
УДК 664.061.4:084

**МОДЕЛЮВАННЯ ГІДРОДИНАМІЧНОЇ СТРУКТУРИ ПОТОКІВ ПРИ
БЕЗПЕРЕРВНОМУ ВІБРОЕКСТРАГУВАННІ НА ОСНОВІ КОМПІРЧАСТОЇ
МОДЕЛІ ІЗ ЗВОРОТНИМИ ПОТОКАМИ**

**Мисюра Т. Г., к. т. н., доцент, Зав'ялов В. Л., д. т. н., проф., Лобок О. П., к. фіз.мат. н., доцент,
Попова Н. В., Запорожець Ю. В. к. т. н., доценти
Національний університет харчових технологій**

**MODELING OF THE HYDRODYNAMIC STRUCTURE OF FLOWS UNLIMITED
VEHICLE DISTRIBUTION BASED ON A COMBINED MODEL WITH
RETROSPECTIONS**

**Misyura T. H., Ph.D., Associate Professor, Zavialov V. L., Ph.D., Prof., Lobok O. P., Associate Professor,
Popova N.V., Zaporozhets Y. V Dr., associate professor
National University 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.** Ефективна робота віброекстракційної апаратури передбачає оптимізацію співвідношення між мікро-і макромасштабними параметрами дії турбулентних пульсуючих струменів, що можливо здійснити лише при більш глибокому аналізі їх природи на стадії генерування віброперемішувальними пристроями*

і розповсюдження в робочому об'ємі апарата. Разом з тим, відомі методи розрахунку гідродинамічних, теплових і масообмінних характеристик традиційних екстракторів є непридатними у практичному використанні для віброекстракторів.

В представлених матеріалах зосереджено увагу на математичному описі моделі структури потоків на основі реальної комірчастої моделі із зворотними потоками за результатами випробувань пілотного віброекстрактора безперервної дії колонного типу.

Показано, що в реальних умовах ідеалізовані моделі структури потоків в апаратах з інтенсивним гідродинамічним режимом руху фаз не забезпечують належну точність опису гідродинамічної структури потоків за причиною наявності в робочому об'ємі апарата додаткових гідродинамічних ефектів внаслідок створення віброперемішувальними пристроями нерівномірного профілю швидкостей окремих потоків в поперечному перерізі апарата – поздовжнім перемішуванням. Для встановлення, обґрунтованого в заданих технологічних межах зв'язку між конструктивними та технологічними параметрами процесу, застосовувалась аналітична теорія структури потоку.

Представлені аналітичні дослідження структури гідродинамічних робочих потоків в умовах твердофазового безперервного віброекстрагування з урахуванням щільності зовнішніх джерел накопичення цільового компонента на основі комірчастої моделі із зворотними потоками. Для спрощеного введення початкових параметрів та для наочного зображення результатів розрахунків було створено віртуальний тренажер. Аналітичні результати можуть бути використані на стадії проектування, конструювання віброекстракційної апаратури та при розв'язанні оптимізаційних задач.

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 робочої зони віброекстрактора безперервної дії.

Abstract. Effective operation of the vibroextraction apparatus provides for optimizing the relationship between the micro- and macro-scale parameters of the action of turbulent pulsating jets, which is possible only with a deeper analysis of their nature at the stage of generation by vibro-mixing devices and propagation in the working volume of the apparatus. At the same time, methods for calculating the hydrodynamic, thermal, and mass-exchange characteristics of traditional extractors are currently unsuitable for practical use for vibro-extractors.

The presented materials focus on the mathematical description of the flow pattern model on the basis of a real cell model with backflows based on the results of testing a continuous column-type vibro-extractor.

It is shown that in real conditions idealized models of the flow pattern in devices with an intensive hydrodynamic regime of the phases do not provide the proper accuracy of the description of the hydrodynamic flow structure due to the presence of additional hydrodynamic effects in the working volume of the apparatus due to the creation by vibro-mixing devices of an unequal velocity profile of individual flows in the cross section of the apparatus - Longitudinal mixing. To establish the connection between the design and technological parameters of the process, justified within given technological limits, an analytical theory of the flow structure was used.

