

ENERGY INDICATORS OF CONTINUOUS VIBROEXTRACTION PROCESS

V. Zavialov, T. Misyura, V. Bodrov, N. Popova, J. Zaporozhets, V. Kostyuk
National University of Food Technologies

Key words:

*Vibroextraction
Energy consumption
Operating parameters
Hydraulic resistance
Work environment
Pulsating flow
Power
Phase separation*

ABSTRACT

The research deals with energy demands of continuous vibro-extraction process for plant material. It has been established that the application of vibro-mixing during the vibro-extraction process allows more efficient use of the energy invested per unit volume of the device, evenly distributing it to the cross section of the device. This data can be used to create a compact mass exchange device of high unit capacity. The method of calculating energy consumption for the process has been proposed.

Article history:

Received 14.12.2013
Received in revised form
27.12.2013
Accepted 15.01.2014

Corresponding author:

V. Zavialov
Email:
npnuht@ukr.net

ЕНЕРГЕТИЧНІ ПОКАЗНИКИ ПРОЦЕСУ БЕЗПЕРЕРВНОГО ВІБРОЕКСТРАГУВАННЯ

В.Л. Зав'ялов, Т.Г. Мисюра, В.С. Бодров, Н.В. Попова, Ю.В. Запорожець,
В.С. Костюк

Національний університет харчових технологій

У статті представлено дослідження енерговитрат на безперервний процес віброекстрагування із рослинної сировини. Встановлено, що вібраційне перемішування при віброекстрагуванні надає можливість більш ефективно використати енергію, що вкладається в одиницю робочого об'єму апарата, рівномірно розподіляючи її у поперечному перерізі апарата, що може бути використано під час створення компактних масообмінних апаратів великої одиничної продуктивності. Запропоновано методуку розрахунку енерговитрат на процес.

Ключові слова: *віброекстрагування, витрати енергії, режимні параметри, гідравлічний опір, робоче середовище, пульсуючий потік, потужність, розділення фаз.*

Відомо, що характер гідродинамічного потоку екстракційного процесу визначає одночасно ефективність його технологічної й енергетичної складових.

Разом з тим, незважаючи на достатню вивченість питання про витрати енергії в апаратах з мішалками, ґрунтовні дані з розрахунку енерговитрат при твердофазовому віброекстрагуванні на сьогодні відсутні [1].

Це стосується як математичних моделей та емпіричних рівнянь, так і відповідних методик розрахунку. У цьому контексті слід зазначити, що порядок розрахунку енерговитрат на процес суттєво залежатиме від конкретних конструктивних особливостей апарата, що визначають гідродинамічні умови процесу і, як наслідок, енергетичні витрати. Враховуючи особливості віброекстрагування цільових компонентів із рослинної сировини, за мету ставиться завдання встановити вплив режимних і конструктивних параметрів на енергетичні витрати в умовах безперервного процесу.

Порівняльна перевага віброекстракційного обладнання визначається гідродинамікою знакозмінних пульсуючих струмів, що генеруються віброперемішувальними пристроями і створюють оптимальні гідродинамічні умови для інтенсивного масообміну за рахунок рівномірної дисипації енергії у поперечному перерізі апарата з низьким повздовжнім перемішуванням [2]. Разом з тим, встановлення ефективності роботи віброекстракторів, цілеспрямоване конструювання й оптимізація їх режимних параметрів вимагає зіставлення прискорення процесу з витратами енергії на його інтенсифікацію. З метою об'єктивного порівняння ефективності роботи віброекстрактора за різних режимних параметрів необхідні порівняльні дослідження процесу екстрагування при однакових режимах.

