Зав'ялов В. Л.

Мисюра Т. Г.

Бодров В. С.

Попова Н. В.

Запорожець Ю. В.

Національний університет харчових технологій

Zavialov V. L.

Misyura T. G.

Bodrov V. S.

Popova N. V.

Zaporozhets J. V.

National University of Food Technologies

УДК 664.061.4:084

ДОСЛІДЖЕННЯ МАСООБМІНУ В УМОВАХ ПЕРІОДИЧНОГО ВІБРОЕКСТРАГУВАННЯ ІЗ РОСЛИННОЇ СИРОВИНИ (ЧАСТИНА ДРУГА)

Представлено результати досліджень впливу низькочастотних механічних коливань, як джерела створення пульсуючих вібротурбулізуючих знакозмінних струменів в системі рідина — тверде тіло, на інтенсивність масообміну при періодичному екстрагуванні із рослинної сировини. Узагальнення результатів експериментів виконано в системі функціонально зв'язаних координат, де в якості функціонального приймається час, протягом якого концентрація екстрагента змінюється у «е» (основа натуральних логарифмів) разів, а у якості просторової одиниці — відстань, на якій функціональний час змінюється в тій же степені. У таких координатах стає можливим швидко оцінювати рівень масообміну при екстрагуванні.

Ключові слова: *віброекстрагування, масообмін, екстракційні криві, режимні параметри, робоче середовище, пульсуючий потік, час релаксації, коефіцієнт масопередачі.*

Вступ. Для розроблення або дослідження масообмінних характеристик екстракційної апаратури у відповідності з її продуктивністю необхідно знати кінетичні коефіцієнти. Встановивши закономірність їх зміни під час процесу і їх залежність від гідродинамічних умов та технологічних параметрів, стає можливим визначення оптимальної тривалості його проведення, кінцевих концентрацій речовини в шроті та екстрагенті, а також раціональних режимних параметрів роботи апарата.

Разом з тим слід зазначити, що цільовий компонент може знаходитись у порах сировини у розчиненому стані, що є характерним для незруйнованої свіжої рослинної клітини, або у твердому стані у висушеній сировині, обробленої хімічно, електричним струмом, бароефектами чи механічно віджатої. Останні впливові ефекти викликають супутність первісної стадії іншого процесу – розчинення цільових компонентів в капілярах, порах або зруйнованих клітинах сировини. Такі обставини призводять до певних труднощів при розрахунках, оскільки матеріали, що екстрагуються, різняться за своїми фізико-хімічними властивостями, розмірами частинок та ін., що вимагає у свою чергу індивідуального технологічного режиму і, відповідно, апаратурного оформлення процесу [1, 2].

У зв'язку з цим слід зазначити, що конструювання екстракційної апаратури завжди було пов'язано з пошуком нових способів та форм забезпечення ефективної взаємодії фаз, що визначаються гідродинамікою, створеною робочими елементами апарата [3]. Незважаючи на різноманітне коло задач окремих стадій проектування, існують загальні підходи та критерії щодо визначення процесної ефективності спроектованого апарата. До таких в першу чергу слід віднести масообмінні характеристики, які використовуються системно на всіх етапах проектування екстракторів. Використання традиційних способів визначення інтенсивності зовнішнього масообміну, в основу яких покладено розгляд елементарних процесів для тіл найпростішої геометричної форми та для умов, коли конвекція за межами тіла є сталою, надто спрощує установлення тотожності теоретичних та експериментальних

даних, зокрема при визначенні кінетичних коефіцієнтів. З іншого боку, врахування всіх чинників, що впливають на процес (гідродинаміка обтікання твердого тіла екстрагентом, поля швидкостей та концентрацій екстрагента навколо частинки, її геометричні та дифузійні особливості тощо), ускладнює шлях визначення найважливіших для екстрагування масообмінних характеристик, тому пошук нових експериментальних експрес-методів їх оцінювання на сьогодні є необхіним.

