ВИКОРИСТАННЯ КАВІТАЦІЙНИХ ЕФЕКТІВ В ПРОЦЕСАХ ЕКСТРАГУВАННЯ

Целень Б.Я., канд. техн. наук, Гоженко Л.П., канд. техн. наук, Радченко Н.Л., канд. техн. наук,
Іваницький Г.К., д-р техн. наук
Інститут технічної теплофізики НАН України, м. Київ

Анотація. Представлено огляд традиційних і сучасних технологій екстрагування рослинної і тваринної сировини та інноваційних методів інтенсифікації процесів екстракції. Розглянуто три основні фактори які забезпечують інтенсифікацію процесів екстракції, а саме: збільшення питомої поверхні контакту фаз, підтримання високого потенціалу масопереносу, а також прискорення масопереносу через міжфазну поверхню. Серед них найбільш вагомим фактором інтенсифікації є прискорення внутрішнього масопереносу в структурі сировини. На цій лімітуючій стадії відбувається підведення розчинника до цільового компонента і подальша молекулярна дифузія розчиненої речовини через складну капілярно-пористу структуру до поверхні частинки. Показано, що сучасні інноваційні методи, спрямовані саме на заміну молекулярної дифузії в матриці сировини на конвективний масоперенос. Ефективність цих методів базується на ефектах кавітації, які розглядаються як основний фактор інтенсифікації внутрішнього масопереносу в сировині. Обговорюються основні механізми кавітаційної дії, які сприяють прискорення внутрішнього масопереносу.

В статті особливу увагу приділено роботі пульсаційних екстракторів, котрі ефективно застосовуються при екстрагуванні з грубо дисперсної сировини. Розглянуто конструкцію і принцип роботи пульсаційного диспергатора-екстрактора, в якому для посилення кавітаційної ефектів дії вперше застосовано сопло Вентурі. До найбільш вагомих переваг нової конструкції віднесено можливість скорочення часу екстракції, максимальне вилучення цільових речовин, зменшення питомих енерговитрат та збільшення продуктивності, а також можливість одночасного проведення процесів змішування, екстракції, диспергування, гомогенізації, що дозволить в подальшому його застосування в різних промислових технологіях.

Ключові слова: екстракція, гідродинамічна кавітація, пульсаційний екстрактор, сопло Вентурі.

USE OF CAVITATION EFFECTS IN EXTRACTION PROCESSES

Tselen B.Ya, Ph.D., Gozhenko L.P., Ph.D., Radchenko N.L., Ph.D., Ivanitsky G.K., DSc.
Institute of Engineering Thermophysics of NAS of Ukraine, Kyiv

Abstract. An overview of conventional traditional and modern technologies of extraction of plant raw materials and effective innovative methods of intensification of extraction processes is presented. Based on the equation of interphase mass transfer in dispersed media, three main factors that provide intensification of extraction processes are considered, namely: increasing the specific surface area of the contact phases, maintaining a high mass transfer potential and increasing the mass transfer through the interfacial surface as well. It is shown that only the first two of these factors are involved in traditional extraction techniques like percolation, centrifugal extraction, Soxhlet etc. The most important factor is the acceleration of internal mass transfer within the raw materials. This stage, in contrast to the rapid external stage, is virtually independent of the hydrodynamic regime. It is shown that innovative methods, such as ultrasonic, electric discharge assisted extraction and others, are aimed at replacing molecular diffusion within the raw material matrix by convective mass transfer. The effectiveness of these methods is due to the initiation of cavitation effects, which are proven to be the main factor in the intensification of internal mass transfer. Hydrodynamic cavitation is considered as alternative to acoustic one because it is able to provide all the advantages of ultrasound extraction, but on a much larger scale and with much better energy efficiency. The main mechanisms of cavitation action which promote acceleration of internal mass transfer are discussed.

Special attention in the paper is paid to the operation of pulsation extractors, which are effectively used in the extraction of coarsely dispersed raw materials. The design and principle of operation of the pulsating extractor, in which the Venturi nozzle was used for the first time to enhance the cavitation action, are considered. The main advantage of the modified design of the pulsation extractor in comparison with traditional techniques can be considered the increased efficiency of extraction and reduction of extraction time. Also an opportunity at the same time to

carry out simultaneously processes of mixing, extraction, dispersion, homogenization. It will allow further its applications in different industrial technologies.

