої фази на одному з боків фільтрувального елемента перегородки, що призводить до транспортування твердої фази по висоті апарата.

Утворений шар твердої фази у міжтарілковому просторі переміщується завдяки постійному наміванню нових шарів на периферії зон локалізації пульсуючих струменів (рис.1). Такі шари стають елементами «природного» секціонування робочої зони апарата (зони витіснення), що у свою чергу суттєво знижує загальне поздовжнє перемішування в апараті.

Так, пульсуючі струмені формують псевдозріджений стан системи в зонах коливання тарілки в залежності від параметрів коливань: дальність розповсюдження струменів — формує структуру гідродинамічних потоків (рівень поздовжнього перемішування), ступінь їх турбулізації в зоні кожної тарілки, створює різні умови взаємодії фаз - молекулярну, конвективну і турбулентну дифузії.

На першому етапі аналітичних досліджень попере-

**МОДЕЛЮВАННЯ КОМБІНОВАНИХ ПРОЦЕСІВ ПЕРЕНОСУ.
ОПТИМІЗАЦІЯ ОБЛАДНАННЯ ТА СИСТЕМ**

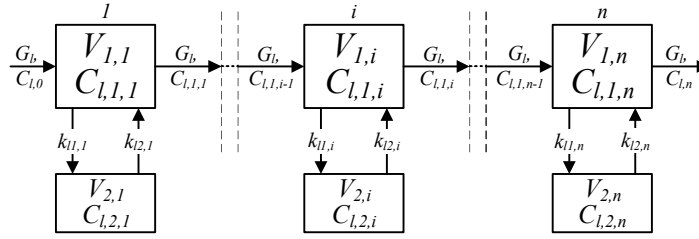


Рис.2 – Параметрична схема до розрахунку коміркової моделі із застійними зонами за рідкою фазою

Об'єм апарата:

$$V = \sum_{i=1}^n V_i, \quad V_i = V_{1,i} + V_{2,i}. \quad (3)$$

Час перебування частинок в апараті

$$T = \frac{\sum_{i=1}^n V_i}{Q_l} = \frac{V}{Q_l}, \quad 0 \leq \tau \leq T, \quad 0 \leq \frac{\tau}{T} \leq 1; \quad \frac{\tau}{T} = \theta; \quad 0 \leq \theta \leq 1, \quad (4)$$

де τ — поточний час процесу, с; θ — безрозмірна величина часу.

Для безрозмірювання системи (1) розділимо її на $V_{\text{інд.}} + \bar{V}_{\text{інд.}}$ і помножимо на T :

$$\begin{cases} \frac{V_{1,i} \cdot T}{V_{\text{інд.}} + \bar{V}_{\text{інд.}}} \cdot \frac{dC_{l,1,i}}{d\tau} = \frac{T \cdot Q_l}{V_{\text{інд.}} + \bar{V}_{\text{інд.}}} \cdot C_{l,1,i-1} - \frac{T \cdot Q_l}{V_{\text{інд.}} + \bar{V}_{\text{інд.}}} \cdot C_{l,1,i} + \\ + \frac{T \cdot \tilde{Q}_l}{V_{\text{інд.}} + \bar{V}_{\text{інд.}}} \cdot C_{l,2,i} - \frac{T \cdot \tilde{Q}_l}{V_{\text{інд.}} + \bar{V}_{\text{інд.}}} \cdot C_{l,1,i}; \\ \frac{V_{2,i} \cdot T}{V_{\text{інд.}} + \bar{V}_{\text{інд.}}} \cdot \frac{dC_{l,2,i}}{d\tau} = \frac{T \cdot \tilde{Q}_l}{V_{\text{інд.}} + \bar{V}_{\text{інд.}}} \cdot C_{l,1,i} - \frac{T \cdot \tilde{Q}_l}{V_{\text{інд.}} + \bar{V}_{\text{інд.}}} \cdot C_{l,2,i}, \end{cases} \quad (5)$$

де $V_{\text{інд.}}$ — кількість імпульсно введеного індикатора, кг; $\bar{V}_{\text{інд.}}$ — кількість ступінчасто введеного індикатора, кг.