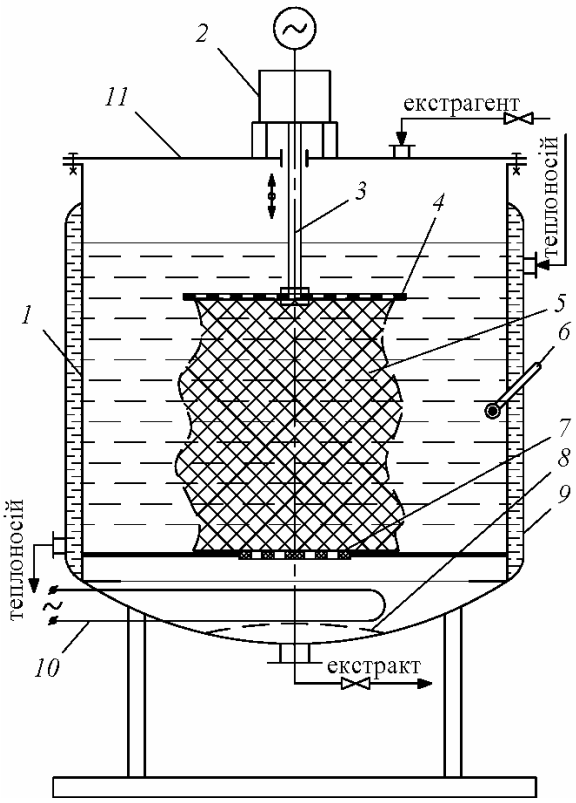

Рис. 1. Схема лабораторного віброекстрактора періодичної дії: 1 – корпус апарата; 2 – вібропривід; 3 – шток; 4 – перфорований диск; 5 – гнучкий контейнер; 6 – термометр; 7 – сітчаста опора; 8 – фільтр; 9 – оболонка; 10 – нагрівальний елемент; 11 – кришка

Постановка завдання. Структурна складність рослинної тканини, багатофункціональність зв'язаних з нею дифузійних властивостей сировини та вплив гідродинаміки на процес ускладнюють проведення експериментальними методами глибокого та достовірного аналізу масоперенесення на всіх його масштабних рівнях. У зв'язку з цим, враховуючи особливості віброекстрагування цільових компонентів із рослинної сировини, за мету ставиться дослідження масообміну в умовах періодичного віброекстрагування та на основі узагальнення його результатів – розроблення нового експериментального експрес-методу визначення масообмінних характеристик екстракційної апаратури різних модифікацій.

Виклад основного матеріалу. Досліджувався вплив низькочастотних механічних коливань, як джерела створення пульсуючих вібротурбулізуючих знакозмінних струменів в системі рідина – тверде тіло, на інтенсивність масообміну при періодичному екстрагуванні із рослинної сировини.

Конструкція віброекстрактора періодичної дії за схемою на рис.1 має циліндричний корпус 1 діаметром 0,3 м і висотою 0,4 м, на якому розміщено вібропереміщувальну систему, що складається з гнучкого контейнера 5 спеціальної конструкції, закріпленого на ситчастій опорі 7 та з'єднаного штоком 3 через верхній перфорований диск 4 з вібропривідом 2.

В робочому об'ємі апарата передбачена можливість створення турбулентних пульсуючих знакозмінних потоків, напрямлених як до його периферії, так і до його центральної частини. Гідродинамічні властивості цих потоків визначають їх дію як турбулізуючого фактора на мікрорівні та макромасштабного фактора, що усуває застійні зони.

Екстрактор працює таким чином. У підготовлений та очищений гнучкий контейнер 5 екстрактора завантажують сировину, фіксують його на перфорованому диску 4, закривають кришку апарата 11 і після заповнення екстрагентом робочого об'єму апарата вмикають вібропривід 2. При цьому екстрагент починає вільно перемішуватися в центральній та периферійній зоні всього робочого об'єму апарата.

При робочій амплітуді та частоті коливань вібраційної системи інтенсивність перемішування оцінюється швидкістю обтікання екстрагентом поверхні частинок твердої фази. Пульсуючий потік середовища, генерований перфорованим диском 4, спрямований також до дна апарата, збурює шар частинок в контейнері 5. При відсутності парової мережі робоче середовище обігрівається гарячою водою через оболонку 9 від зовнішнього теплообмінника, або за допомогою електронагрівальних елементів 10.

Під час дослідів водорозчинні сухі речовини вилучали з листової чайної сировини та сировини зернового походження.

