

УДК 664.34

ЗАСТОСУВАННЯ ВІБРОЕКСТРАКТОРІВ З ГІДРОІМПУЛЬСНИМ ПРИВОДОМ У СИСТЕМІ «ТВЕРДЕ ТІЛО – РІДИНА»

Берник І. М., к.т.н., доцент,
завідувач кафедри харчових технологій і мікробіології
Вінницький національний аграрний університету, м. Вінниця
ORCID ID: 0000-0002-1367-3058

Кутняк М. М., аспірант,
Вінницький національний технічний університет, м. Вінниця
ORCID ID: 0000-0003-0885-5006

Коц І. В., к.т.н., доцент,
завідувач науково-дослідної лабораторії гідродинаміки
Вінницький національний технічний університет, м. Вінниця
ORCID ID: 0000-0003-0870-6385

<https://doi.org/10.31073/foodresources2019-12-02>

Дана стаття присвячена дослідженню, яке спрямоване на вдосконалення методів інтенсифікації технологічних масообмінних процесів з використання низькочастотних механічних коливань, зокрема, при здійсненні процесів екстрагування рослинної сировини у харчовій промисловості. Вібраційний вплив сприяє руйнуванню сировини, яка екстрагується під дією знакозмінних перепадів тиску, що, в свою чергу, зменшує внутрішній дифузійний опір. У випадку використання такого методу в процесах вилучення спостерігається підвищення повноти екстракції цільових компонентів, прискорення протікання процесів масообміну та в більшості випадків – зниження енергетичних витрат. Авторами проведено аналітичний огляд відомих екстракційних апаратів, за результатами якого встановлено, що переважна більшість подібного устаткування потребує значних енергетичних затрат, має відносно великі габарити та масу, суттєві ускладнення, що пов'язані з керуванням робочими параметрами устаткування. На підставі розглянутих принципів дії відомого устаткування і встановлених його основних недоліків, які потребують вдосконалення, авторами запропоноване нове конструктивне рішення віброекстрактора з дистанційно керованим гідроімпульсним приводом. Основною особливістю роботи запропонованого гідроімпульсного віброприводу приведення в коливальний рух перфорованих тарілок віброекстрактора є можливість створення асиметричного дистанційного керованого за амплітудою та частотою переміщення тарілок, що сприяє підвищенню інтенсифікації силової взаємодії з оброблюваною рослинною сировиною. На інтенсифікацію масообмінних процесів також спрямоване виконання перфорованих отворів у вигляді гідравлічних насадків, при перетіканні потоків рідини через які може виникати кавітація. Складена математична модель динаміки робочого процесу гідроімпульсного приводу обладнання. Виведені узагальнені функціональні залежності, що зв'язують між собою основні параметри привідної гідросистеми і конструкції гідропривідного вузла активатора коливального руху, які придатні для практичних розрахунків при попередній оцінці та виборі їхніх раціональних величин на стадії ескізного проектування.

Ключові слова: екстрагування, віброекстрактор, гідроімпульсний привід, гідравлічні насадки, рослинна сировина, математична модель робочого процесу, кавітація

APPLICATION OF VIBROEXTRACTORS WITH A HYDROPULSE DRIVE FOR APPLICATION IN THE SYSTEM «SOLID BODY-LIQUID»

Bernyk I., PhD, Associate Professor,
Head of Microbiology and Processing Technology Department,
Vinnytsia National Agrarian University, Vinnytsia, Ukraine

ORCID ID: 0000-0002-1367-3058

Kutnyak M., Postgraduate Student,
Vinnytsia National Technical University, Vinnytsia, Ukraine

ORCID ID: 0000-0003-0885-5006

Kots I., PhD, Associate Professor,
Head of Research Laboratory for Hydrodynamics,
Vinnytsia National Technical University, Vinnytsia, Ukraine