Зробимо заміну

$$x_{1,i} = \frac{V_{1,i}}{V_{\text{інд.}} + \bar{V}_{\text{інд.}}} \cdot C_{l,1,i}, \quad x_{2,i} = \frac{V_{2,i}}{V_{\text{інд.}} + \bar{V}_{\text{інд.}}} \cdot C_{l,2,i}. \quad (6)$$

Після підстановки (6) в (5), отримуємо:

$$\frac{dx_{1,i}}{d\theta} = \frac{V}{V_{1,i}} \cdot x_{1,i-1} - \frac{V}{V_{1,i}} \cdot x_{1,i} + \beta_{l,i} \cdot \frac{V}{V_{2,i}} \cdot x_{2,i} - \beta_{l,i} \cdot \frac{V}{V_{1,i}} \cdot x_{1,i}. \quad (7)$$

Для другого рівняння:

$$\frac{dx_{2,i}}{d\theta} = \beta_{l,i} \cdot \frac{V}{V_{1,i}} \cdot x_{1,i} - \beta_{l,i} \cdot \frac{V}{V_{2,i}} \cdot x_{2,i}. \quad (8)$$

Зробивши заміну

$$\mu_i = \frac{V_i}{V}, \quad V_{1,i} = \alpha_i \cdot V_i, \quad V_{2,i} = (1 - \alpha_i) \cdot V_i, \quad 0 < \alpha_i \leq 1$$

отримуємо:

$$\begin{cases} \frac{dx_{1,i}}{d\theta} = \frac{1}{\alpha_i \cdot \mu_i} \cdot x_{1,i-1} - \frac{1 + \beta_{l,i}}{\alpha_i \cdot \mu_i} \cdot x_{1,i} + \frac{\beta_{l,i}}{\alpha_i \cdot \mu_i} \cdot x_{2,i} \\ \frac{dx_{2,i}}{d\theta} = \frac{\beta_{l,i}}{\mu_i \cdot (1 - \alpha_i)} \cdot x_{1,i} - \frac{\beta_{l,i}}{\mu_i \cdot (1 - \alpha_i)} \cdot x_{2,i} \end{cases} \quad (9)$$

$$\text{Обезрозмірюємо початкові умови } x_{1,1}(0) = \frac{1}{\alpha_i}, \quad x_{1,i}(0) = 0, \quad x_{2,i}(0) = 0, \quad i = 2, \dots, n. \quad (10)$$

$$\text{Позначимо } p_i = \frac{1}{\alpha_i \cdot \mu_i}, \quad a_i = -\frac{1 + \beta_{l,i}}{\alpha_i \cdot \mu_i}, \quad b_i = \frac{\beta_{l,i}}{\alpha_i \cdot \mu_i}, \quad c_i = \frac{\beta_{l,i}}{\mu_i \cdot (1 - \alpha_i)}, \quad d_i = -\frac{\beta_{l,i}}{\mu_i \cdot (1 - \alpha_i)}. \quad (11)$$

Тоді система (9) набуває вигляду:

**МОДЕЛЮВАННЯ КОМБІНОВАНИХ ПРОЦЕСІВ ПЕРЕНОСУ.
ОПТИМІЗАЦІЯ ОБЛАДНАННЯ ТА СИСТЕМ**

$$\begin{cases} \frac{dx_{1,i}}{d\theta} = P_i \cdot x_{1,i-1} + a_i \cdot x_{1,i} + b_i \cdot x_{2,i}; \\ \frac{dx_{2,i}}{d\theta} = c_i \cdot x_{1,i} + d_i \cdot x_{2,i}. \end{cases} \quad (12)$$

Представивши рівняння (12) у векторній формі, матимемо:

$$A = \begin{bmatrix} a_1 & b_1 & p_1 & 0 & 0 & 0 & \dots & 0 \\ c_1 & d_1 & 0 & 0 & 0 & 0 & \dots & 0 \\ 0 & a_2 & b_2 & p_2 & 0 & 0 & \dots & 0 \\ 0 & c_2 & d_2 & 0 & 0 & 0 & \dots & 0 \\ 0 & 0 & a_3 & b_3 & p_3 & 0 & \dots & 0 \\ 0 & 0 & c_3 & d_3 & 0 & 0 & \dots & 0 \\ 0 & 0 & 0 & a_4 & b_4 & \dots & \dots & 0 \\ 0 & 0 & 0 & c_4 & d_4 & \dots & \dots & 0 \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & p_{n-1} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & \dots & a_n & b_n & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & \dots & c_n & d_n & 0 \end{bmatrix}, \quad z = \begin{bmatrix} z_{11} \\ z_{21} \\ z_{12} \\ z_{22} \\ z_{13} \\ z_{23} \\ z_{14} \\ z_{24} \\ \dots \\ z_{1n} \\ z_{2n} \end{bmatrix}. \quad (13)$$