Параметри коливань вібропереміщувальних пристроїв змінювались у межах 3 – 9 Гц, при фіксованих амплітудах (10 мм і 20 мм), довжині частинок сировини ($2 \cdot 10^{-3}$ – $10 \cdot 10^{-3}$ м), тривалості проведення процесу (15, 30 і 45 хв) та гідромодулі 25, 30, 35. Температура робочого середовища підтримувалась у межах 25 – 85 °С системою терморегулювання.

Відбір проб екстрактів проводився через кожні 5 хв та визначався вміст їх сухих речовин за допомогою лабораторного рефрактометра РПЛ-4.

За результатами дослідів будувались екстракційні криві [4].

Однією з найважливіших характеристик процесу періодичного екстрагування є час досягнення рівноважного стану робочої системи [5, 6]. Тому, для узагальнення результатів проведених експериментів [4], нами використано систему функціонально зв'язаних координат, в якій в якості функціонального приймається час – $\tau_р$ (час релаксації двофазової суміші), протягом якого концентрація екстрагента зміниться у «е» (основа натуральних логарифмів) разів, а у якості просторової одиниці – відстань, на якій функціональний час зміниться в тій же степені, тобто на порядок натуральних логарифмів [5, 6]. У таких координатах стає можливим оперативно оцінити зміну рівня інтенсивності масообміну при екстрагуванні.

З цією метою у напівлогарифмічних координатах встановлювалась зміна в часі відхилення поточної концентрації насичення екстрагенту екстрактивними речовинами C від його рівноважного стану $C_р$ (рис.2 – 4 з умовними позначеннями, наведеними в табл.1).

Для порівняння впливу вібраційного ефекту при екстрагуванні із листової чайної сировини з іншими способами перемішування розраховувався час релаксації $\tau_р$ та об'ємний коефіцієнт масопередачі K_V, як обернена величина до $\tau_р$.

Такий підхід до узагальнення результатів є можливим варіантом вирішення проблеми масштабування екстракційної апаратури, з врахуванням того, що величина, яка обернена до часу релаксації може бути прийнята за об'ємний коефіцієнт масопередачі, що враховуватиме цей складний процес на всіх масштабних рівнях.

На рис. 4 наведено залежності, що отримані за екстракційними кривими [6] (для екстракторів різних типів), та за якими є можливим визначення об'ємних коефіцієнтів масопередачі.

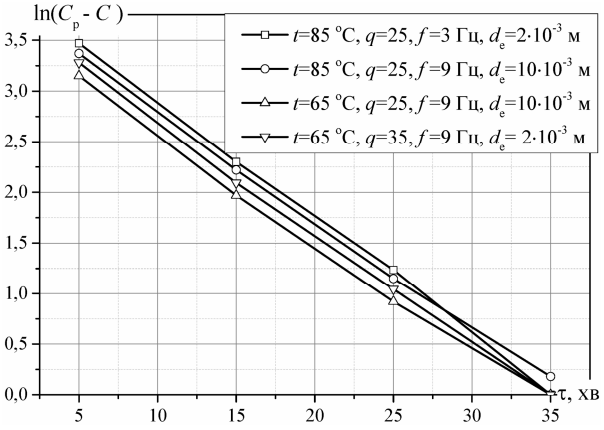

Рис. 2. Порівнювані залежності для визначення часу релаксації при екстрагуванні чайного листя в екстракторі з мембранною системою перемішування

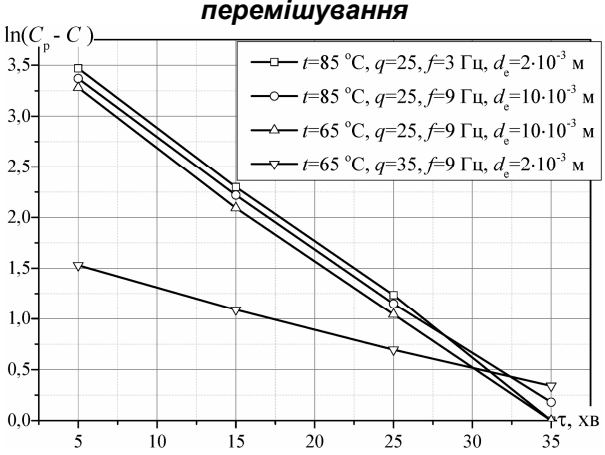

Рис. 3. Порівнювані залежності для визначення часу релаксації при екстрагуванні чайного листя в екстракторі з вібруючим контейнером