Key words: extraction, intensification, hydrodynamic cavitation, pulsation extractor, Venturi nozzle.

Вступ. Технології екстрагування цільових речовин (ЦР) з різних видів сировини широко застосовуються при виробництві широкого асортименту продукції для харчової, фармацевтичної, хімічної галузей промисловості і агропромислового комплексу. На протязі десятиліть для вилучення лікарських та біологічно активних речовин з рослинної або тваринної сировини застосовувалися класичні екстракційні методи, такі як мацерація, перколяція, реперколяція, безперервне протиточне екстрагування з переміщенням сировини і розчинника, апарати Сокслета та інші [1]. Позитивна якість цих методів полягає в простоті обладнання і експлуатації. Однак традиційні способи не відповідають вимогам сучасного виробництва, оскільки не забезпечують достатню повноту виснаження сировини, характеризуються високою тривалістю і непродуктивними енергетичними та ресурсними витратами. Традиційні методи знаходять своє застосування, але найчастіше в модифікованому вигляді. До числа найбільш відомих такого роду модифікацій можна віднести дробну мацерацію, відцентрову екстракцію, вихрову екстракцію (турбоекстракцію), вібраційні імпульсні та акустичні методи обробки [2].

Поряд зі згаданими вище традиційними методами на сьогодні з метою скорочення тривалості процесу, зменшення витрати екстрагента та підвищення якості кінцевого продукту в нашій країні та за кордоном набувають поширення інноваційні методи екстрагування, включаючи ультразвукову (у/з) та мікрохвильову екстракцію [2–5], застосування електророзрядних імпульсів [6, 7], екстрагування в перегрітій рідині під високим тиском (Accelerated Solvent Extraction) [8], надкритичну рідинну екстракцію (Supercritical Fluid Extraction) [2, 9] та інші, які наведені у великій кількості наукових публікацій. Ґрунтовний огляд сучасних інноваційних методів екстрагування міститься в роботах [10, 11]. Обговорюються переваги та недоліки кожного з цих методів стосовно їх практичного застосування, в першу чергу, за критеріями екологічної безпеки та мінімізації енергетичних витрат, а також тенденції та перспективи екстрагування з природної сировини. В [10] проведено критичний огляд з метою аналізу та порівняння традиційної екстракції Сокслета з новими альтернативними методами, які використовуються сьогодні для одержання біологічно-активних речовин з рослин. В роботі [11], зокрема, зазначено, що в останні роки спостерігається інтерес до нових розчинників або їх сумішей як екстрагента, який може забезпечити безпечність та стійкість процесу, підвищити вилучення, селективність і стабільність цільових компонентів. Автори також акцентують увагу на те, що хоча такі перспективні методи як надкритична флюїдна екстракція і надалі викликають неабиякий інтерес дослідників, але, разом з тим, в останні роки значно більше уваги приділяється удосконаленню методів екстрагування під високим тиском, методам ультразвукової, мікрохвильової екстракції тощо.

Аналіз проблематики та останніх досліджень. Екстракція з рослинної або тваринної сировини – масообмінний процес вилучення ЦР з твердих часток сировини, диспергованих в об'ємі екстрагента. Цільові компоненти можуть міститися як всередині клітини, так і в міжклітинному просторі – в порах матеріалу. В процесі екстракції розчинник проникає до внутрішніх клітинних структур, внаслідок чого відбувається або його безпосередній контакт з вмістом вже зруйнованих клітин, або його дифузія через пористу клітинну стінку, яку можна розглядати як основний опір масопереносу. Розчинена в сировинному екстрагенті ЦР через вузькі капілярні канали повільно дифундує до зовнішньої поверхні твердої частинки, а далі – через тонкий пристінний дифузійний шар швидко переходить в об'єм рідини. При цьому матриця твердої частинки сировини залишається у незмінному вигляді, виконуючи роль інертного носія екстрагованих речовин.