ORCID ID: 0000-0003-0870-6385

<https://doi.org/10.31073/foodresources2019-12-02>

This article is devoted to research aimed at improving the methods of intensification of technological mass transfer processes using low frequency mechanical oscillations, in particular, in the process of extraction of plant raw materials in the food industry. Vibrational effects contribute to the destruction of raw material, which is extracted under the influence of alternating pressure differences, which in turn reduces the internal diffusion resistance. In the case of the use of such a method in extraction processes, there is an increase in the completeness of the extraction of the target components, the acceleration of the process of mass transfer and, in most cases, the reduction of energy costs. The authors carried out an analytical review of known extraction machines, the results of which found that the vast majority of such equipment requires significant energy costs, has relatively large dimensions and mass, significant complications associated with the management of the operating parameters of the equipment. On the basis of the considered principles of the operation of the known equipment and its basic defects, which require improvement, the authors propose a new constructive decision of the vibroextractor with a remotely controlled hydropulse drive. The main feature of the proposed hydropulse vibration drive is the introduction of the vibrational movement of perforated plates of the vibroextractor into the possibility of creating an asymmetric remote-controlled amplitude and frequency of the plates moving, which contributes to the intensification of power interaction with the processed plant material. The intensification of mass-exchange processes is also aimed at the implementation of perforated openings in the form of hydraulic nozzles, with the flow of fluid flows through which may be accompanied by the emergence of cavitation. The mathematical model of the dynamics of the working process of the hydropulse drive of the equipment is made. The generalized functional dependences are derived, which connect the main parameters of the drive hydraulic system and the structure of the hydraulic actuator node of the oscillator activator node, which are suitable for practical calculations with a preliminary estimation and the choice of their rational values at the stage of sketch design.

Key words: extraction, vibroextractor, hydropulse drive, hydraulic nozzles, plant raw material, mathematical model of working process, cavitation

Постановка проблеми. Велике значення для політики енергозбереження України має сектор харчового виробництва. Це пояснюється тим, що харчова промисловість є великим споживачем енергетичних ресурсів. Переважна більшість масообмінних процесів харчових виробництв потребує значних енергетичних затрат, зокрема, й екстрагування.

Переробка рослинної сировини, в основу якої покладено процес екстрагування, є перспективним способом вилучення цільових компонентів, приготування настоїв,

екстрактів тощо [1, 2]. Масштаби сучасного переробного та харчового виробництва разом з їх енергозатратністю дозволяють з впевненістю стверджувати, що розробка енергоефективного обладнання у цих галузях є перспективною.

Аналіз досліджень і публікацій. При створенні високоефективних апаратів, часто використовують принцип підведення енергії ззовні. Одним з ефективних способів підведення додаткової зовнішньої енергії є накладення на взаємодіючі фази коливань [3]. Такий вплив на середовище відзначається високою ефективністю при відносно незначних габаритах обладнання, оскільки зовнішня енергія може рівномірно розподілятися по робочому об'єму апарату. Окрім того, рух перфорованої вібраційної тарілки в апараті здійснюється по заздалегідь визначеному закону, з встановленою частотою та амплітудою, що, в свою чергу, створює знакозмінний рух середовища. Проходження оброблювального середовища через перфорацію тарілок супроводжується зміною тиску, що призводить до інтенсифікації проникнення екстрагенту у шар матеріалу, і, як наслідок, до рослинної частинки. Таким чином, створюються умови для підвищення швидкості оновлення поверхні контакту фаз, прискорення проникнення екстрагенту в пори твердої фази. Ці та інші ефекти сприяють зниженню зовнішньодифузійного опору і прискоренню масопереносу всередині капілярно-пористих тіл.

Поле низькочастотних коливань може накладатись на середовище за рахунок коливань корпусу апарату, проте слід зважати на те, що даний спосіб потребує значних затрат енергії [4]. Характерна ознака обладнання, що реалізує накладення на взаємодіючі фази низькочастотних коливань, є наявність вібраційних насадок.

Вібраційні апарати, що мають місце у промисловому виробництві, є великогабаритними та потужними. Одним з найпоширеніших приводів таких машин є інерційний привід на основі дебалансних та ексцентрикових віброзбудників [5, 6]. Їх основною перевагою є компактність при великій рушійній силі, відносній легкості їх розрахунку та простоті застосування.