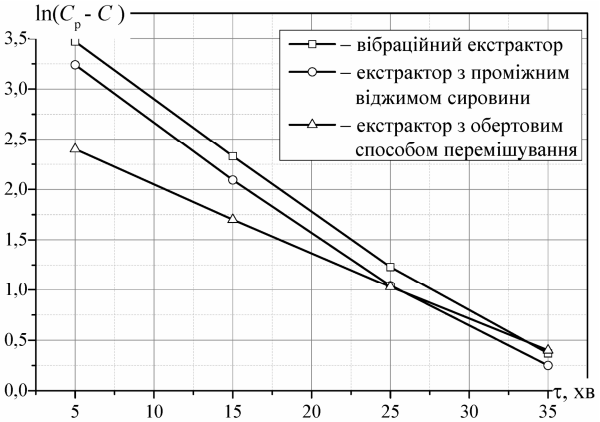

Рис. 4. Порівнювані залежності для визначення часу релаксації при екстрагуванні чайного листя в екстракторах з різними способами перемішування двофазової системи

Таблиця 1

Узагальнення результатів дослідження кінетики періодичного віброекстрагування

№ досліду	Температура екстрагента, t, ºС	Частота коливань вібропереміщувальної системи, f, Гц	Визначальний розмір сировини, $d_e \cdot 10^3$, м	Час релаксації, $\tau_р$, с	Об'ємний коефіцієнт масопередачі, $K_V \cdot 10^2$, с$^{-1}$		
					Вібро-екстрактор	Екстрактор з проміжним віджимом	Екстрактор з обертовою мішалкою
1	85	3	2	600	0,176	0,167	0,06
2	85	9	10	540	0,185	0,159	0,08
3	65	9	10	900	0,166	0,133	0,04

Переваги впливу низькочастотних механічних коливань при віброекстрагуванні (з гідромодулем q=25) коментуються порівняльною таблицею результатів (табл. 1).

Для математичного опису процесу з урахуванням нерівномірності зовнішньої дифузії у рівнянні масовіддачі коефіцієнт масопередачі віднесено до робочого об'єму апарата V, що зв'язаний з поверхнею масообміну залежністю $V=F/a$, де a – питома поверхня контакту фаз, тобто поверхня масовіддачі, віднесена до одиниці робочого об'єму апарата, м^2/м^3.

За таким, рівняння масовіддачі від частинок твердої фази до потоку екстрагента матиме вигляд

$$\frac{dM}{dt} = \beta_F a V \left(C_р - C\right), \qquad (1)$$

де $\beta_F a = \beta$ – матиме зміст об'ємного коефіцієнта масовіддачі, с$^{-1}$; M – маса розчиненої речовини за час t, кг; F – поверхня масовіддачі, м^2; C та $C_р$ – відповідно поточна концентрація речовини в екстрагенті та її рівноважне значення, кг/м^3; β_F – коефіцієнт масовіддачі, м/с.

В цьому випадку матимемо:

$$\frac{dC}{dt} = \beta\left(C_р - C\right). \qquad (2)$$

Зважаючи на складність процесу екстрагування із рослинної сировини, обумовлену специфікою її морфологічної структури, а також нерівномірністю обтікання екстрагентом твердої фази, введемо в рівняння конвективної дифузії доданок, що враховує квадратичний ефект нерівномірності перенесення цільового компонента в екстрагент, за аналогією з рівнянням регресії:

$$\begin{cases} \dfrac{dC}{dt} = \beta\left(C_р - C\right) + \gamma\left(C_р - C\right)^2 \\ C\left(t_0\right) = C_0, \end{cases} \qquad (3)$$

де γ – емпіричний коефіцієнт (коефіцієнт уточнення), що залежить від зовнішньої дифузійної нерівномірності перенесення речовини.

Цей коефіцієнт має аналогічний зміст до коефіцієнта активності поверхні $f_п$ для умов ідеального перемішування.