Інтенсивність масопереносу в дисперсних системах відповідно до процесів екстрагування можна в загальному вигляді визначити з рівняння [12]

$$J = \frac{S \cdot (c_s - c_l)}{r_{зовн} + r_{вн}} = K_{ef} \cdot S \cdot \Delta c, \quad (1)$$

де J – кількість речовини, що переноситься через міжфазну поверхню в одиницю часу в одиниці об'єму апарата; S – площа поверхні дисперсних частинок в одиниці об'єму екстрагента; $c_s(\tau)$, $c_l(\tau)$ – поточні значення концентрації ЦР, відповідно, у сировинному та у вільному екстрагенті; $r_{зовн}$, $r_{вн}$ – зовнішній та внутрішній опори масопереносу $K_{ef} = (1/r_{зовн} + 1/r_{внут})$ – ефективний коефіцієнт масопереносу.

З рівняння (1) випливає, що існують три очевидні чинники, які забезпечують можливість прискорити швидкість вилучення ЦР, тобто інтенсифікувати процес екстракції.

По-перше, це збільшення площі питомої міжфазної поверхні S , що досягається попереднім подрібненням частинок сировини або їх здрибненням в процесі екстрагування. По-друге, постійна підтримка високої різниці потенціалів масопереносу Δc , тобто різниці концентрацій $c_s - c_l$. І, нарешті, прискорити масопере-

нос можна шляхом збільшення ефективного коефіцієнту масопереносу K_{ef} , наприклад, за рахунок підвищення конвективної складової перенесення або внаслідок періодичного збурення міжфазної поверхні. Очевидно, що всі існуючі методи інтенсифікації процесу екстрагування спрямовані саме на максимальне залучення усіх трьох згаданих факторів.

Зменшення поверхні контакту за рахунок подрібнення твердої фази обмежується енерговитратами на подрібнення [1–3, 13]. На сьогодні для різних видів рослинної сировини встановлено оптимальний розмір частинок твердої фази. Більшість способів інтенсифікації, такі як турбоекстракція, у/з екстракція, вібраційні методи, застосування роторно-пульсаційних апаратів (РПА) та інші прискорюють процес, але за рахунок подрібнення сировини (до розмірів клітини) і порушення структури матриці. Це веде до забруднення екстракту баластними речовинами із зруйнованих клітин, такими як клітковина, хлорофіли та інші з утворенням дрібнодисперсної каламуті, що потребує довгого часу на відстоювання.[4–7,13].

Традиційні методи екстракції, в основі яких лежить прямоточний або протиточний рух фаз, такі як перколяція, відцентрова екстракція, апарати Сослета та інші апарати проточного типу, спрямовані саме на забезпечення постійно високого потенціалу масопереносу. Цей фактор має бути обов'язково врахований і в сучасних інноваційних методах екстрагування.

Стосовно прискорення процесу за рахунок збільшення ефективного коефіцієнта масопереносу K_{ef} . В усіх існуючих на сьогодні екстракторах, завдяки створенню розвиненої конвекції в околиці міжфазної поверхні гранично високі значення досягаються лише для зовнішньої складової коефіцієнта масопереносу, тобто для коефіцієнта масовіддачі від поверхні твердої частинки в об'єм екстрагента ($K_{зовн} = 1/r_{зовн}$). Навіть незначне перемішування системи «тверді частинки-екстрагент» або збільшення швидкості омивання частинок рідиною дозволяє скоротити тривалість процесу. У вихрових екстракторах зі швидкісними мішалками, з частотою обертання $\sim 100 \text{ с}^{-1}$, швидкість вилучення ЦР з рослинної сировини багаторазово зростає в порівнянні з процесами зі слабким перемішуванням [2].

При розробці інноваційних методів інтенсифікації екстракційних процесів принципово важливою і до цього часу ще не вирішеною проблемою залишаються пошуки і обґрунтування оптимальних способів підвищення внутрішньої складової коефіцієнта $K_{ef} = 1/r_{внут}$, тобто, можливість тим чи іншим чином реалізувати заміну молекулярної дифузії всередині частинок рослинної сировини на конвективний масоперенос. В рівнянні (1) величина опору $r_{вн} \gg r_{зовн}$. Це означає, що в процесах екстракції швидкість вилучення цільового компонента лімітується швидкістю перебігу найповільнішої внутрішньої стадії, на якій відбувається підведення розчинника до цільового компонента і молекулярна дифузія розчиненої речовини через складну капілярно-пористу структуру до поверхні частинки. Ця стадія, на відміну від швидкої зовнішньої стадії, практично не залежить від гідродинамічного режиму.