Presented analytical studies the structure of hydrodynamic workflows under conditions of two-phase continuous vibroextraction taking into account the density of external sources of accumulation of the target component based on the collar model with backflows. To simplify the input of initial parameters and to visualize the results of calculations, a virtual simulator was created. Analytical results can be used at the design stage, the design of vibroextraction equipment and in solving optimization problems.

The calculation program created by the corresponding algorithm is implemented using the MatLAB package and allows determining the distribution of extractant concentrations with flow and stagnant zones separately for each phase in time, as well as in each cell of the working zone of the continuous vibro-extractor.

Ключові слова: математична модель, структура потоків, зворотний потік, комірчаста модель, віброекстрагування, розподілення речовини.

Keywords: mathematical model, flow structure, returning stream, cellular model, vibration extraction, distribution of matter.

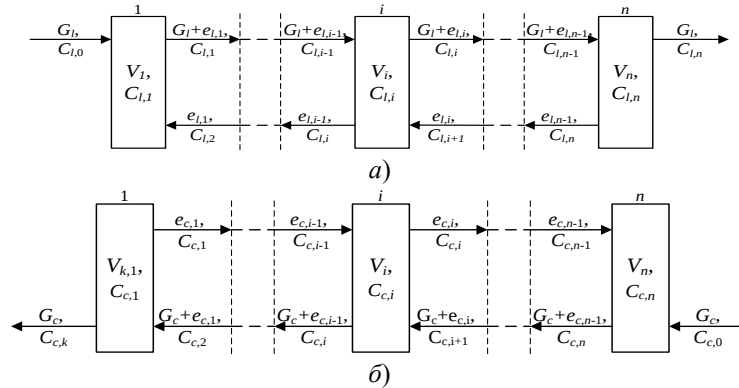
Вступ. Віброекстрактори безперервної дії працюють в режимі зустрічного руху взаємодіючих фаз, використовуючи новий принцип розділення за допомогою спеціальних вібротранспортувальних пристроїв, які не викликають пресування шару сировини та забезпечують його поруватість, незалежно від розміру частинок. При цьому тривалість перебування усіх частинок у робочому об'ємі апарата майже однакова і як наслідок — найбільш повно використовується рушійна сила процесу [1-5].

Разом з тим протитечійний рух фаз в реальних умовах не завжди може бути рівноцінним ідеальній схемі потоку внаслідок створення віброперемішувальними пристроями нерівномірного профілю швидкостей окремих потоків в поперечному перерізі апарата – поздовжнім перемішуванням. Як правило, поздовжнє перемішування значно зростає при переході від лабораторних, пілотних апаратів до промислових зразків. Тому такі ефекти повинні знаходитись в зоні постійної уваги в процесі масштабування апаратів.

Для кількісного оцінювання аномальних гідродинамічних зон в апаратах колонного типу існує ряд моделей структури потоків, раціональний вибір якої надає можливість передбачити оптимальні режимні та конструктивні параметри апарата та забезпечити надійне масштабування процесу на мікро і макрорівні. Аналітичний опис структури потоків розглядався для конструкції пілотної віброекстрактора безперервної дії [6, 7].

Аналітичне моделювання. Враховуючи реалії гідродинамічної обстановки в апараті, створеної пульсуючими струменями, що генеруються транспортувальними елементами вібруючих насадок, в робочому об'ємі апарата нами виконано відповідне моделювання на основі комірчастої моделі із зворотними потоками. Для цього нами проаналізована і узагальнена комірчаста модель із зворотними потоками, для випадків різних розмірів комірок віброекстрактора та різних величин зворотних потоків.

З метою оцінки розмірів зворотних потоків між комірками та інших параметрів, пов'язаних з ними, нами проаналізована комірчаста модель із зворотними потоками, параметрична форма якої для рідкої (рис.1а) та твердої (рис.1б) фази має вигляд.