Для початку процесу масовіддачі, коли початковий час t_0=0 і концентрація речовини в екстрагенті C_0=0, отримано:

$$C\left(t\right) = C_р\left(1 - \frac{\beta}{e^{\beta \cdot t}\left(\beta + \gamma C_р\right) - \gamma C_р}\right). \qquad (4)$$

Мінімальний час екстрагування буде визначено за умови

$$C_р - C\left(t\right) = E, \qquad (5)$$

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

Тоді, мінімальний час процесу для досягнення рівноважного стану системи:

$$t_{\min} = \frac{1}{\beta}\ln\left[\frac{C_р\left(\beta + \gamma E\right)}{E\left(\beta + \gamma C_р\right)}\right] \qquad (6)$$

або

$$t_{\min} = \frac{1}{\beta}\ln\left[\frac{\gamma + \beta/E}{\gamma + \beta/C_р}\right]. \qquad (7)$$

Мінімальний час – це момент часу, в який вперше відхилення від рівноважного стану буде дорівнювати E, а функція $C(E)$ монотонно зростаюча. Отже, при $t > t_{\max}$, рушійна сила процесу досягне заданого малого значення E, або, інакше, $C_р - C\left(t\right) < E$. Цей момент часу дорівнюватиме мінімальному значенню $t_{\min}$ і відповідає уявленням про час релаксації процесу $\tau_р$, тобто час, за який рушійна сила процесу зміниться у «е» разів («е» – основа натуральних логарифмів).

При використанні рівняння (4) для визначення поточного значення концентрації або для побудови екстракційних кривих за заданих умов процесу важливо знайти коефіцієнт γ, що враховує дифузійну нерівномірність при вилученні цільових компонентів. Коефіцієнт активності поверхні

масообміну може бути інтерпретованим як відношення активної її складової $F_{акт}$ до повної геометричної поверхні частинки $F_{геом.}$: $\gamma = F_{акт} / F_{геом}$.

Висновки. Підводячи підсумки, зазначимо, що з метою оцінювання масообмінних характеристик екстракційної апаратури перспективним є узагальнення експериментальних даних в системі функціонально зв'язаних координат, де функціональним приймається час, протягом якого концентрація екстрагента змінюється у «е» (основа натуральних логарифмів) разів, а як просторова одиниця – відстань, на якій функціональний час зміниться в тій же степені, тобто на порядок натуральних логарифмів. Такий підхід до узагальнення результатів є можливим варіантом вирішення проблеми масштабування екстракційної апаратури, з врахуванням того, що величина, обернена до часу релаксації, може бути прийнята за об'ємний коефіцієнт масопередачі, який враховуватиме цей складний процес на всіх масштабних рівнях.

Наведені результати математичного моделювання зовнішнього масообміну при екстрагуванні із рослинної сировини в умовах нестаціонарного перенесення речовини та з урахуванням зовнішньої дифузійної нерівномірності можливо використовувати при конструюванні та оптимізації іншої екстракційної апаратури.

Список використаних джерел

1. Зав'ялов В. Л. Дослідження дифузійних властивостей листової чайної сировини / В. Л. Зав'ялов, Н. В. Попова // Наукові праці ВДАУ. – Вінниця, 2006. – Вип. 1. – С. 14–19.
2. Popova N. Ivestigation of the extraction of flavoid compounds from high mountain Herbage / N. Popova, V. Zavialov, V. Bodrov, T. Misyura, Y. Zaporozhets // The second north and east European congress on food (May 26, 2013). – Kiev: NUFT, 2013. – P. 165.
3. Белоглазов И. Н. Твердофазные экстракторы / И. Н. Белоглазов. – Л.: «Химия». Ленинградское отделение, 1985. – 239 с.
4. Зав'ялов В. Л. Дослідження масообміну в умовах періодичного віброекстрагування із рослинної сировини (частина перша) / В. Л. Зав'ялов, Т. Г. Мисюра, В. С. Бодров, Н. В. Попова, Ю. В. Запорожець // Всеукраїнський науково-технічний журнал «Вібрації в техніці та технологіях». – Вінниця, 2014. – № 4 (76) – С. 130–134.
5. Зав'ялов В. Л. Дослідження кінетики процеса екстрагування з листової чайної сировини в апаратах періодичної дії із різними вібраційними системами перемішування / В. Л. Зав'ялов, Н. В. Попова // Вісник Харківського національного технічного університету сільського господарства ім. П. Василенка. – Харків, 2007. – Вип. 58. – С. 102–112.
6. Лобода П. П. Перспективи застосування універсальних просторово-часових співвідношень при інтенсифікації та масштабуванні технологічних процесів / П. П. Лобода / / Наукові праці УДУХТ. – 1993. – № 1. – С. 60–64.