Недоліки інерційного приводу наступні: складність регулювання амплітуд коливань робочих органів під час роботи машини; тривалий час «розгону» та зупинки; складність синхронізації декількох віброзбудників; низька надійність; небезпечність роботи біля машин з відкритими віброзбудниками; порівняно висока вартість обладнання.

Варто відмітити, що поширення використання віброекстракторів в різних галузях харчової, фармацевтичної та хімічної промисловості стримується складністю гідродинаміки всередині апарату, недостатньою вивченістю їх масообмінних характеристик, що ускладнює конструювання і масштабування нових апаратів.

Мета статті. В основу досліджень поставлено мету розробки конструкції вібраційного екстрактора з віброприводом, який зможе забезпечити необхідні робочі параметри роботи обладнання з різною рослинною сировиною, буде енергоефективним, надаватиме змогу дистанційного керування амплітудою та частотою, володітиме необхідною гнучкістю у підборі робочих параметрів.

Виклад основного матеріалу. Найбільш поширеним приводом переважної більшості віброекстракторів є інерційний на основі дебалансних віброзбудників та привід з ексцентриком. Подібна популярність виникла завдяки їх компактності при великій рушійній силі, відносній легкості їх розрахунку та простоті застосування.

Проте, незважаючи на своє широке застосування, ексцентрикові та дебалансні віброзбудники мають і низку недоліків [7]:

- складність регулювання амплітуд коливань робочих органів під час роботи машин, що обмежує їх використання на автоматичних ділянках виробництва;
- значний час виходу на номінальні режими роботи зі стану спокою і тривалий час зупинки;

- білярезонансний робочий режим роботи, тобто примусової синхронізації руху двох і більше дебалансів, що може привести до їх руйнування внаслідок значних динамічних навантажень;

- встановлення спеціальних технічних засобів для примусової синхронізації або дотримання певних конструктивних параметрів для самосинхронізації віброзбудників;

- низька надійність та безпечність роботи біля обладнання з відкритими дебалансами.

Недоліками більшості існуючих апаратів є складність та металоємність конструкції; підвищені енергетичні затрати, пов'язані з необхідністю роботи живильного шнека; необхідність узгодження параметрів роботи живильного шнека та вібропривідної системи; складність регулювання робочих параметрів електромеханічного приводу для забезпечення ефективної роботи вібротурбулізуючої системи, що впливає на якість оновлення поверхні фазового контакту системи «тверде тіло – рідина» та, як наслідок, якість та продуктивність процесу екстрагування.

В основу розробленої конструкції поставлено завдання створення вібраційного екстрактора, в якому за рахунок введення нових елементів та їх розташування досягається зниження металоємності, експлуатаційних енергозатрат та спрощуються експлуатаційні умови, досягається збільшення якості та продуктивності вилучення ключових компонентів за рахунок гнучкості регулювання віброприводу та підбору оптимальних робочих параметрів, що підвищує якість процесу екстрагування.

Вібраційний екстрактор складається з вертикального корпусу з пристроєм введення і виведення фаз, який встановлений в корпусі, з можливістю поздовжнього зворотно-поступального руху, що представлений рухомим штоком з закріпленими на ньому тарілками з перфорованими отворами для проходу фаз, у пристроях введення та виведення фаз розміщені односторонні клапани, а перфоровані отвори виконані у вигляді гідравлічних насадок. На кришці циліндричного корпусу розміщений гідроциліндр з'єднаний напірним трубопроводом з імпульсним клапаном керування, який встановлено з можливістю періодичного відкривання-закривання для зв'язку напірного трубопроводу і з'єднання його зі зливом, окрім того, напірний трубопровід з'єднаний з гідронасосом.

Вібраційний екстрактор працює так. Суміш твердої та рідкої фаз подається у вертикальний корпус 1 екстрактора через пристрій введення фаз 2, у якому розміщений односторонній клапан 6 (рис. 1, 2).