Таким чином, маємо

$$\begin{cases} \frac{dz}{d\theta} = A \cdot z + f; \\ z(0) = z^0. \end{cases} \quad (14)$$

$$z^0 = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ \dots \\ \dots \\ \frac{V_{\text{інд.}}}{\alpha_n \cdot (V_{\text{інд.}} + \bar{V}_{\text{інд.}})} \\ 0 \end{bmatrix}, \quad f = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ \dots \\ \dots \\ \frac{\bar{V}_{\text{інд.}}}{(V_{\text{інд.}} + \bar{V}_{\text{інд.}}) \cdot \mu_n \cdot \alpha_n^2} \\ 0 \end{bmatrix}. \quad (15)$$

Якщо, $Q_{l,i} = \begin{vmatrix} a_i & b_i \\ c_i & d_i \end{vmatrix}$, $P_{l,i} = \begin{vmatrix} p_{l,i} & 0 \\ 0 & 0 \end{vmatrix}$, то матриця A (13) перетворюється в наступний вигляд:

$$A = \begin{bmatrix} Q_{l,1} & P_{l,1} & 0 & 0 & \dots & 0 \\ 0 & Q_{l,2} & P_{l,2} & 0 & \dots & 0 \\ 0 & 0 & Q_{l,3} & P_{l,3} & \dots & 0 \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & Q_{l,n} \end{bmatrix}. \quad (16)$$

В загальному випадку основні рівняння коміркової моделі з застійними зонами (для i -тої комірки) за твердою фазою (рис. 3) мають вигляд:

$$\begin{cases} V_{1,i} \cdot \frac{dC_{c,1,i}}{d\tau} = Q_c \cdot C_{c,1,i+1} - Q_c \cdot C_{c,1,i} + \tilde{Q}_{c,i} \cdot C_{c,2,i} - \tilde{Q}_{c,i} \cdot C_{c,1,i}; \\ V_{2,i} \cdot \frac{dC_{c,2,i}}{d\tau} = \tilde{Q}_{c,i} \cdot C_{c,1,i} - \tilde{Q}_{c,i} \cdot C_{c,2,i}, \end{cases} \quad (17)$$

МОДЕЛЮВАННЯ КОМБІНОВАНИХ ПРОЦЕСІВ ПЕРЕНОСУ. ОПТИМІЗАЦІЯ ОБЛАДНАННЯ ТА СИСТЕМ

де $0 \leq \tau \leq T$ — поточний час перебування трасера твердої фази в комірці, с; $V_{1,i}$, $V_{2,i}$ — об'єм, відповідно, проточної і застійної зони i -тої комірки, м³; $C_{c,1,i}$, $C_{c,2,i}$ — концентрація трасера, відповідно, в проточній і застійній зоні i -тої комірки, кг/м³; $\tilde{Q}_c$ — об'ємна швидкість потоку в напрямку застійної зони і назад, м³/с.

$$\tilde{Q}_{c,i} = \beta_{c,i} \cdot Q_c; \quad (18)$$

де $0 \leq \beta_{c,i} \leq 1$ — частка об'ємних витрат основного потоку, якою обмінюються проточна та застійні зони робочого об'єму апарата.

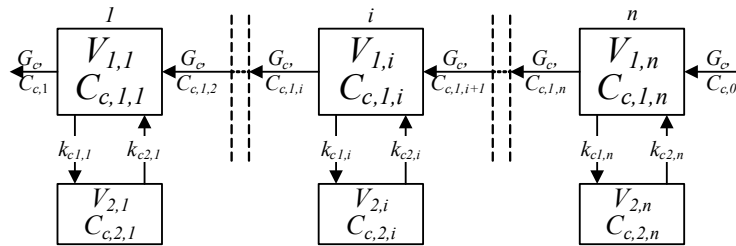


Рис. 3 – Параметрична схема до розрахунку коміркової моделі із застійними зонами за твердою фазою

Аналогічно, використовуючи викладену вище методику, отримаємо кінцеву матрицю до розрахунку моделі із застійними зонами за твердою фазою

$$A = \begin{bmatrix} Q_{c,1} & P_{c,1} & 0 & 0 & \dots & 0 \\ 0 & Q_{c,2} & P_{c,2} & 0 & \dots & 0 \\ 0 & 0 & Q_{c,3} & P_{c,3} & \dots & 0 \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & Q_{c,n} \end{bmatrix}. \quad (19)$$

Для ідентифікації та оптимізації отриманих значень параметрів математичних моделей (16) та (19) була розроблена програма розрахунку в пакеті MATLAB (рис. 5). Також для спрощеного введення початкових параметрів та для наочного зображення результатів розрахунків було створено віртуальний тренажер, головне вікно якого зображено на рис. 5, а вікно налаштувань – на рис. 6.