$0 \leq \tau \leq T$ — поточний час перебування індикатора рідкої фази в комірці, с;

V_i — об'єм i -тої комірки, м^3 ;

$C_{l,i}$, $C_{c,i}$ — концентрація індикатора в рідкій та твердій фазі, $\text{кг}/\text{м}^3$;

$e_{l,i}$, $e_{c,i}$ — об'ємна швидкість зворотного потоку із $(i+1)$ комірки в i -ту та із i -тої в $(i+1)$ -ту комірки, $\text{м}^3/\text{с}$.

Рис.1. Параметрична схема комірчастої моделі із зворотними потоками.

В загальному випадку основні рівняння комірчастої моделі з застійними зонами за рідкою фазою (рис. 1а) мають вигляд:

$$\begin{cases} V_1 \cdot \frac{dC_{l,1}}{d\tau} = Q_l \cdot C_{l,0} + e_{l,1} \cdot C_{l,2} - (Q_l + e_{l,1}) \cdot C_{l,1} \\ V_i \cdot \frac{dC_{l,i}}{d\tau} = (Q_l + e_{l,i-1}) \cdot C_{l,i-1} + e_{l,i} \cdot C_{l,i+1} - (Q_l + e_{l,i} + e_{l,i-1}) \cdot C_{l,i} \\ V_n \cdot \frac{dC_{l,n}}{d\tau} = (Q_l + e_{l,n-1}) \cdot C_{l,n-1} - (Q_l + e_{l,n-1}) \cdot C_{l,n} \end{cases} \quad (1)$$

де $0 \leq \tau \leq 1$ — поточний час перебування індикатора рідкої фази в комірці, с; V_i — об'єм i -тої комірки, м^3 ; $C_{l,i}$ — концентрація індикатора в рідкій фазі в i -тій комірці, $\text{кг}/\text{м}^3$; $e_{l,i}$ — об'ємна швидкість потоку зворотного потоку із i комірки в $(i+1)$ -ту, $\text{м}^3/\text{с}$.

$$e_{l,i} = f_{l,i} \cdot Q_l, \quad (2)$$

де $0 \leq f_{l,i} \leq 1$ — частка об'ємних витрат основного потоку, яка повертається з $(i+1)$ в i -ту комірку.

$$\text{Об'єм апарата та час перебування частинок в апараті: } V = \sum_{i=1}^n V_i, \quad T = \sum_{i=1}^n V_i / Q_l = V / Q_l \quad (3)$$

$$0 \leq \tau \leq T, \quad 0 \leq \tau/\theta \leq 1; \quad \tau/T = \theta; \quad 0 \leq \theta \leq 1$$

де τ — розмірна величина часу, с; θ — безрозмірна величина часу.

Покладемо наступні початкові умови:

$$C_{l,1}(0) = V_{\text{инд}} / V_1, \quad C_{l,0} = \bar{V}_{\text{инд}} / V_1, \quad C_{l,i}(0) = 0, \quad i = 2, \dots, n, \quad e_{l,n} = 0, \quad f_n = 0, \quad e_{l,0} = 0, \quad f_0 = 0 \quad (4)$$

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

Для обезрозмірювання другого рівняння системи (1) домножимо його на $T / (V_{\text{инд}} + \bar{V}_{\text{инд}})$:

$$\frac{V_i \cdot T}{V_{\text{инд}} + \bar{V}_{\text{инд}}} \cdot \frac{dC_{l,i}}{d\tau} = \frac{T \cdot (1 + f_{l,i-1}) \cdot Q_l \cdot V_{i-1}}{(V_{\text{инд}} + \bar{V}_{\text{инд}}) \cdot V_{i-1}} \cdot C_{l,i-1} + \frac{T \cdot f_{l,i} \cdot Q_l \cdot V_{i+1}}{(V_{\text{инд}} + \bar{V}_{\text{инд}}) \cdot V_{i+1}} \cdot C_{l,i+1} - \frac{T \cdot (1 + f_{l,i} + f_{l,i-1}) \cdot Q_l \cdot V_i}{(V_{\text{инд}} + \bar{V}_{\text{инд}}) \cdot V_i} \cdot C_{l,i}; \quad (5)$$

