

THE INFLUENCE OF REGIME PARAMETERS ON KINETICS OF CONTINUOUS VIBRATION EXTRACTION OF PLANT RAW MATERIALS

V. Zavialov, T. Myisura, Yu. Zaporozhets, N. Popova

National University of Food Technologies

Key words:

*Vibration extraction
Vegetable raw materials
Mode parameters
Mass transfer, Kinetics,
Hydraulic resistance
Pulsating flow*

Article history:

Received 11.09.2019
Received in revised form
27.09.2019
Accepted 11.10.2019

Corresponding author:

V. Zavialov

E-mail:

zavialov@nuft.edu.ua

ABSTRACT

The influence of regime parameters of the process of continuous vibroextraction on the kinetics of individual stages of extraction of the target components from raw materials of plant origin has been presented. It has been shown that for continuous process external mass transfer is affected not only by the intensity of oscillations, but also by the depth of interaction of individual pulsating flows, which are generated simultaneously by the transport and filter elements of the plates, which simultaneously carry out counter-current phase separation. Low-frequency mechanical oscillations realize the intense movement of particles in the volume of the apparatus, as well as contribute to a sharp increase in the velocity of each particle relative to the extractant, which, in turn, leads to an increase in the specific active surface of interphase contact and increase the speed of convective diffusion, regardless of the degree of subfraction. The availability of information on kinetic coefficients and their change during the process, depending on the hydrodynamic conditions and technological parameters, provides an opportunity to determine the optimal extraction time, the remainder of the target component in the meal, as well as the efficiency of the process design.

The results of the experiments are summarized in the functional coordinates of the mass transfer coefficient of the Reynolds criterion, which reflect the influence on the external mass transfer of turbulent pulsating flows generated by the transverse elements of the vibrating transport devices.

The hydrodynamic mode of operation of the device is experimentally established, which provides a rapid growth of the mass transfer coefficient, stabilizing at a certain level, due to the decrease in the screening conditions of the particles of raw materials among themselves. The mathematical description of the external mass transfer under conditions of non-stationary transfer of a substance during vibration extraction is obtained in the form of equations for calculating the current concentration of the target component and the minimum time to reach the equilibrium state of the process, which can be used in the design and optimization of solid-phase extractors.

DOI: 10.24263/2225-2924-2019-25-5-10

ВПЛИВ РЕЖИМНИХ ПАРАМЕТРІВ НА КІНЕТИКУ БЕЗПЕРЕРВНОГО ВІБРОЕКСТРАГУВАННЯ З РОСЛИННОЇ СИРОВИНИ

В. Л. Зав'ялов, Т. Г. Мисюра, Ю. В. Запорожець, Н. В. Попова
Національний університет харчових технологій

У статті досліджено вплив режимних параметрів процесу безперервного віброекстрагування на кінетику окремих стадій вилучення цільових компонентів із сировини рослинного походження. Показано, що для безперервного процесу на зовнішній масообмін впливає не тільки інтенсивність коливань, але й глибина взаємодії окремих пульсуючих потоків, що генеруються одночасно транспортувальними та фільтрувальними елементами тарілок, які здійснюють протитечійне розділення фаз. Низькочастотні механічні коливання реалізують інтенсивний рух частинок в об'ємі апарата, а також сприяють різкому зростанню швидкості кожної відносно екстрагенту, що, у свою чергу, призводить до збільшення питомої активної поверхні міжфазового контакту та підвищення швидкості конвективної дифузії, незалежно від ступеня подрібнення твердої фази. Наявність інформації про кінетичні коефіцієнти та їх зміну під час процесу залежно від гідродинамічних умов і технологічних параметрів надає можливість встановлювати оптимальний час вилучення, залишок цільового компонента в шроті, а також ефективність апаратного оформлення процесу.

Результати дослідів узагальнено у функціональних координатах коефіцієнта масовіддачі від критерія Рейнольдса, що віддзеркалюють вплив на зовнішній масообмін турбулентних пульсуючих струменів, генерованих переточними елементами вібротранспортувальних пристроїв.

Експериментально встановлено гідродинамічний режим роботи апарата, що забезпечує стрімке зростання коефіцієнта масовіддачі, стабілізуючись на певному рівні, внаслідок зниження умов екранування часток сировини між собою. Математичний опис зовнішнього масообміну в умовах нестационарного перенесення речовини при віброекстрагуванні отримано у вигляді рівнянь для розрахунку поточної концентрації цільового компонента та мінімального часу досягнення рівноважного стану процесу, які можливо використовувати при конструюванні й оптимізації твердофазових екстракторів.