Список джерел в транслітерації

1. Zavialov V. Doslidzhennia difuziynih vlastivostey listovoi chainoi sirovini / V. Zavialov, N. Popova // Naukovi pratsi VDAU. – Vinnitsa, 2006. – Vip. 1. – s. 14–19.
2. Popova N. Ivestigation of the extraction of flavoid compounds from high mountain Herbage / N. Popova, V. Zavialov, V. Bodrov, T. Misyura, Y. Zaporozhets // The second north and east European congress on food (May 26, 2013). – Kiev: NUFT, 2013. – P. 165.
3. Beloglazov I. Tverdofaznie extractory / I Beloglazov. – L.: «Himiya». Leningradskoe otdelenie, 1985. – 239 s.
4. Zavialov V. Doslidzhennia masoobminu v umovah periodichnogo vibroextraguvannia iz roslinnoi sirovini (Chastina persha) / Zavialov V., T. Misyura, V. Bodrov, N. Popova, Y. Zaporozhets // Vseukrainskiy naukovo-tehnichniy zhurnal «Vibratsii v tehnitsi ta tehnologiyzh». – Vinnitsa, 2014. – №4 (76) – P. 130–134.
5. Zavialov V. Doslidzhennia kinetiki protsesa extraguvannia z listovoi chainoi sirovini v aparatah periodichnoi dii iz riznimi vsbratsiynimi sistemami peremishuvannia / Zavialov V., N. Popova // Visnik Charkivskogo natsionalnogo tehnichnogo universitetu silskogo gospodarstva im. P. Vasilenka. – Charkiv, 2007. – Vip. 58 – P. 102–112.
6. Loboda P. P. Perspektivi zastoduvannia universalnih prostorovo-chasovih spivvidnoshen pri intensifikatsii ta masshtabuvanni tehnologichnih protsesov / P. P. Loboda // Naukovi pratsi UDUHT. – 1993. – № 1. – P. 60–64.

ИССЛЕДОВАНИЕ МАССООБМЕНА В УСЛОВИЯХ ПЕРИОДИЧЕСКОГО ВИБРОЭКСТРАГИРОВАНИЯ ИЗ РАСТИТЕЛЬНОГО СЫРЬЯ (ЧАСТЬ ВТОРАЯ)

Аннотация. *Представлены результаты исследований влияния*

низкочастотных механических колебаний, как источника создания пульсирующих вибротурбулизирующих знакопеременных струй в системе твердое тело — жидкость, на интенсивность массообмена при периодическом экстрагировании из растительного сырья. Обобщение результатов экспериментов выполнено в системе функционально связаных координат, где в качестве функционального принято время, втечение которого концентрация экстрагента изменится в «е» (основание натуральных логарифмов) раз, а в качестве пространственной единицы — расстояние, на котором функциональное время изменится в той же степени. В таких координатах становится возможным оценивать уровень массообмена при экстрагировании.

Ключевые слова: *виброэкстрагирование, массообмен, экстракционные кривые, режимные параметры, рабочая среда, пульсирующий поток, время релаксации, коэффициент массопередачи.*

STUDY OF MASS IN THE PERIODIC VIBRO EXTRACTION FROM PLANT MATERIAL (PART TWO)

Annotation. *The results of studies of the effect of low-frequency mechanical vibrations, as a source of turbulence-creating pulsating vibration alternating jets in the solid - liquid, the intensity of the mass transfer in a batch extraction from plant material. Generalization of the results experiments performed in the functional connectivity of origin, where as a functional taken time vtechenie which the concentration of the extractant to change in the "e" (the base of natural logarithms) times, and as a spatial unit - the distance at which time a functional change to the same extent . In these coordinates, it is possible to assess the level of mass transfer during the extraction.*

Key words: *vibroextraction, mass transfer, extraction curves, operating parameters, the working environment, pulsating flow, the relaxation time, the mass transfer coefficients-cient.*