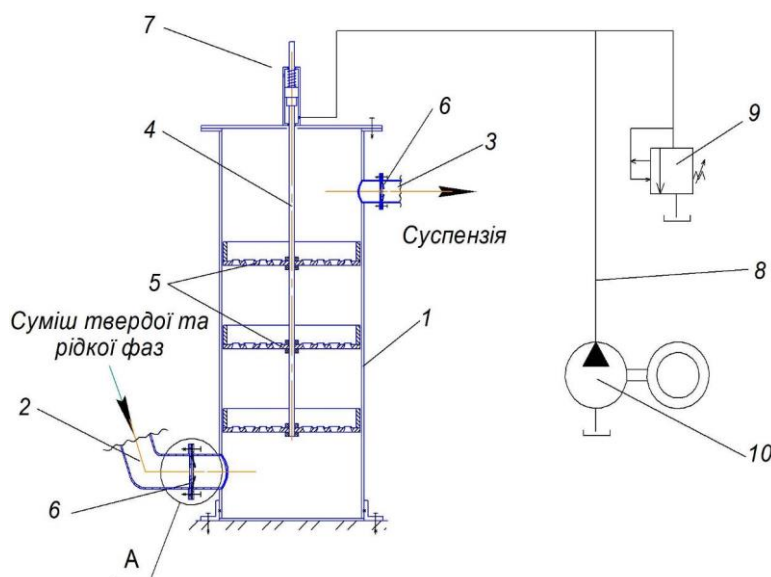


Рис. 1. Схема вібраційного екстрактора

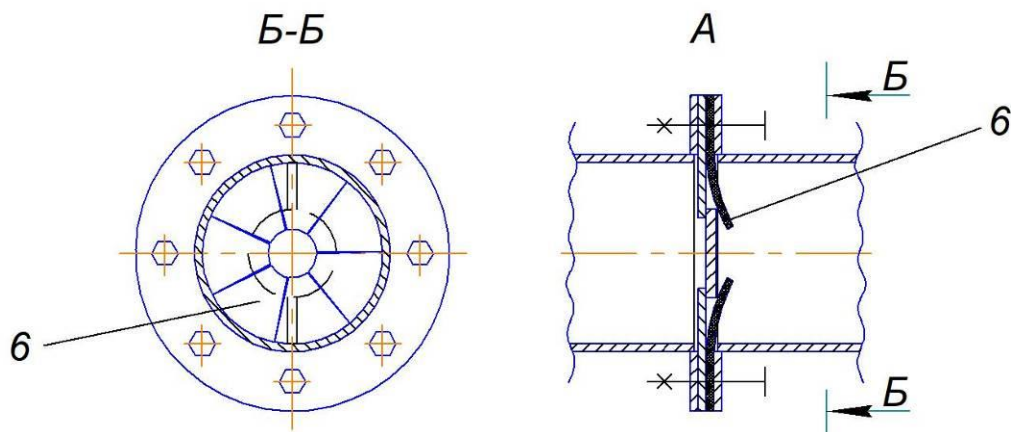


Рис. 2. Конструкція одностороннього клапана

Потрапляючи у нижню частину корпусу 1, суміш піддається вібраційному впливу тарілок 5, які закріплені на штоку 4. При руху тарілок 5 вниз, об'єм нижньої частини вертикального корпусу екстрактора 1 у якому знаходиться суміш твердої та рідкої фаз, зменшується, а тиск, відповідно, зростає, на відміну від решти об'єму вібраційного екстрактора, що призводить до перекриття пристрою введення фаз 2 одностороннім клапаном 6, та перетікання суміші твердої та рідкої фаз через перфоровані отвори у тарілках 5 у простір над ними. Рух тарілок 5 вверх призводить до збільшення об'єму та зниження тиску нижньої частини вертикального корпусу екстрактора 1, що спричиняє відкриття одностороннім клапаном 6, пристрою введення фаз 2. Перетікання суміші у нижню частину екстрактора відбувається також із простору над тарілками 5. Проте, зважаючи на те, що перфоровані отвори тарілок 5 виконані у вигляді гідравлічних насадок і мають різний гідравлічний опір, перетікання через них середовища у взаємно протилежних напрямках має незначний вплив, порівняно з надходженням суміші твердої та рідкої фаз через пристрій введення фаз 2.