Ключові слова: віброекстрагування, рослинна сировина, режимні параметри, масообмін, кінетика, гідравлічний опір, пульсуючий потік.

Постановка проблеми. Процес вилучення цільових компонентів з рослинної сировини — один із найскладніших та найважливіших технологічних процесів харчових, фармацевтичних та інших галузей промисловості [1; 2]. На його ефективність впливають гідродинамічний стан робочого середовища, технологічні умови перебігу процесу, що, у свою чергу, потребує індивідуального технологічного режиму, оскільки речовини, які екстрагуються,

суттєво різняться за своїми фізико-хімічними властивостями та фракційним складом. Існуюча теорія екстрагування, зокрема процесу, заснованому на використанні віброефектів, до останнього часу не забезпечила розв'язання багатьох практичних задач. Тому для розроблення досконалої віброекстракційної апаратури та відповідних технологій, встановлення фізичної суті процесу в кожному конкретному випадку вилучення цільових компонентів необхідні подальші ґрунтовні дослідження.

Робота екстракційної апаратури відбувається у виключно складних умовах. Для належного аналізу її роботи та розрахунку необхідно враховувати численні фактори, що впливають на хід процесу, кінетику, гідродинаміку, тепло- та масообмін. Одночасно теоретично врахувати всі ці фактори практично неможливо, тому, як правило, автори розглядають питання ізольовано [3—9].

Незалежно від стану компонентів, що вилучаються з клітини сировини, екстрагування характеризується внутрішньою молекулярною дифузійною речовини та масоперенесенням на її поверхні, тому кожен складову в рівній мірі необхідно враховувати при конструюванні апаратури й удосконаленні існуючих екстракційних технологій. Слід зазначити, що у віброекстракторах підведення енергії до взаємодіючих фаз здійснюється через віброперемішувальні пристрої. Конструкції таких пристроїв різноманітні залежно від процесно-технологічних завдань.

Роль низькочастотних механічних коливань полягає не тільки в тому, що вони створюють інтенсивний рух частинок в об'ємі апарата, але й сприяють різкому зростанню швидкості кожної частинки відносно екстрагента, що, у свою чергу, призводить до збільшення питомої активної поверхні міжфазового контакту та підвищення швидкості конвективної дифузії, незалежно від ступеня подрібнення твердої фази.

Так, при зворотно-поступальному русі тарілок на робочу суспензію діє два фактори: коливальні імпульси тарілок і турбулентні пульсуючі струмені із соплових каналів. Будучи компактними, простими за своїм складом, віброекстрактори періодичної та безперервної дії надають можливість при відносно невеликих витратах підведеної енергії отримати високі швидкості перебігу процесу екстрагування в системі рідина–тверде тіло з малою різницею густин фаз [10; 11]. Тому застосування віброекстрагування в харчовій та фармацевтичній технологіях є одним з перспективних способів інтенсифікації екстракційного процесу при переробленні дрібнофракційної рослинної сировини та її відходів.

Мета дослідження: обґрунтувати і встановити вплив режимних і конструктивних параметрів на кінетику вилучення цільових компонентів із рослинної сировини кореневого та листового походження при безперервному віброекстрагуванні.

Методи дослідження. Використані методи математичного моделювання технологічних процесів та узагальнення результатів експериментів. Основні масообмінні характеристики віброекстрагування одержували теоретичними

та експериментальними методами, заснованими на класичних положеннях і законах, запропонованих В. М. Лисянським, Г. А. Аксельрудом.

Викладення основних результатів дослідження. Як правило, в апаратах, де перемішування здійснюється за рахунок кінетичної енергії потоків, вібраційна система являє собою набір перфорованих дисків спеціальної конструкції, зібраних на рухомій штанзі (штангах) у так звані пакети. Загальні тенденції забезпечення масообміну в апаратах такого типу визначили ряд вагомих за впливом на процес загальних факторів. Це частка вільного перетину секціонуючих перегородок, а також розмір, форма, конфігурація отворів, через які проходять фази, що взаємодіють, відстань між тарілками. Неоптимальне співвідношення цих показників погіршує умови дисипації енергії, зменшує пропускну спроможність та міцність самої тарілки, а відтак, конструкція насадки є важливим фактором, що визначає техніко-економічні показники роботи всього апарата [12]. Крім того, з метою зменшення рівня поздовжнього перемішування в колонних апаратах безперервної дії можуть додатково встановлюватись між тарілками секціонувальні пристрої. Водночас складність гідродинамічної обстановки в кожному конкретному випадку при вібраційному перемішуванні створює значні труднощі для дослідження та конструювання насадок, що, у свою чергу, стримує впровадження апаратів з вібруючими пристроями в переробних галузях промисловості.