У цьому контексті логічним буде припустити, що при віброекстрагуванні енергія витрачається на подолання сил інерції, що виникають при зворотно-поступальному переміщенні рухомих частин апарата, на переміщення уверх і вниз вібротранспортувальної системи й на подолання опору сил її тертя об робоче середовище. Дослідження витрат енергії на процес безперервного віброекстрагування здійснювалось на розробленій та виготовленій в умовах кафедри процесів і апаратів НУХТ моделі віброекстрактора безперервної дії за схемою, що наведена на рис.1. Установка складається із царг 1 з внутрішнім діаметром 0,3 м і висотою 0,4 м. Причому, перша й остання царги виготовлені з нержавіючої сталі, а решта, для можливості візуальних спостережень, з органічного скла. Для подачі в апарат подрібненої рослинної сировини нижня царга на рівні 0,2 м від дна з'єднана через шнек 4 із завантажувальним пристроєм 2, виконаним у вигляді u-подібної скляної труби діаметром 0,15 м з лійкою 3. Для подачі екстрагенту в останній верхній царзі закріплений душовий розподільувач 5 і розвантажувальний лоток 6.

Усередині колони розміщено врівноважений вібротранспортувальний пристрій, що складається із системи вертикальних штоків 7 із горизонтально закріпленими на них транспортувальними тарілками 8 спеціальної конструкції (залежно від виду рослинної сировини: трав'яного, листового, кореневого, плодово-ягідного, або зернового походження) [3, 4].

Тарілки діаметром 0,295 м закріплені на штоках по чергово та встановлені в корпусі апарата з мінімальним зазором по периферії, з можливістю регулювання їх кількості та відстані між ними через набір дистанційних втулок.

Низькочастотні механічні коливання передаються вібротранспортувальній системі через штоки 7 від вібропривода, що розміщений під рамою 12, на

якій встановлено апарат. Вібропривід (кривошипно-шатунний механізм) 17 сполучений через муфти 16 і редуктор 15 з електродвигуном постійного струму 14. Частота обертання електродвигуна і одночасно коливань вібротранспортувальної системи в межах до 10 Гц здійснювалась автотрансформатором типу ЛАТР–1–5, амплітуда — фіксовано (5; 10; 15)·10⁻³ м зміною довжини плеча кривошипно-шатунного механізму. Обертальний рух завантажувальному шнеку 4 від вібропривода передається через редуктор 18 та ланцюгову передачу 19. Герметичність місця введення вібрувальних штоків 7 в апарат через його дно забезпечується гумовими сильфонами 13. Для відбору проб екстрагенту для аналізу та відведення його з апарата в кожній царзі передбачено відбірні крани 9 і фільтр 10 з патрубком 11, оснащеним краном.

Віброекстрактор працює таким чином: через розподілювач 5 апарат заповнюється екстрагентом, що подається на рівень верхньої тарілки. Одночасно встановлюється запланований амплітудно-частотний режим коливання вібротранспортувальної системи. Підготовлена до екстрагування подрібнена рослинна сировина через завантажувальний пристрій 3 шнеком 4 подається під нижню тарілку 8, рухається безперервно вздовж апарата за допомогою вібротранспортувальних тарілок протитечійно екстрагенту з поступовим вилученням цільових компонентів і вивантажується з апарата у вигляді шроту (жому) через лоток 6. Готовий екстракт через фільтр 10 виводиться з апарата через патрубок 11. Протитечійне розділення фаз здійснюється за рахунок різниці гідравлічних опорів перетоку робочого середовища через транспортувальні відкриті елементи, фільтрувального ефекту через фільтрувальні елементи тарілок та седиментації часток твердої фази на їх поверхнях тарілок. Встановлений по периферії тарілок борт призначений для утримання твердої фази на їх поверхні, посилення розділювального ефекту фаз та запобігання від змиву дрібних фракцій твердої фази за межі під тарілку.

При вивченні зазначеного питання припускалось, що вібротранспортувальна тарілка являє собою нерухому систему гідравлічних опорів, через яку почергово в одному та іншому напрямках (уверх-униз) рухається потік робочого середовища. Так, загальні витрати енергії на процес можуть бути визначені за виразом:

$$N = \frac{n}{2}(N' + N'') + nN_3 + N_I, \quad (1)$$

де n — кількість вібротранспортувальних тарілок; N', N'' — витрати енергії на подолання гідравлічних опорів при русі робочого середовища вверх-униз через транспортувальні та фільтрувальні елементи тарілок, боковий зазор між корпусом апарата й тарілкою і на компенсацію дії сил інерції рухомих конструктивних елементів апарата. Разом з тим, слід згадати також про переважну конструктивну особливість розробленого віброекстрактора безперервної дії, що полягає у здвоєнні вібротранспортувальної системи (система двох штоків з почерговим закріпленням на них тарілок), що призводить до руху у протифазі однакових мас системи, а відтак — до мінімальних енергетичних витрат на переміщення цих мас.