Гідравлічний вібропривод працює так. Вмикають привідний гідронасос 10 та налаштовують діапазон спрацювання імпульсного клапана керування 9. При вмиканні привідного гідронасоса 10, робоча рідина під тиском по напірному трубопроводу 8 потрапляє в робочу порожнину гідроциліндра 7. Під дією робочої рідини поршень гідроциліндра 7 приводить у рух скріплений з поршнем гідроциліндра підпружинений шток 4 (здійснюється прямий хід). Коли тиск робочої рідини досягає певного налаштованого значення, відбувається спрацювання імпульсного клапана керування 9, який з'єднує напірний трубопровід 8 зі зливом в бак, внаслідок цього підпружинений шток 4 гідроциліндра 7 здійснює зворотний хід. У результаті вібраційні тарілки 5, що закріплені на рухомому штоку отримують силовий імпульс у вигляді прискореного руху, який активно чинить силовий вплив на суміш.

Застосування для збудження направлених вертикальних прямолінійних асиметричних коливань забезпечує підвищення ефективності силової взаємодії вібраційних тарілок з рослинною сировиною, а завдяки тому, що запропонована конструкція виконана з можливістю регулювання амплітуди коливань робочих органів під час роботи машини та з можливістю дистанційного керування робочими параметрами, стає можливим створення таких умов роботи вібротурбулізуючої системи, які забезпечують якісне оновлення поверхні фазового контакту системи екстрагент-сировина і в кінцевому рахунку підвищують якість та продуктивність всього процесу екстрагування.

У запропонованій конструкції віброекстрактора потоки, що виникають за рахунок перетікання суміші через отвори тарілок при їх коливальному русі, пропорційні швидкості руху тарілок.

Коливання і швидкості руху тарілок можна описати системою рівнянь умовно розбивши їх переміщення на фази:

I фаза:

$$\begin{cases} M \cdot \frac{d^2 z}{dt^2} + \alpha \cdot \frac{dz}{dt} + R_{Tp} \operatorname{sign}\left(\frac{dz}{dt}\right) + c(z_0 - z) - Mg = pF_{nl}, \\ Q_H = F_{nl} \frac{dz}{dt} + \frac{dp}{dt}(W_0 + F_{nl} \cdot z)\beta; \end{cases} \quad (1)$$

при $t = 0$, $z = z_0$, $\frac{dz}{dt} = 0$, $p = p_0$,

при $t = t_1$, $z = z_k$, $\frac{dz}{dt} = 0$, $p = p_H$;

II фаза:

$$\begin{cases} M \cdot \frac{d^2 z}{dt^2} + \mu \cdot \frac{dz}{dt} + R_{Tp} \operatorname{sign}\left(\frac{dz}{dt}\right) + pF_{nl} + Mg = c[(z_0 + z_k) - z], \\ \mu \cdot f_{оме} \sqrt{p - p_{зл}} = Q_H + F_{nl} \cdot \frac{dz}{dt} + \frac{dp}{dt}(W_0 + F_{nl} \cdot z)\beta; \end{cases} \quad (2)$$

при $t = t_1$, $z = z_k$, $\frac{dz}{dt} = 0$, $p = p_H$,

при $t = t_2$, $z = z_0$, $\frac{dz}{dt} = 0$, $p = p_{зл}$.

де M – приведена рухома маса;

z , $\frac{dz}{dt}$, $\frac{d^2 z}{dt^2}$ – переміщення, швидкість та прискорення відповідно;

α – коефіцієнт в'язкого тертя;

R_{Tp} – сила сухого тертя;

c – приведена жорсткість пружних елементів;

p – поточний тиск в гідросистемі;

F_{nl} – ефективна площа плунжера;

Q_H – продуктивність привідного гідронасоса;

W_0 – початковий об'єм гідросистеми;

β – коефіцієнт податливості гідросистеми;

$f_{оме}$ – ефективна площа зливного отвору;

$p_{зл}$ – зливний тиск в гідросистемі;

μ – коефіцієнт витрат.