Сучасні способи інтенсифікації масообмінних та гідродинамічних процесів в гетерогенних середовищах базуються на засадах ідеології дискретно-імпульсного введення енергії (ДІВЕ), в основу якої закладено принцип, що найбільш ефективне і економне використання енергії, яка витрачається на інтенсифікацію, передбачає рівномірний дискретний розподіл введеної енергії в кожній локальній точці робочого об'єму системи у формі короткочасних потужних імпульсів [2, 12]. Цей принцип в тій чи іншій мірі реалізується при розробці інноваційних методів інтенсифікації екстракційних процесів – насамперед, в ультразвуковій, мікрохвильовій, пульсаційній, електророзрядній екстракції, а також при застосуванні роторно-пульсаційних та вібраційних апаратів. В усіх цих методах використовуються ефекти кавітації, яка вважається одним з потужних механізмів принципу ДІВЕ.

Застосування кавітаційних механізмів. Для ініціювання кавітаційних ефектів необхідно різко скинути тиск в рідині нижче тиску насиченої пари при даній температурі ($p_l < p_{sat}(T_l)$), що веде до формування і інтенсивного зростання парогазових бульбашок. Після наступного підвищення тиску в рідині до значень $p_l > p_{sat}(T_l)$ бульбашки швидко стискаються і миттєво захоплюються, випромінюючи при цьому локальні високо-амплітудні імпульси тиску, одночасно у всьому робочому об'ємі, що супроводжуються потужною динамічною дією на оточуюче середовище.

При ініціюванні кавітаційних процесів в об'ємі екстрагента з частинками сировини періодичне формування та колапс бульбашок відбувається як в об'ємі екстрагента поза частинками, так і в сировинному екстрагенті, який знаходиться в порах і клітинах всередині частинок. Внаслідок цього молекулярна дифузія в капілярах замінюється конвективною, що прискорює проникнення розчинника до клітинних структур сировини і переміщення ЦР в екстрагент, що в кінцевому підсумку, сприяє інтенсифікації масообміну. Завдяки дії ударних імпульсів на стадії колапсу бульбашок, може відбуватись руйнування клітинних структур і перенесення корисних речовин в екстрагент за рахунок їх вимивання.

Слід зазначити, що для прискорення внутрішнього переносу не обов'язково виконувати умову $p_l < p_{sat}(T_l)$ для кавітаційного скипання рідини. Почергове стиснення та розрідження рідини всередині частинок при періодичній зміні тиску створює ефект «губки». Такий спосіб прискорення конвективного масопереносу, який запобігає руйнуванню клітин, також відносять до кавітаційних ефектів [2].

Стосовно інтенсифікації процесів екстракції кавітаційні механізми ініціюють шляхом акустичної дії із застосуванням різних у/з пристроїв [3, 10, 11], при пробію рідини електричними розрядами [2, 6, 7, 10], при реалізації магнітоімпульсних ефектів, вакуум-пульсаційного методу [14], а також за рахунок створення оптимальних гідродинамічних умов в потоці екстрагованої суміші [1, 2, 12, 13, 15, 16].

При періодичному пробію рідини електророзрядами кавітаційні процеси реалізуються внаслідок утворення плазмових каверн, які швидко захоплюються з випромінюванням ударних імпульсів тиску, що дозволяє скоротити тривалість процесу, збільшити вихід ЦР і знизити енерговитрати [6, 7].

В останні роки набуває популярності ефективна, екологічно чиста, малозатратна технологія, відома під назвою «кавітаційна екстракція під негативним тиском» (NPCE) [14], яка є проста в експлуатації і забезпечує більш високий вихід ЦР у порівнянні з традиційними методами. Екстрагент з диспергованою сировиною при кімнатній температурі знаходиться в резервуарі, в якому за допомогою вакуум-насоса підтримується низький тиск (~0,2 атм) і в який безперервно барботується повітря. Вибухове зростання газових бульбашок перемішує і турбулізує суміш, що прискорює міжфазний масообмін. Цей метод, ефективний при обробці термолабільної сировини, лише умовно можна звати «газовою кавітацією».