Досліджувався вплив низькочастотних механічних коливань як джерела створення пульсуючих вібротурбулізуючих знакозмінних струменів у системі рідина–тверде тіло на кінетику при безперервному екстрагуванні із рослинної сировини. Конструкція лабораторного віброекстрактора безперервної дії за схемою, розробленою на кафедрі ПАХВ НУХТ [13], має циліндричний корпус діаметром 0,3 м і висотою 1,5 м з приєднаним *U*-подібним завантажувальним пристроєм. Для подачі екстрагенту в останній верхній частині апарата закріплений душовий розподільувач і розвантажувальний пристрій у вигляді лотка. В середині колони розміщено зрівноважений вібротранспортувальний пристрій, що складається із системи штоків із закріпленими на них транспортувальними тарілками спеціальної конструкції (залежно від виду рослинної сировини: трав'яного, листового, кореневого, плодово-ягідного, зернового походження) з можливістю регулювання їх кількості, відстані між ними, частоти коливань та амплітуди.

Через розподільувач апарат заповнюється екстрагентом, що подається на рівень верхньої тарілки. Одночасно встановлюється заданий амплітудно-частотний режим коливання вібротранспортувальної системи. Підготовлена до екстрагування подрібнена рослинна сировина через завантажувальний пристрій направляється під нижню тарілку, рухається безперервно вздовж апарата за допомогою вібротранспортувальних тарілок протитечійно екстрагенту з поступовим вилученням цільових компонентів і вивантажується з апарата у вигляді шроту через лоток. Готовий екстракт через фільтр відводиться з апарата. Протитечійне розділення фаз для всіх типів досліджуваних конструкцій вібротранспортувальних тарілок здійснюється за рахунок різниці гідравлічних опорів перетоку робочого середовища через транспортувальні

відкриті елементи, фільтрувального ефекту через фільтрувальні елементи та седиментації часток твердої фази на поверхні тарілок [13]. Досліджувались конструкції вібрувальних перегородок з переточними елементами у вигляді сопел з діаметром $d_c = 0,015$ м, що входять у закріплені на перегородці гнучкі патрубки діаметром 0,040 м і висотою 0,045 м. Частка «живого перерізу» апарата в зоні встановлення тарілки складала в межах: $\varepsilon = 0,055 \dots 0,142$.

Для забезпечення термостатичного ефекту установка оснащена внутрішнім і зовнішнім електрообігрівом у вигляді вмонтованих ТЕНів. Контроль і регулювання температурного режиму здійснювались електроконтактним термометром. Організована циркуляція екстрагенту виконувалась через циркуляційний контур. Досліди проводились на системах «вода–бурякова маса» та «вода–шишковий хміль» із відповідним встановленим температурним режимом на рівні $346 \dots 351^\circ\text{K}$, та параметрами коливань у межах: амплітуда дискретно: $(5, 10, 15) \cdot 10^{-3}$ м; частота: $2 \dots 4$ Гц. Співвідношення твердої та рідкої фаз досягалось регулюванням частоти обертання шнека завантажувального пристрою. Проби відбирались у трьох точках: із зони встановлення тарілки; на деякій відстані від неї; в зоні вивантаження твердої фази. Для визначення вмісту залишку цільових компонентів у буряковій масі її подрібнення здійснювалось лабораторним подрібнювачем РТ-1.

Для проектування екстракційної апаратури відповідно з її продуктивністю за твердою фазою або екстракту необхідно знати кінетичні коефіцієнти: коефіцієнт дифузії розчинної речовини всередині рослинної сировини та коефіцієнт масовіддачі від поверхні твердого тіла до екстрагента. Такі дані уможливають визначення оптимального часу процесу, кінцевих концентрацій речовини в шроті та екстрагенті, а також конструктивні параметри апарата.