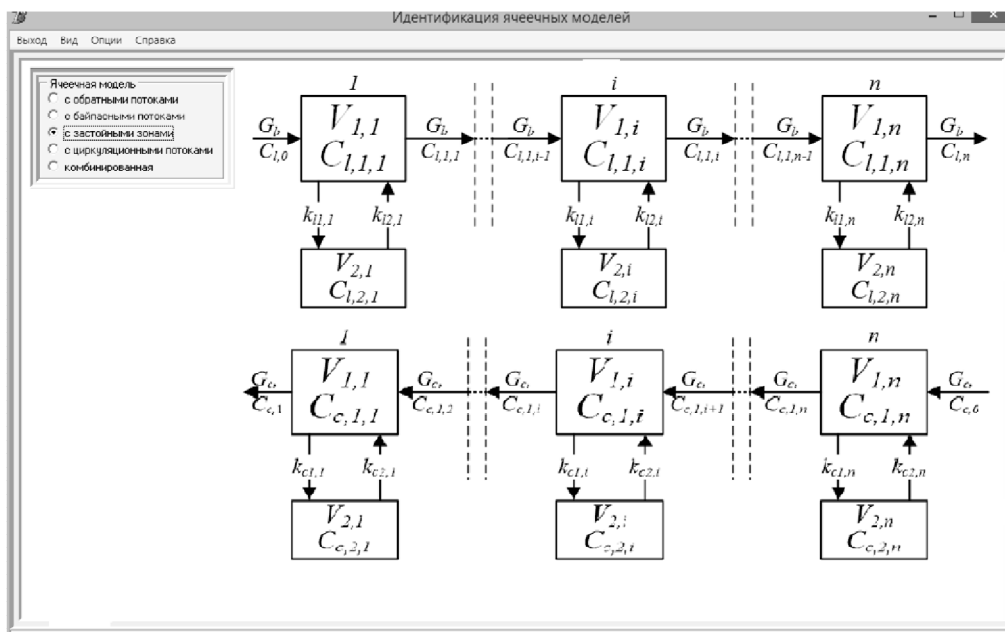


Рис. 5 – Загальний вигляд головного вікна віртуального тренажера

МОДЕЛЮВАННЯ КОМБІНОВАНИХ ПРОЦЕСІВ ПЕРЕНОСУ. ОПТИМІЗАЦІЯ ОБЛАДНАННЯ ТА СИСТЕМ

Ячеечная модель с застойными зонами

Идентификация неизвестных параметров ячейочной модели с застойными зонами

Фаза: ☒ жидкая ☐ твердая Объемная скорость основного потока: 0.0016 Количество ячеек: 2 **для жидкой фазы**

Измерения концентрации трассера

в ячейках: ☒ 1-я ячейка ☐ 2-я ячейка

в моменты времени:

№	Время	C1
1	5	20
2	10	15
3	20	12
4	30	10
5	40	8
6	50	5
7	60	3

Время:

Флажкими отмечаются ячейки, в которых производятся измерения концентрации трассера C1

Характеристика и режим ввода трассера

Ввод трассера: ☒ импульсный ☐ ступенчатый ☐ смешанный

Количество трассера: импульсного: 0.5 ступенчатого: 0.5

Время ввода трассера: начальное: 0 конечное: 0.5

Сохранить результаты в файле: E:\Cells\Results\vest.rtf3

Ограничения на параметры Alfa(i)

Alfa(i)	нижнее	верхнее	приближен
1	0.001	1	0.5
2	0.001	1	0.5

В этой таблице задаются нижние и верхние ограничения, а также начальные приближения для идентифицируемых параметров Alfa(i) - доля объема проточной зоны ячейки от всего объема н-й ячейки

Ограничения на параметры Beta(i)