Для розрахунку певної складової витрат енергії з урахуванням конструктивних і режимних параметрів роботи апарата можуть бути використані

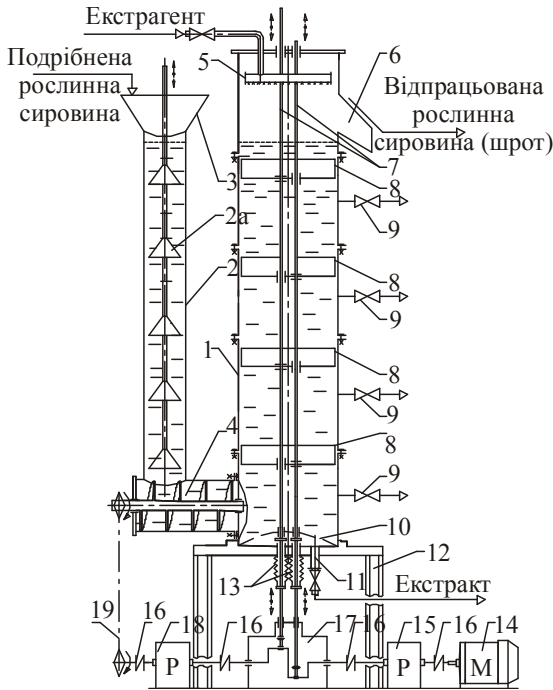


Рис.1. Схема експериментального віброекстрактора безперервної дії: 1 — корпус; 2 — завантажувальний пристрій; 3 — ліяка; 4 — шнек; 5 — розподільчач екстрагенту; 6 — розвантажувальний лоток; 7 — система штоків; 8 — система транспортувальних тарілок; 9 — пробовідбірник; 10 — фільтр екстракту; 11 — патрубок; 12 — опора; 13 — сильфон; 14 — електродвигун; 15 — редуктор; 16 — муфта; 17 — вібропривід; 18 — редуктор; 19 — ланцюгова передача

$\xi_{\text{вх}_i}$, $\xi_{\text{р}_i}$, $\xi_{\text{вих}_i}$ — коефіцієнти місцевих гідравлічних опорів відповідно на вході, при миттєвому розширенні і на виході з елементів тарілки, що розглядаються; $w_0 = 2Af(1-\varepsilon)/\varepsilon$ — початкова середньоінтегральна за період коливань швидкість пульсуючих потоків, що забезпечує транспортування робочого середовища через елемент тарілки; A, f — амплітуда та частота коливань; ε — відносний загальний вільний переріз тарілки; $Q_i^{(c)}$ — об'ємні витрати робочого середовища через елемент тарілки, що розглядається; H, d_{e_i} — довжина поверхні тертя елемента, через який рухається робоча суміш і еквівалентний діаметр елемента тарілки, що розглядається; λ — коефіцієнт опору тертя між середовищем і поверхнею елемента тарілки.

Слід зазначити, що в рівнянні (4) внаслідок малої величини співвідношення $\lambda_i H_i/d_{e_i}$ логічним буде його врахування лише у випадку розрахунку ви-

відповідні рівняння. Так, наприклад, для визначення витрат енергії на подолання гідравлічних опорів тарілки при русі уверх (N') — вниз (N''):

$$N' = n_1 N'_1 + n_2 N'_2; \quad (2)$$

$$N'' = n_1 N''_1 + n_2 N''_2, \quad (3)$$

де n_1, n_2 — відповідно кількість транспортувальних і фільтрувальних елементів на одній тарілці; N'_1, N'_2, N''_1, N''_2 — відповідно витрата енергії на подолання опору одного транспортувального й одного фільтрувального елемента при русі тарілки уверх і униз.