Для встановлення дифузійних властивостей досліджуваної сировини розрахунки виконувались за водорозчинними сухими речовинами згідно з методикою В. М. Лисянського, заснованою на режимі киплячого шару під розрідженням. Вміст сухих водорозчинних речовин в екстрагенті та сировині визначався рефрактометричним методом та за балансними рівняннями. Під час опрацювання експериментальних даних розрахунок кінетичних коефіцієнтів виконувався за методикою Г. А. Аксельруда для прямого процесу, з виділенням регулярного режиму. Пульсаційний критерій Рейнольдса $Re_{\pi} = w_0 d / \nu$ розраховувався за значенням початкової середньоінтегральної та середньої по перерізу транспортувального елемента (сопла) швидкості пульсуючого потоку $w_0 = \frac{2Af(1-\varepsilon)}{\varepsilon}$, де ε — загальний живий переріз, що є відношенням площі отворів тарілки та зазору по периферії (в зоні встановлення тарілки) до площі поперечного перерізу апарата; A, f — відповідно, амплітуда коливань вібротранспортувальної системи. Тобто $Re_{\pi} = \frac{4A^2 f(1-\varepsilon)}{\nu \varepsilon}$.

Експериментальні дослідження. Слід зазначити, що під час встановлених конструктивних і технологічних параметрів процесу (гідромодуль, темпера-

тура, навантаження апарата по твердій фазі) інтенсифікація процесу може бути досягнута за рахунок режимних параметрів (частоти та амплітуди коливань вібротранспортувальної системи). Результати досліджень впливу гідродинамічного режиму, створеного вібротранспортувальною системою на зовнішній масообмін для бурякової сировини, узагальнено на рис. 1.

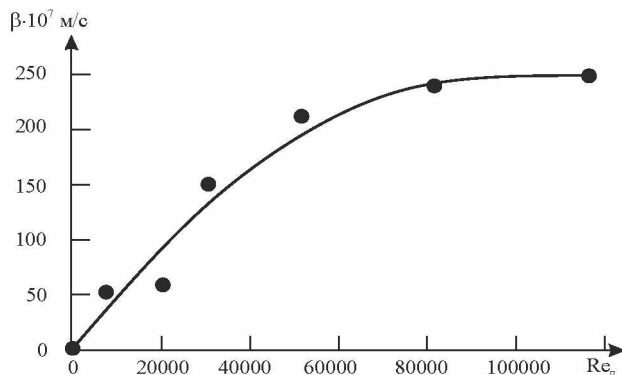


Рис. 1. Залежність коефіцієнта масовіддачі при екстрагуванні цукрової буряка від критерію Рейнольдса

Результати свідчать, що із збільшенням інтенсивності коливань зростає активізація міжфазової поверхні внаслідок зниження умов екранування часток сировини між собою. Тобто повне усунення екранування досягається при значеннях коефіцієнта масовіддачі близько після $225 \cdot 10^{-7}$ м/с, що відповідатиме критерію Рейнольдса 60000.

Отримані аналогічні узагальнюючі результати для хмельової сировини, представлені на графіку (рис. 2), узгоджуються з попередніми, отриманими для бурякової сировини. У цьому випадку інтенсивність коливань вібротранспортувальної системи, починаючи від критерію Рейнольдса (40000 і далі), значно збільшує зовнішнє масоперенесення та сприяє переходу хмельової сировини у псевдозріджений стан.

Слід зазначити, що особливістю реального процесу вилучення цільових компонентів із рослинної сировини є зміна у часі фізичних умов в робочому об'ємі апарата, що визначаються як гідродинамічними умовами процесу, так і властивостями фаз. Тому для обґрунтування зв'язку між конструктивними й технологічними параметрами процесу в заданих технологічних межах дієвим методом є використання математичного опису процесу. Тож при підведенні енергії в робочу зону апарата у вигляді пульсуючих потоків середовища відбувається рівномірне її розподілення у поперечному перерізі апарата.

Створений знакозмінний турбулентний потік реалізує достатньо ефективні умови обтікання усієї поверхні кожної частинки твердого фази. Це явище можливо регулювати зміною інтенсивності коливань вібротранспортувальної системи (амплітудою та частотою) залежності від виду середовища та необхідної заданої продуктивності апарата по твердій фазі. Наведені обставини належним чином узгоджуються з фізичним змістом коефіцієнта масовіддачі та відкривають можливості для аналізу режиму роботи апарата,

встановлення мінімального часу екстрагування й поточної концентрації насичення екстрагенту цільовим компонентом.