Потік суміші через тарілки Q_R , $\text{м}^3/\text{с}$, повинен бути пропорційний швидкості тарілки, але спрямований у протилежний бік:

$$Q_R = -\xi_6 \cdot S_E \cdot \frac{dz}{dt}, \quad (3)$$

де ξ_s – коефіцієнт, що враховує можливі витрати при перетіканні суспензії через тарілки;

S_E – площа поперечного перерізу корпусу екстрактора, m^2 .

Обмінний потік вважається позитивним, якщо його напрямок збігається з напрямком основного потоку суміші Q (знизу вгору).

Розв'язок системи рівнянь (1) та (2) дозволить знайти швидкість зміни об'єму нижньої комірки екстрактора, а отже і об'єму суспензії, що буде витіснена цим рухом, що, в свою чергу, дозволяє оцінити витрату суміші рідкої та твердої фаз через вібраційні тарілки в загальному та окремо через кожну з насадок.

Одним з методів інтенсифікації процесу екстрагування є екстрагування при багатократному впливі на рослинний матеріал точкових імпульсів тиску. Імпульси тиску виникають внаслідок кавітації, різкому закипанню перегрітої рідини, співударів частинок рослинного матеріалу між собою або з робочими органами екстракційних апаратів та в інших випадках [8].

Перетікання потоку рідини через насадки вібраційних тарілок супроводжується перепадами тиску внаслідок зміни площі поперечного перерізу, процес перетікання оброблювальної суспензії може супроводжуватись виникненням кавітації.

Для того, щоб оцінити кавітаційні ефекти, що можуть виникати в процесі роботи апарата, пропонуємо розглянути число кавітації [9]. Фізична суть числа кавітації полягає у співвідношенні повного тиску, що призводить до сплескування кавітаційної каверни, до швидкісного напору цього потоку:

$$\chi = 2 \frac{p_3 - p_n}{\rho_c v_2^2}, \quad (4)$$

де p_3 – абсолютний тиск, Па;

p_n – тиск насиченої пари, Па;

ρ_c – густина рідкої фази, kg/m^3 ;

v_2 – швидкість потоку рідкої фази на виході з найвужчої ділянки насадки, м/с.

Зміна тиску у насадках перфорованих тарілок пов'язана зі зміною швидкості течії. Швидкісний напір розглядається як величина, що визначає падіння тиску, внаслідок чого відбувається утворення та зростання кавітаційної каверни. Таким чином, число кавітації це співвідношення тиску, під дією якого відбувається сплескування кавітаційних каверн, до величини тиску їх утворення та зростання.

Висновки

В сучасних апаратах для реалізації масообмінних процесів переробних та харчових виробництв, зокрема для реалізації процесу екстрагування в системі «рослина сировина – екстрагент», використовують принцип підведення енергії ззовні шляхом накладання на технологічне середовище низькочастотних коливань.

Запропоновано конструкцію вібраційного екстрактора з направленими вертикальними асиметричними прямолінійними коливаннями, що забезпечує підвищення ефективності взаємодії вібраційних тарілок з рослинною сировиною. Конструктивно у віброекстракторі можливе регулювання амплітуди та частоти коливань робочих органів при дистанційному керуванні робочими параметрами.

Аналітичні залежності, що отримані в роботі рекомендуються для оцінки витрат рідкої та твердої фаз через вібраційні тарілки в загальному, а також окремо через кожну з насадок. Інтенсифікацію процесу доцільно реалізувати за рахунок точкових імпульсів тиску.