Тобто загальний вигляд рівняння для розрахунку цих складових матиме вигляд:

$$N_i^{(c)} = Q_i^{(c)} \cdot \Delta p_i^{(c)} = w_0 \frac{\pi d_{e_i}^2}{4} \cdot \Delta p_i^{(c)}, \quad (4)$$

$$\text{де } \Delta p_i^{(c)} = \rho \frac{w_0^2}{2} \left(\lambda_i \frac{H_i}{d_{e_i}} + \xi_{\text{вх}_i} + \xi_{\text{р}_i} + \xi_{\text{вих}_i} \right) \text{ — перепад тиску по обидві сторони тарілки;}$$

трати енергії при перетоку робочого середовища через транспортувальний елемент з патрубком висотою $H_{\text{п}}$ та витрати енергії на подолання гідравлічного опору при русі робочого середовища через периферійний зазор між тарілкою з бортом висотою H_6 і корпусом апарата.

За аналогією [5, 6] сила інерції віброперемішувальної системи, тобто інерційна складова витрати енергії N_I , має враховувати масу тарілки, штока, відповідних кріплень тарілки та виштовхуючу із середовища силу, що діє на занурену в робоче середовище систему:

$$P_I = \frac{m_{\text{т}} + m_{\text{в}}}{g \cdot \rho_{\text{т}}} (\rho_{\text{т}} - \rho_{\text{с}}) \cdot \frac{d^2 S}{dt^2}, \quad (5)$$

де $\rho_{\text{т}}$ — густина конструкційних матеріалів, кг/м^3 ; $\rho_{\text{с}}$ — густина робочого середовища, кг/м^3 ; $\frac{d^2 S}{dt^2} = -2\pi^2 f^2 A \sin \beta$ — прискорення рухомої системи кривошипно-шатунного механізму, що рухається з кутовою швидкістю $\frac{dS}{dt} = \pi A \cos \beta$ (див. кінематичну схему на рис.2).

Тоді,
$$P_I = \frac{m_{\text{т}} + m_{\text{в}}}{g \cdot \rho_{\text{т}}} (\rho_{\text{т}} - \rho_{\text{с}}) \cdot 2\pi^2 f^2 A \sin \beta. \quad (6)$$

Остаточно, враховуючи зазначене, отримаємо:

$$N = \frac{w_0 \pi d^2 n}{8} \cdot \sum P_I^{(n)} + N_3 + \frac{m_{\text{т}} + m_{\text{в}}}{g \cdot \rho_{\text{т}}} (\rho_{\text{т}} - \rho_{\text{с}}) \cdot 2\pi^2 f^2 A \sin \beta. \quad (7)$$

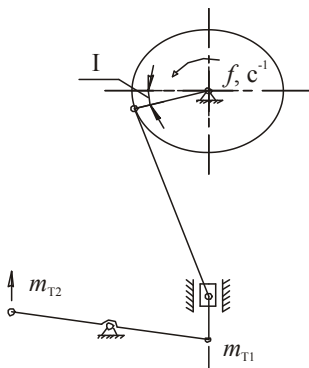


Рис.2. Кінематична схема кривошипно-шатунного механізму:
 $m_{\text{т}1} = m_{\text{т}2}$ — відповідно до маси вібротранспортувальних систем, що рухаються у протифазі

Слід зазначити, що для віброекстрактора безперервної дії вимогою конструктивного виконання вібротранспортувальної тарілки є виготовлення та встановлення її у корпусі апарата з мінімальним зазором по периферії. Для таких апаратів є можливим при розрахунку витрати енергії не враховувати складову N_3 — витрати енергії на подолання гідравлічних опорів при русі робочого середовища уверх – униз через боковий зазор по периферії тарілки.

Дослідження витрати енергії на безперервний процес у системі капронова

дрібка — вода виконувалось на моделі вібраційного екстрактора, показаного на рис.1, за принциповою схемою електровимірювань (рис.3). При цьому, співвідношення рідкої та твердої фаз при температурі 293 К змінювалось від 0,25 до 0,85. Частота коливань вібротранспортувальної системи змінювалась

у межах 1—10 Гц; амплітуда коливань фіксувалась на значеннях (5, 10, 15)·10⁻³ м.