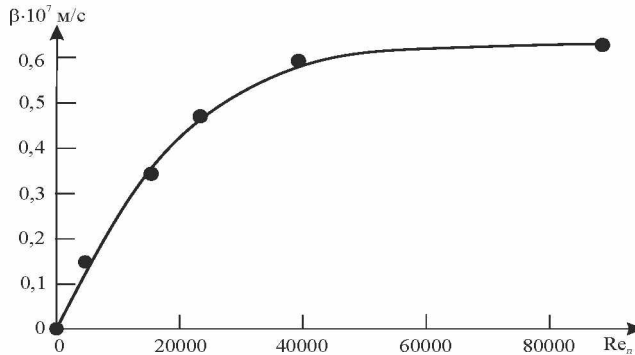


Рис. 2. Залежність коефіцієнта масовіддачі при екстрагуванні хмелевої сировини від критерія Рейнольдса

У рамках представленого дослідження розглянемо відповідні питання, що стосуються моделювання масообміну в екстракторах неперервної дії колонного типу. Отже, враховуючи реальні умови екстрагування, що супроводжується ефектом скранування міжфазової поверхні та нерівномірністю обтікання поверхні екстрагентом тощо, в рівняння конвективної дифузії введемо доданок, який враховує квадратичний ефект нерівномірності перенесення цільового компонента в екстрагент за аналогією з рівнянням регресії:

$$\begin{cases} \frac{dc}{dt} = \beta(C^* - C) + \gamma(C^* - C)^2 \\ C(t_0) = C_0, \end{cases} \quad (1)$$

де β — коефіцієнт масовіддачі, віднесений до питомої поверхні контакту фаз, c^{-1} ; t — час зміни концентрації розчиненої речовини, s ; γ — емпіричний коефіцієнт (коефіцієнт уточнення аналогічний коефіцієнту активності поверхні), що залежить від зовнішньої дифузійної нерівномірності перенесення речовини; C та C^* — відповідно, поточна концентрація речовини в екстрагенті та її рівноважне значення, $кг/м^3$.

Враховуючи граничні умови $C(t_0) = C_0$, після інтегрування та використання метод невизначених коефіцієнтів, перейшовши до експоненти, було отримано розв'язок рівняння (1) у вигляді:

$$C(t) = C^* - \frac{\beta(C^* - C_0)}{e^{\beta(t-t_0)}(\beta + \gamma(C^* - C_0)) - \gamma(C^* - C_0)}. \quad (2)$$

Для початку процесу масовіддачі, коли $t_0=0$ і концентрація речовини в екстрагенті $C_0=0$, отримуємо рівняння для розрахунку поточної концентрації екстрагованої речовини:

$$C(t) = C^* - \frac{\beta C^*}{e^{\beta t} (\beta + \gamma C^*) - \gamma C^*} = C^* \left(1 - \frac{\beta}{e^{\beta t} (\beta + \gamma C^*) - \gamma C^*} \right), \quad (3)$$

Тоді мінімальний час екстрагування визначиться за умови:

$$C^* - C(t) = E, \quad (4)$$

де $E > 0$ — відхилення поточної концентрації від рівноважної (задане мале число).

Підставимо $C^* - C(t) = E$ у (3) та після логарифмування отримаємо рівняння для встановлення мінімального часу процесу для досягнення рівноважного стану системи, тобто час, у який вперше відхилення від рівноважного стану буде дорівнювати E , а функція $C(E)$ монотонно зростатиме. Отже, при $t > t_{\max}$ рушійна сила процесу досягне заданого малого значення E , або, інакше, $C^* - C(t) < E$:

$$t_{\min} = \frac{1}{\beta} \ln \frac{C^* (\beta + \gamma E)}{E (\beta + \gamma C^*)}. \quad (5)$$

Слід зазначити, що при використанні отриманих рівнянь для визначення поточного значення концентрації або побудови екстракційних кривих за заданих умов процесу важливо знайти коефіцієнт γ , що враховує дифузійну нерівномірність при вилученні цільових компонентів. Тобто цей коефіцієнт може бути представлений як співвідношення коефіцієнтів D_T/D_n , де D_T , D_n — відповідно, коефіцієнт молекулярної дифузії тканини речовини за умови відсутності екрануючого ефекту та в умовах реального процесу.