Зробимо заміну $z_i = V_i \cdot T \cdot C_{l,i} / (V_{\text{инд}} + \bar{V}_{\text{инд}});$ (6)

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

$$\frac{dz_i}{d\theta} = \frac{(1 + f_{l,i-1}) \cdot V}{V_{i-1}} \cdot z_{i-1} + \frac{f_{l,i} \cdot V}{V_{i+1}} \cdot z_{i+1} - \frac{(1 + f_{l,i} + f_{l,i-1})}{V_i} \cdot z_i \quad (7)$$

Зробивши заміну $\mu_i = V_i / V$ (8)

отримуємо $\frac{dz_i}{d\theta} = \frac{1 + f_{l,i-1}}{\mu_{i-1}} \cdot z_{i-1} + \frac{f_{l,i}}{\mu_{i+1}} \cdot z_{i+1} - \frac{(1 + f_{l,i-1} + f_{l,i})}{\mu_i} \cdot z_i$ (9)

Обезрозмірюємо початкові умови $z_1(0) = V_i \cdot C_{l,i}(0) / (V_{\text{инд}} + \bar{V}_{\text{инд}}) = V_{\text{инд}} / V_{\text{инд}} + \bar{V}_{\text{инд}},$ (10)

$$z_i(0) = 0, \quad i = 2, \dots, n, \quad (1 + f_0) \cdot z_0 / \mu_0 = \bar{V}_{\text{инд}} / [(V_{\text{инд}} + \bar{V}_{\text{инд}}) \cdot \mu_1] \quad (11)$$

Зробивши заміну $(1 + f_{l,i-1}) / \mu_{i-1} = a_i, \quad f_{l,i} / \mu_{i+1} = c_i, \quad -(1 + f_{l,i-1} + f_{l,i}) / \mu_i = b_i$ (12)

отримуємо: $\frac{dz_i}{d\theta} = a_i \cdot z_{i-1} + b_i \cdot z_i + c_i \cdot z_{i+1}$ (13)

Представивши рівняння (13) у векторній формі, маємо:

$$A = \begin{bmatrix} b_1 & c_1 & 0 & 0 & 0 & 0 & \dots & 0 & 0 \\ a_2 & b_2 & c_2 & 0 & 0 & 0 & \dots & 0 & 0 \\ 0 & a_3 & b_3 & c_3 & 0 & 0 & \dots & 0 & 0 \\ 0 & 0 & a_4 & b_4 & c_4 & 0 & \dots & 0 & 0 \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \dots & b_{n-1} & c_{n-1} \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \dots & a_n & b_n \end{bmatrix}, \quad z = \begin{bmatrix} z_1 \\ z_2 \\ z_3 \\ z_4 \\ \dots \\ z_n \end{bmatrix} \quad (14)$$

Таким чином, маємо систему з вектором невідомих

$$\begin{cases} \frac{dz}{d\theta} = A \cdot z + f; \\ z(0) = z^0, \end{cases} \quad z^0 = \begin{bmatrix} \frac{V_{\text{инд}}}{(V_{\text{инд}} + \bar{V}_{\text{инд}})} \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ \dots \\ 0 \end{bmatrix}, \quad F = \begin{bmatrix} \frac{\bar{V}_{\text{инд}}}{(V_{\text{инд}} + \bar{V}_{\text{инд}}) \cdot \mu_1} \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ \dots \\ 0 \end{bmatrix}, \quad \alpha = \begin{bmatrix} f_{l,1} \\ f_{l,2} \\ f_{l,3} \\ f_{l,4} \\ \dots \\ f_{l,n} \end{bmatrix}. \quad (15)$$