Встановлення зв'язку між параметрами коливань робочих органів і витратою енергії на створення коливань, а також дослідження енерговитрат на турбулізацію двофазової суміші в робочому об'ємі апарата віброперемішувальними робочими пристроями різних конструкцій [1, 2] здійснювалось у системі чайна сировина — вода за коефіцієнтом розчинення модельних зразків сірчаноокислого алюмінію за методикою, описану у [3].

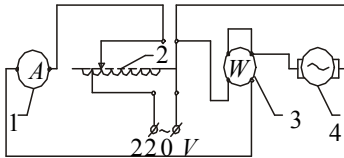


Рис.3. Принципова схема лабораторних електровимірювань: 1 — амперметр; 2 — автотрансформатор (ЛАТР); 3 — ваттметр; 4 — електродвигун

роперемішуванні, Вт; $I_{роб}$, $N_{роб}$ — сила струму і потужність, необхідна для виконання роботи під час робочого ходу, А, Вт; I_x , N_x — сила струму і потужність, необхідна для виконання роботи холостого ходу, А, Вт; $R = 20$ Ом — активний опір електродвигуна привода установки.

Результати дослідів узагальнювались у вигляді залежностей питомої витрати споживаної електронергії на процес для різних режимних параметрів роботи апарата від інтенсивності ($A:f$) коливань вібротранспортувальної системи (рис.4). Представлені графіки залежності переконливо свідчать, що найбільш суттєвий вплив на витрату енергії при віброперемішуванні (розділенні фаз) має амплітуда коливань вібросистеми. Крім того, характер кривих спонукає до висовку щодо оптимізації процесу.

Тобто з трьох амплітуд коливань найбільш вигідною залиається амплітуда 10·10⁻³ м. Крім того, мінімальні енерговитрати за всіма трьома графіками визначають і оптимальні частоти коливань. Так, для амплітуди 5·10⁻³ м оптимальна інтенсивність коливань складає 40 м/с, що відповідає частоті 8 Гц; для амплітуди 10·10⁻³ м оптимальна інтенсивність коливань — 30 м/с при частоті 3 Гц; для амплітуди 15·10⁻³ м — інтенсивність 43 м/с при частоті 2,7 Гц.

Потужність, необхідна для виконання роботи при віброперемішуванні, визначалась електричним методом за різницею потужностей робочого і холостого ходу (без робочого середовища) з урахуванням втрат на активний опір двигуна за рівнянням:

$$N = N_{роб} - N_x - (I_{роб}^2 - I_x^2)R, \quad (8)$$

де N — загальна потужність, необхідна для виконання роботи при вібро-

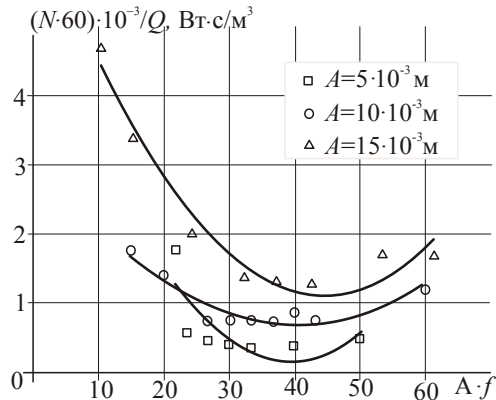


Рис.4. Залежність питомої споживаної електроенергії від інтенсивності коливань вібротранспортувальної системи при безперервному процесі віброекстрагування

Отже, результати дослідів підтверджують, що протитечійне вібраційне розділення фаз забезпечує збільшення кількості енергії, що ефективно вкладається в одиницю робочого об'єму апарата, за рахунок рівномірного її розподілення у поперечному перерізі. Саме цей ефект дає підстави зробити висновок про можливість розроблення віброекстракторів великої одиничної продуктивності.