Beta(i)	нижнее	верхнее	приближен
1	0	1	0.5
2	0	1	0.5

В этой таблице задаются нижние и верхние ограничения, а также начальные приближения для идентифицируемых параметров Beta(i) - доля потока из проточной зоны в застойную и обратно для n-й ячейки

Объемы ячеек:

№	Объем
1	0.02
2	0.02

Аппарат условно разбивается на ячейки, объемы которых задаются в этой таблице

Данные:

Рис. 6 – Вікно налаштувань та введення вхідних даних віртуального тренажера

Створена за відповідним алгоритмом програма розрахунків реалізована за допомогою пакета MatLAB і дозволяє визначити розподіл концентрацій екстрактивної речовини за проточними і застійними зонами окремо по кожній фазі в часі, а також у кожній комірці. На рис. 7, 8 і 9 як приклад зображено результати даної програми.

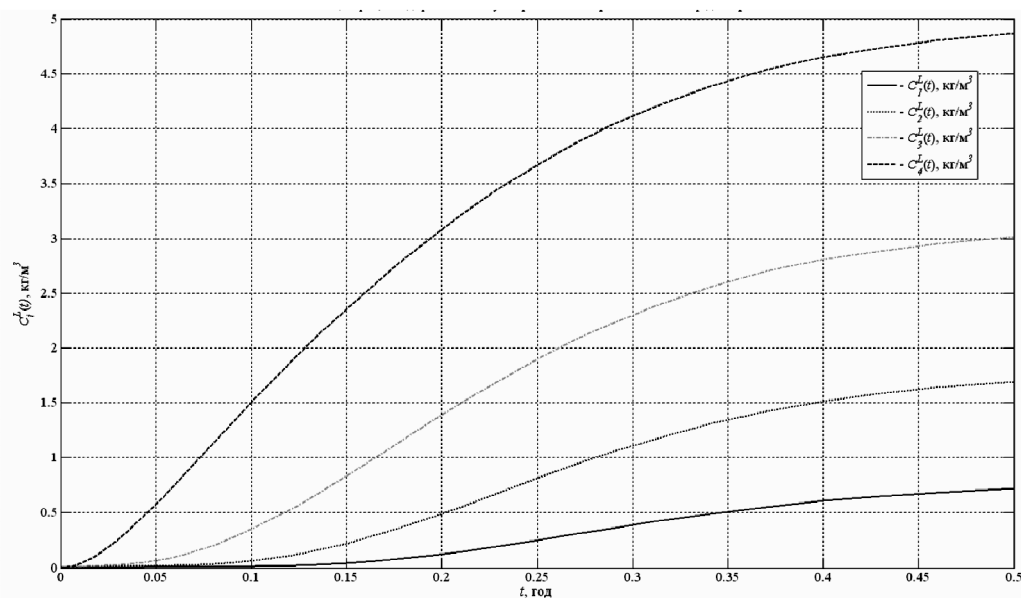


Рис. 3 – Вміст екстрактивних речовин в проточних зонах рідкої фази

МОДЕЛЮВАННЯ КОМБІНОВАНИХ ПРОЦЕСІВ ПЕРЕНОСУ. ОПТИМІЗАЦІЯ ОБЛАДНАННЯ ТА СИСТЕМ

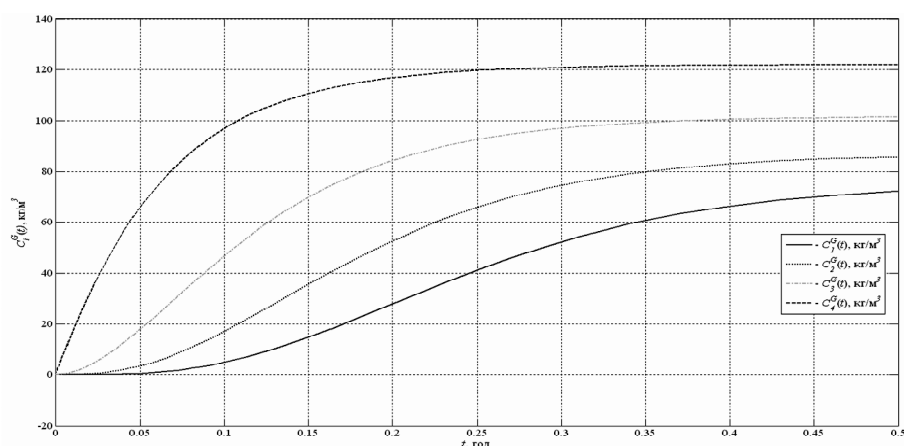


Рис. 4 – Вміст екстрактивних речовин в проточних зонах твердої фази

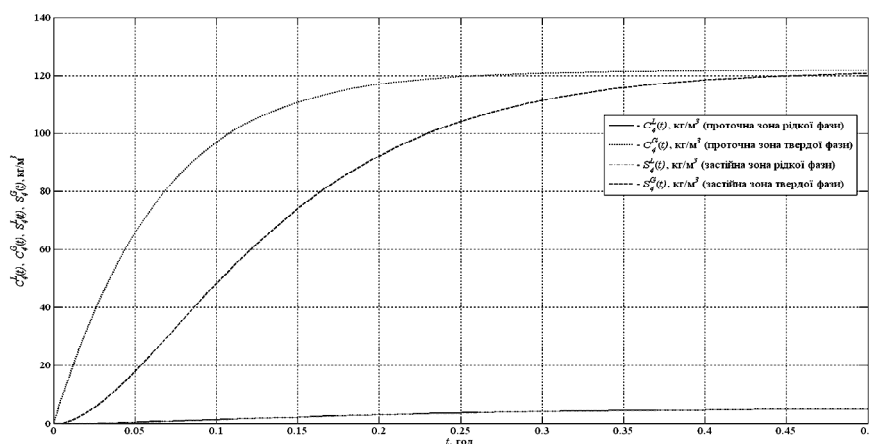


Рис. 5 – Вміст екстрактивних речовин в n -ій комірці

Висновки. В результаті аналітичних досліджень структури гідродинамічних робочих потоків в умовах твердофазного неперервного віброекстрагування з урахуванням щільності зовнішніх джерел накопичення цільового компонента на основі коміркової моделі із застійними зонами, отримано відповідні математичні моделі, які можуть бути використані на стадії проектування, конструювання віброекстракційної апаратури колонного типу та при розв'язанні оптимізаційних задач.