Висновки

Встановлено, що інтенсифікація процесу віброекстрагування може бути досягнута за рахунок режимних параметрів процесу (частоти та амплітуди коливань вібротранспортувальної системи). Сумісна дія цих параметрів визначає гідродинамічний стан процесу в зоні дії пульсуючих потоків.

Поступове збільшення критерію Рейнольдса, починаючи близько з 15000—20000, призводить до стрімкого зростання коефіцієнта масовіддачі, стабілізуючись на певному рівні, внаслідок зниження умов екранування часток сировини між собою, що, у свою чергу, означає перехід сировини у псевдозріджений стан. На цій стадії процесу лімітуючою стає внутрішня молекулярна дифузія. Тому раціональними режимними параметрами роботи віброекстрактора, що забезпечують достатнє для ефективного зовнішнього масообміну оновлення поверхні контакту фаз з низьким рівнем поздовжнього перемішування, слід вважати амплітуду коливань вібротранспортувальної системи в межах $(10 \dots 15) \cdot 10^{-3}$ м з частотою 2... 4 Гц.

Результати математичного моделювання зовнішнього масообміну в умовах нестационарного перенесення речовини при віброекстрагуванні у вигляді рівнянь для розрахунку поточної концентрації цільового компонента та

мінімального часу досягнення рівноважного стану процесу можливо використувати при конструюванні та оптимізації твердофазових екстракторів.

Література

1. Поперечний А. М., Боровков С. О. До питання інтенсифікації процесу екстрагування в системі «тверде тіло—рідина». *Обладнання та технології харчових виробництв*: Темат. зб. наук. пр. Донецьк: ДонНУЕТ, 2007. Вип. 16. С. 104—109.
2. Поперечний А. М., Боровков С. О. Обґрунтування створення вібраційного екстракційного апарату безперервної дії. *Збірник наукових праць Луганського національного аграрного університету*. Серія: Технічні науки. Луганськ: Видавництво ЛНАУ, 2008. № 87. С.332—341.
3. Белобородов В. В. Проблемы экстрагирования в пищевой промышленности. *Известия вузов. Пищевая технология*. 1986. № 3. С. 6—11.
4. Белоглазов И. Н. Твердофазные экстракторы: инженерные методы расчета. Л. : Химия, 1985. С. 42—49.
5. Вибрационные массообменные аппараты. / И. Я. Городецкий и др.; под ред. В. М. Олевского. М.: Химия, 1980. 192 с.
6. Горлов М. Д. Разработка и исследование вибрационного массообменного аппарата для экстрагирования плодово-ягодного сырья: дис. ... канд. техн. наук. Кемерово, 2005. 157 с.
7. Зав'ялов В. Л., Лобода П. П. Исследование гидродинамики пульсирующих струй в виброекстракторах. Обработка жидких сред электромагнитными полями. Тепло-массообмен и гидродинамика в турбулентных течениях: тез. докл. на Межгосударственной конференции. Алушта, 1992. С. 52.
8. Ковалева Т. М., Гладух Е. В., Половко Н. П. Дослідження деяких умов екстрагування БАВ при отриманні густого екстракту горіха волооського. *Фармаком* 1. 2002. С. 58—61.
9. Зав'ялов В. Л., Деканський В. Є., Мисюра Т. Г., Попова Н. В., Запорожець Ю. В., Бодров В. С. Систематизація класифікаційних ознак екстракторів для системи тверде тіло — рідина. *Всеукраїнський науково-технічний журнал «Вібрації в техніці та технологіях»*. Вінниця, 2012. № 4(68). С. 109—111.
10. Hugh M. A., Krukonis R. J. *Supercritical Fluid Extraction: Principles and Practice*. 2nd ed. Boston, 1994. 512 p.
11. Вібраційний екстрактор: пат. 32703 Україна. МПК В04С 5/00 № u2008 00668; заявл. 21.01.08; опубл. 26.05.2008; Бюл. № 10. 4с.
12. Малышев Р. М. и др. Процессы пульсационной экстракции из растительного сырья. *Теор. основы хим. технологии*. 2001. № 1. Т. 35. С. 57—60.
13. Вібраційний екстрактор: пат. 92560 Україна. № 2004042416; МПК В 01 D 11/02. № а 2009 06928; заявл. 02.07.09; опубл. 26.10.09, Бюл. № 20.