Основні рівняння комірчастої моделі з застійними зонами за твердою фазою (рис.1б) розробляються і перетворюються аналогічно попередньому варіанту мають вигляд:

$$\begin{cases} V_1 \cdot \frac{dC_{c,1}}{d\tau} = (Q_c + e_{c,1}) \cdot C_{c,2} - (Q_c + e_{c,1}) \cdot C_{c,1} \\ V_i \cdot \frac{dC_{c,i}}{d\tau} = (Q_c + e_{c,i}) \cdot C_{c,i+1} + e_{c,i-1} \cdot C_{c,i-1} - (Q_c + e_{c,i-1} + e_{c,i}) \cdot C_{c,i} \\ V_n \cdot \frac{dC_{c,n}}{d\tau} = Q_c \cdot C_{c,n+1} + e_{c,n-1} \cdot C_{c,n-1} - (Q_c + e_{c,n-1}) \cdot C_{c,n} \end{cases} \quad (16)$$

де $0 \leq \tau \leq 1$ — поточний час перебування індикатора рідкої фази в комірці, с; V_i — об'єм i -тої комірки, м³; $C_{c,i}$ — концентрація індикатора в твердій фазі в i -тій комірці, кг/м³; $e_{c,i}$ — об'ємна швидкість потоку зворотного потоку із i комірки в $(i + 1)$ -ту, м³/с.

$$e_{c,i} = f_{c,i} \cdot Q_c, \quad (17)$$

де $0 \leq f_{c,i} \leq 1$ — частка об'ємних витрат основного потоку, яка повертається з $(j+1)$ в j -ту комірку.

Наступні операції з перетворення, обезрозмірювань та спрощень рівнянь здійснюються аналогічно комірчастої моделі з застійними зонами за рідкою фазою (рівняння (3) — (15)). В результаті маємо

$$\begin{cases} \frac{dz}{d\theta} = A \cdot z + f; \\ z(0) = z^0, \end{cases} \quad z^0 = \begin{bmatrix} \frac{V_{\text{инд.}}}{(V_{\text{инд.}} + \bar{V}_{\text{инд.}})} \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ \dots \\ 0 \end{bmatrix}, \quad F = \begin{bmatrix} \frac{\bar{V}_{\text{инд.}}}{(V_{\text{инд.}} + \bar{V}_{\text{инд.}}) \cdot \mu_1} \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ \dots \\ 0 \end{bmatrix}, \quad \alpha = \begin{bmatrix} f_{c,1} \\ f_{c,2} \\ f_{c,3} \\ f_{c,4} \\ \dots \\ f_{c,n} \end{bmatrix}. \quad (18)$$

Результати досліджень та їхнє обговорення. Для ідентифікації та оптимізації отриманих значень параметрів математичних моделей (15) та (18) була розроблена програма розрахунку в пакеті MATLAB. Також для спрощеного введення початкових параметрів та для наочного зображення результатів розрахунків було створено віртуальний тренажер, головне вікно якого зображене на рис. 2, а вікно налаштувань — на рис. 3.

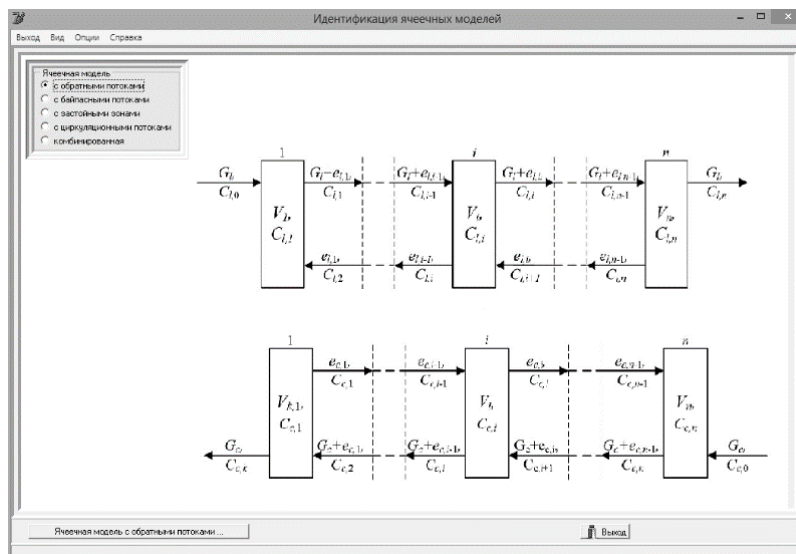


Рис. 2. Загальний вигляд головного вікна віртуального тренажера.