Література

1. Городецкий И.Я. Вибрационные массообменные аппараты / И.Я. Городецкий, А.А. Васин, В.М. Олевский, П.А. Лупанов / под ред. В.М. Олевского, — М.: Химия, 1980. — 192 с.
2. Vladimir Zavialov. Development of mathematical models of external mass exchange under conditions of vibroextraction from vegetable raw materials. / Vladimir Zavialov, Viktor Bodrov, Taras Misyura, Nataliya Popova, Yuliya Zaporozhets Vadim Dekanskiy — Chemistry & Chemical Technology, 2015, 9(3), 367-374.
3. Пат. винах. 86485 Україна, МІЖ В 01 D 11/02. Вібраційний екстрактор / Зав'ялов В.Л., Запорожець Ю.В., Бодров В.С.; заявник та патентовласник Національний університет харчових технологій. — № a200707563; заявл. 05.07.07; опубл. 27.04.09, Бюл. №8.
4. Зав'ялов В.Л. Математичне моделювання структури потоків в віброекстракторах безперервної дії колонного типу з віброуючою системою розділення фаз / Зав'ялов В.Л., Лобок О.П., Мисюра Т.Г., Запорожець Ю.В., Попова Н.В., Бодров В.С. — Одеса: Наукові праці ОНАХТ. — № 43. Том 2., 2013. — с. 26-29.
5. Зав'ялов В.Л. Закономірності дії пульсуючих потоків в умовах протитечісного розділення фаз при віброекстрагуванні із рослинної сировини. / Зав'ялов В.Л., Мисюра Т.Г., Бодров В.С., Запорожець Ю.В., Попова Н.В., Деканський В.С. — Будапешт: Science and Education a New Dimension. Natural and Technical Sciences — III (5), Issue:41. — 2015. — С. 95—99.