Стосовно порівняння енергетичних витрат на процес при перемішуванні іншими способами, наприклад, механічним обертовим способом, який використовується у традиційних екстракторах, слід зазначити, що багаторічним досвідом застосування та дослідження пульсаційної й вібраційної масообмінної апаратури у хімічній промисловості вченими С. М. Карпачевою, І. Я. Городецьким А. А. Васіним, В. М. Олевським та їх співробітниками [5, 6, 7, 8] доведено, що енергетичні витрати на пульсацію та вібрацію робочого середовища на одиницю виробленої продукції нижчі, ніж в інших апаратах з додатковою подачею енергії, або близькі до них. Пояснюється це тим, що двигун пульсатора або вібратора споживає 0,25—1 кВт і для великих апаратів це малопомітно [5, 6]. Крім того, у даному випадку при безперервному віброекстрагуванні використовується врівноважена вібросистема з порівняно малою амплітудою коливань, а у випадку періодичного процесу, навіть з проміжним віджимом твердої фази, низькі частоти. Отже, створена періодична та безперервно діюча екстракційна апаратура в результаті проведених досліджень є конкурентоспроможною порівняно з іншою, аналогічного призначення апаратурою, за всіма показниками її роботи.

Висновки

Отже, вібраційне перемішування надає можливість більш ефективно використати енергію, що вкладається в одиницю робочого об'єму апарата, рівномірно розподіляючи її у поперечному перерізі апарата, що може бути використано під час створення компактних масообмінних апаратів великої одиничної продуктивності.

Разом з тим встановлено, що оптимальними режимними параметрами для безперервного процесу, які забезпечують належне розділення фаз з низькими енерговитратами, є амплітуда коливань від $10 \cdot 10^{-3}$ до $15 \cdot 10^{-3}$ м при частоті до 4 Гц залежно від виду рослинної сировини.

Література

1. Белоглазов И.Н. Твердофазные экстракторы: инженерные методы расчета / И.Н. Белоглазов. – Л.: Химия, 1985. – С. 42—49.
2. Дослідження процесу віброекстрагування із рослинної сировини та перспективи його використання в промисловості. / Т.Г. Мисюра, Н.В. Попова, В.С. Бодров, В.Л. Зав'ялов, Ю.В. Запорожець, В.Є. Деканський // Харчова промисловість. — № 12. — Київ: НУХТ, 2012. — С. 260—268.
3. Патент 92851 Україна, МПК6 B01D 11/02 (2009). Вібраційний екстрактор / Зав'ялов В.Л., Бодров В.С., Мисюра Т.Г., Попова Н.В.; заявник і патентовласник Національний університет харчових технологій. — № а200907181; заявл. 09.07.2009; опуб. 10.12.2010, Бюл. № 23.

4. Патент 46540 Україна, МПК6 B01D 11/02 (2009). Вібраційний екстрактор / Зав'ялов В.Л., Бодров В.С., Мисюра Т.Г., Попова Н.В.; заявник і патентовласник Національний університет харчових технологій. — № u200907179; заявл. 09.07.2009; опуб 25.12.2009, Бюл. № 24.

5. *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.

6. *Плановский А.Н.* Процессы и аппараты химической и нефтехимической технологии. / А.Н. Плановский, П.И. Николаев. — М., Химия, 1972.

7. *Карпачева С.М.* Применение пульсационной техники для интенсификации химического производства / С.М. Карпачева, Л.С. Рагинский, Л.П. Хорхорина // Журнал прикладной химии. — 1986. — № 9. — С. 195.

8. *Карпачева С.М., Рябчикова Б.Е.* Пульсационная аппаратура химической технологии. — М.: Химия, 1983. — 224 с.

ЭНЕРГЕТИЧЕСКИЕ ПОКАЗАТЕЛИ ПРОЦЕССА БЕСПРЕРЫВНОГО ВИБРОЭКСТРАГИРОВАНИЯ

**В.Л. Завьялов, Т.Г. Мисюра, В.С. Бодров, Н.В. Попова, Ю.В. Запорожец,
В.С. Костюк**

Національний університет пищевых технологий

В статье представлены результаты исследования энергозатрат на непрерывный процесс виброэкстрагирования из растительного сырья. Установлено, что вибрационное перемешивание при виброэкстрагировании позволяет более эффективно использовать энергию, вкладываемую в единицу рабочего объема аппарата, равномерно распределяя ее в поперечном сечении аппарата, и может быть использовано при создании компактных массообменных аппаратов большой единичной производительности. Предложена методика расчета энергозатрат на процесс.

Ключевые слова: виброэкстрагирование, расход энергии, режимные параметры, гидравлическое сопротивление, рабочая среда, пульсирующий поток, мощность, разделение фаз.