№	Время	C1
1	5	17
2	10	11
3	20	6
4	30	5
5	40	4
6	50	3.3
7	60	2.1

Рис. 3. 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. 4 — 6 як приклад зображено результати даної програми.

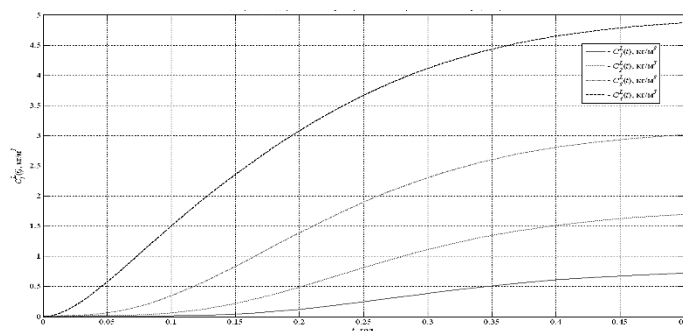


Рис. 4. Вміст екстрактивних речовин в проточних зонах рідкої фази.

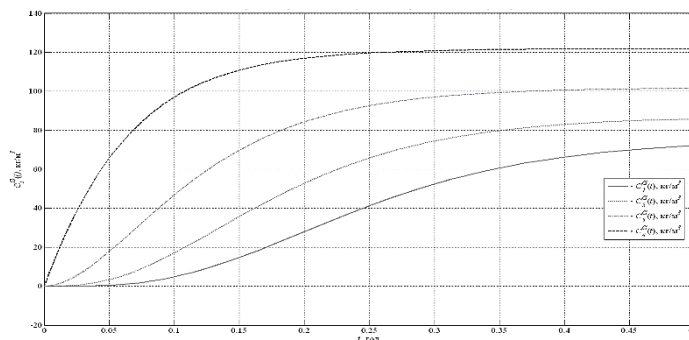


Рис. 5. Вміст екстрактивних речовин в проточних зонах твердої фази.

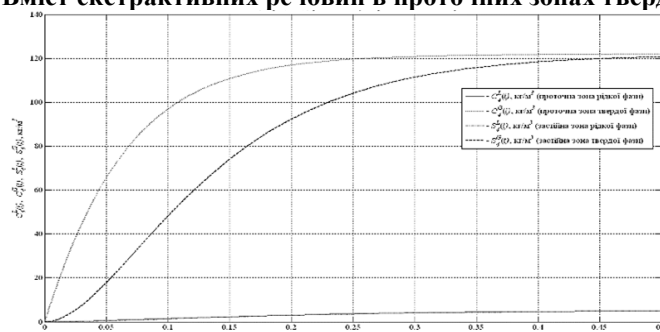


Рис. 6. Вміст екстрактивних речовин в n -ій комірці.

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

Література

- Особенности приводных систем экстракционного оборудования с ковиальным эффектом рабочего срединища / Зав'ялов В. Л. та ін. // Вісник Національного технічного університету «ХП». Збірник наукових праць. Серія: Нові рішення в сучасних технологіях. Х.: НТУ «ХП». 2016. № 18 (1190). С. 30-39.
- Математичний опис гідродинамічної структури потоків при безперервному віброекстрагуванні на основі комірчастої моделі із застійними зонами / Мисюра Т.Г. та ін. // Наук. пр. / Одес. нац. акад. харч. технологій. Одеса, 2016. Т. 80., вип. 1. С. 91-99.
- Вибрационные массообменные аппараты / Городецкий И.Я. и др. / под ред. В.М. Олевского, М.: Химия, 1980. 192 с.
- Development of mathematical models of external mass exchange under conditions of vibroextraction from vegetable raw materials. / Zavialov V. et.al. // Chemistry & Chemical Technology, 2015, 9(3), P. 367-374.
- Пат. винах. 86485 Україна, МІЖ⁶ В 01 D 11/02. Вібратійний екстрактор / Зав'ялов В.Л., Запорожець Ю.В., Бодров В.С.; заявник та патентовласник Національний університет харчових технологій. — № а200707563; заявл. 05.07.07; опубл. 27.04.09, Бюл. №8.