References

1. Gorodeckij, I.YA., Vasin, A.A., Olevskij, V.M., Lupanov, P.A. (1980), *Vibracionnye massoobmennye apparaty* [Vibration mass-transfer apparatuses], in Olevskij, V.M. (ed.), Himiya, Moscow, USSR

**МОДЕЛЮВАННЯ КОМБІНОВАНИХ ПРОЦЕСІВ ПЕРЕНОСУ.
ОПТИМІЗАЦІЯ ОБЛАДНАННЯ ТА СИСТЕМ**

2. Zavialov, V., Bodrov, V., Misyura, T., Popova, N., Zaporozhets, Y., Dekanskiy, V. (2015), Development of mathematical models of external mass exchange under conditions of vibroextraction from vegetable raw materials. *Chemistry & Chemical Technology*, 9(3), pp. 367-374.
3. Zav'yalov, V.L., Zaporozhecz', Yu.V., Bodrov, V.S., National University of Food Technologies (2009), *Vibracijnyj ekstraktor* [Vibration extractor] State Register of Patents of Ukraine, Kiev, UA, Pat. no. 86485
4. Zav'yalov, V.L., Lobok, O.P., My'syura, T.G., Zaporozhecz', Yu.V., Popova, N.V., Bodrov, V.S. (2013), "Mathematic modeling of flow structure in continuous action vibroextractors of column type with vibrating phase separation", *Naukovi praci ONAXT*, no. 43., Vol. 2., pp. 26-29.
5. Зав'ялов, В.Л., Мисюра, Т.Г., Бодров, В.С., Запорожець, Ю.В., Попова, Н.В., Деканський, В.С. (2015), "Regularities of pulsing flows action in conditions of counterflow phase separation in vibroextraction of vegetable materials", *Science and Education a New Dimension. Natural and Technical Sciences*, III (5), Issue.41, pp. 95—99.

УДК 641.5

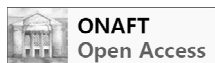
**СИСТЕМНО-ДИНАМІЧНЕ МОДЕЛЮВАННЯ ПРОЦЕСУ ІНФРАЧЕРВОНОГО
ЖАРЕННЯ БІФШТЕКСІВ
SYSTEM-DYNAMIC PROCESS MODELING
OF INFRARED STEAKS FRYING**

Потапов В.О., д-р техн. наук, професор, Костенко С.М.
Харківський державний університет харчування та торгівлі, м. Харків
Potapov V.O., Kostenko S.M.
Kharkiv State University of Food Technology and Trade, Kharkiv, Ukraine

Copyright © 2016 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/>



У роботі проведено імітаційне моделювання процесу інфрачервоного жарення біфштексів за використання програмного комплексу *Vensim*, що реалізує системно-динамічну технологію потокового типу. Використання системно-динамічного моделювання уможливорює повну та якісну оцінку впливу таких факторів, як коефіцієнт відбивача, потужність апарату, ціна електроенергії, на характер та значення вихідної функції, тобто реалізацію біфштексу, а також вартість витраченої електроенергії. В імітаційній моделі досліджувався вплив наявності відбивача променевого потоку в апараті інфрачервоного жарення на вихід продукту та витрати електроенергії. Профіль рефлектора забезпечує рівномірне опромінення приймача опуклого перерізу, тобто біфштексу. Використання в апараті відбивача променевого потоку призводить до збільшення виходу продукту на 20 %, скорочення терміну жарення на 40 %, скорочення вартості електроенергії на 35 %. Використання спрофільованих відбивачів, які забезпечують рівномірне опромінювання опуклого теплоприймача, покращує органолептичні властивості продукції та підвищує енергоефективність інфрачервоного обладнання харчових виробництв. Експериментування з імітаційними моделями процесів теплової обробки надає системне підґрунтя для інтенсифікації та оптимізації процесів та обладнання харчових виробництв.

Simulation process modeling of infrared steaks frying using the software package *Vensim*, that implements the system-dynamic technology of streaming type, is carried out in the work. The use of system-dynamic modeling makes it possible to complete and qualitative assessment of the impact of factors such as reflector coefficient, power unit, electricity price, to the nature and value of the output function, i.e. the realization of steak, and the cost of electricity consumed. The effect of the presence of a radiant flux reflector in the infrared frying apparatus on the product yield and the cost of electricity was investigated in the simulation model. The profile of the reflector ensures a uniform irradiation of the receiver's convex cross section, i.e. steak. The use in the apparatus of the radiant flux reflector causes to an increase in the product yield of 20 %, reduction in the cooking period 40 %, reduction in the cost of electricity by 35 %. Exploitation by profiled reflectors that provide uniform irradiation of the convex heat receiver improves the organoleptic characteristics of the product and increases energy efficiency of infrared food production equipment. Experimentation with simulation models of thermal processing provides a systemic basis for intensification and optimization of processes and equipment for food production.