Бібліографія

1. Аксельруд Г. А., Лысянский В. М. Экстрагирование (система «твердое тело – жидкость»). Ленинград: Химия, 1974. 256 с.
2. Берник І. М. Інтенсифікація процесу екстрагування рослинної сировини з використанням ультразвукової кавітації. Техніка, енергетика, транспорт АПК. 2017. № 3 (98). С. 69–73.
3. Nazarenko I., Luhovskyi O., Bernyk I., Svidersky A. Research of the influence of low-frequency and high- frequency actions on processing of technological environments. EUREKA: Physics and Engineering. 2018. №1. P. 73–86.
4. Городецкий, И. Я., Васин А. А., Олевский В. М., Лупанов П. А. Вибрационные массообменные аппараты; под ред. В. М. Олевского. Москва: Химия, 1980. 192 с.
5. Мищенко В. Я. Применение вибрационных технологий в массообменных процессах в пищевой и перерабатывающей промышленности. Современные наукоемкие технологии. 2013. №1. С. 123.
6. Баранов В.Н., Захаров Ю.Е. Электрогидравлические и гидравлические вибрационные механизмы. Москва: Машиностроение, 1977. 326 с.
7. Симонюк В. П. До особливостей вибору приводу вібротрибів з метою покращення перемішування робочих сумішей у вібробункері. Міжвузівський збірник «Наукові нотатки». 2013. 42. С. 262-266.
8. Бабенко Ю.И., Иванов Е.В. Экстрагирование. Теория и практические приложения. Санкт-Петербург: НПО «Профессионал», 2009. 334 с.
9. Бауман К.В., Коц І.В. Кавітаційна технологія виготовлення бітумних емульсій. Вінниця: ВНТУ, 2013. 128 с.

References

1. Akselrud H., Lysyansky V. (1974). Ékstrahyrovanye (systema «tverdoe telo – zhydkost'») [Extraction (the system «solid-liquid»)]. Leningrad: Khymyya, 256 p. [in Russian].
2. Bernyk I. (2017). Intensyfikatsiya protsesu ekstrahuvannya roslynnoyi syrovyny z vykorystannyam ul'trazvukovoyi kavitatsiyi [Intensification of the Process of Extraction of Vegetable Raw Materials Using Ultrasonic Cavitation]. Tekhnika, enerhetyka, transport APK. [Engineering, power engineering, transport of agroindustrial complexes] № 3 (98). P. 69–73 [in Ukrainian].
3. Nazarenko I., Luhovskyi O., Bernyk I., Svidersky A. (2018). Research of the influence of low-frequency and high- frequency actions on processing of technological environments. EUREKA: Physics and Engineering. №1. P. 73–86.
4. Horodetsky Y., Vasin A., Olevsky V., Lupanov P. (1980). Vybratsyonnye massoobmennye apparaty. [Vibrational mass-exchange devices]. Moscow: Khymyya, 192 p. [in Russian].
5. Myshchenko V. (2013). Prymenenye vybratsyonnykh tekhnolohyy v massoobmennykh protsessakh v pyshchevoy y pererabatyvayushchey promyshlennosti. [Application of vibrational technologies in mass transfer processes in the food and processing industry]. Sovremennye naukoemkye tekhnolohyy. [Modern science-intensive technologies] №1. P. 123 [in Russian].
6. Baranov V., Zakharov Yu. (1977). Élektrohydraulicheskye y hydraulicheskye vybratsyonnye mekhanizmy. [Electrohydraulic and hydraulic vibration mechanisms]. Moscow: Mashynostroenye. 326 p. [in Russian].
7. Symonyuk V. (2013). Do osoblyvostey vyboru pryvodu vibromashyn z metoyu pokrashchennya peremishuvannya robochykh sumishey u vibrobunkeri. [On the peculiarities of the choice of the drive of vibrating machines in order to improve the mixing of the working mixtures in the vibratory bunker]. Mizhvuzivs'kyi zbirnyk «Naukovi notatky». [Intercollegiate collection «Scientific Notes»]. 42. P. 262-266 [in Ukrainian].

8. Babenko Yu., Ivanov E. (2009). Ékstrahirovanye. Teoryya i prakticheskiye prylozhenyya. [Extraction Theory and practical applications]. St. Petersburg: NPO «Professyonal». 334 p. [in Russian].
9. Bauman K., Kots I. (2013). Kavitatsiyna tekhnolohiya vyhotovlennya bitumnykh emul'siy. [Cavitation technology for the production of bituminous emulsions]. Vinnytsya: VNTU, 128 p. [in Ukrainian].