6. Зав'ялов В.Л. Математичне моделювання структури потоків в віброекстракторах безперервної дії колонного типу з вібруючою системою розділення фаз / Зав'ялов В.Л. та ін. // Наук. пр. / Одес. нац. акад. харч. технологій. Одеса, 2013. Т. 2., № 43. С. 26–29.
7. Зав'ялов В.Л. Закономірності дії пульсуючих потоків в умовах протитечісного розділення фаз при віброекстрагуванні із рослинної сировини. / Зав'ялов В.Л. та ін. // Будапешт: Science and Education a New Dimension. Natural and Technical Sciences. III (5), 2015. Issue:41. С. 95–99.

References

1. Zav'yalov, V. L., Kostyuk V. S., Misyura T.G., Bodrov V.S., Kostyuk E. V., Zaporozhets Yu. V., Popova N. V. (2016). Osoblivosti privodnih sistem ekstraktsiynogo obladnannya z kolivnim efektom robochogo seredovischa. Visnik Natsionalnogo tehnicnogo universitetu «HPI». Zbirnik naukovih prats, 18, 30 – 39.
2. Zav'yalov V.L., Lobok O.P., Misyura T.G., Zaporozhets Yu.V., Popova N.V., Bodrov V.S. (2016). Matematichnyi opis gidrodinamichnoyi strukturi potokiv pri bezperervnomu vibro-ekstraguvanni na osnovi komirkovoyi modeli iz zastynimi zonami. Odesa, Naukovi pratsi ONAHT, 48(2),75-78.
3. Gorodetskiy I.Ya., Vasin A.A., Olevskiy, V.M., Lupanov P.A. (1980). Vibratsionnyie massoobmennyye apparaty. Himiya,192.
4. Zav'yalov, V. L., Misyura T.G., Bodrov V.S., Zaporozhets Yu. V., Popova N. V., Dekanskiy V. S. (2015). Development of mathematical models of external mass exchange under conditions of vibroextraction from vegetable raw materials. Chemistry & Chemical Technology, 9(3), 367-374.
5. Zav'yalov V.L., Zaporozhets Yu.V., Bodrov V.S. Pat. vinah. 86485 Ukrayina, MIZH6 V 01 D 11/02. Vibratsiyniy ekstraktor /; zayavnik ta patentovlasnik Natsionalniy universitet harchovih tehnologiy. — № a200707563; zayavl. 05.07.07; opubl. 27.04.09, Byul. №8.
6. Zav'yalov V.L., Lobok O.P., Misyura T.G., Zaporozhets Yu.V., Popova N.V., Bodrov V.S. (2013). Matematichne modelyuvannya strukturi potokiv v vibroekstraktorah bezperervnoyi diyi kolonnogo tipu z vibruyuchoyu sistemoyu rozdilennya faz. Odesa, Naukovi pratsi ONAHT, 43(2), 26-29.
7. Zav'yalov, V. L., Misyura T.G., Bodrov V.S., Zaporozhets Yu. V., Popova N. V., Dekanskiy V. S (2015). Zakonomirnosti diyi pulsuyuchih potokiv v umovah protitechiynogo rozdilennya faz pri vibroekstraguvanni iz roslinnoyi sirovini. Budapesht: Science and Education a New Dimension. Natural and Technical Sciences, 3(5), 95 - 99.