Ще одним перспективним методом інтенсифікації процесів екстракції, де екстрагентом є вода, слід вважати попередню обробку екстрагента (води) у гідродинамічному кавітаційному пристрої. При цьому відбувається руйнування водневих зв'язків в молекулах води, що приводить до зміни фізико-хімічних властивостей екстрагента (його активації). Як показано в роботах [13, 15] активований таким чином екстрагент успішно використовується в технологічних процесах екстракції з метою їх інтенсифікації.

Перевагою акустичних методів екстракції є високий ступінь вилучення ЦР, здатність руйнувати навіть дуже тверді структури, можливість змінювати частоту та інтенсивність у/з поля. Інтенсивність у/з дії та кавітаційні характеристики легко можуть бути адаптовані до конкретного процесу екстрагування. До числа основних недоліків слід віднести малі обсяги обробляемого середовища, надмірно високі енерговитрати, високу вартість обробки і апаратури, недовговічність акустичних випромінювачів через, що в сукупності обмежує можливість використання цих методів в промислових технологіях.

Альтернативою акустичній кавітації і серйозним конкурентом стосовно до інтенсифікації процесів екстрагування є гідродинамічна кавітація, яка здатна забезпечити всі умови у/з кавітації, але в набагато більшому масштабі і з кращою енергетичною ефективністю [4, 12, 16].

Для реалізації процесів гідродинамічної кавітації застосовують різні типи РПА [2, 3, 11, 12], сопла Вентурі [12, 13], пульсаційні апарати, відцентрові насоси та інші типи кавітаційних реакторів проточного типу. Застосування в промисловості того чи іншого типу кавітаційного реактора залежить від поставленої технологічної задачі та від рівня питомих енерговитрат [2, 12, 13, 16].

Проте, область застосування РПА та насосів через їх низьку абразивну стійкість обмежується можливістю обробки лише дрібнодисперсними сумішми. Основним обмежуючим фактором використання для цих цілей таких ефективних та абразивно стійких кавітаторів як сопла Вентурі є те, що вони завжди працюють по рециркуляційній схемі разом з абразивно чутливими насосами-насосами.

Тому стосовно екстракції з грубодисперсної сировини поширюється застосування гідродинамічних апаратів пульсаційного типу [14, 17], які разом зі скороченням тривалості процесу дозволяють підвищити вихід ЦР, і розглядаються як основа створення ефективних екстракційних технологій та обладнання.

Пульсаційні екстрактори. До гідродинамічних кавітаційних пристроїв відносяться також створені в ІТТФ НАНУ пульсаційні апарати з активною мембраною різної модифікації, які знайшли застосування у виробництві в якості ефективних змішувачів, гомогенізаторів, екстракторів [18, 19]. Ці апарати відрізняються високою зносостійкістю та відсутністю вузлів, які труться або обертаються, що дозволяє обробляти гетерогенні суміші з твердими частинками, незалежно від їх форми, розміру та абразивних властивостей. Створення достовірної математичної моделі пульсаційного апарата [20] дозволило обґрунтувати вибір раціональної конструкції та оптимальні режими роботи таких пристроїв, відповідно до сфери їх використання та поставлених технологічних задач.

Принципову схему пульсаційного диспергатора з активною мембраною показано на рис. 1. Апарат складається з завантажувальної ємності, робочої камери, прямої труби, що з'єднує камеру з ємністю, гнучкої мембрани (яка розділяє рідинний та газовий тракти апарата) та електромагнітного клапана, який згідно із заданою програмою почергово з'єднує камеру з ресивером низького тиску (РНТ), або з ресивером високого тиску (РВТ). Принцип роботи апарата полягає в наступному.

В ємність завантажують у заданому співвідношенні суміш сировини з водою. При з'єднанні камери з РВТ суміш по трубі виштовхується з камери в ємність до повного перекриття мембраною вихідного отвору

камери. При інерційному русі суміші вниз по трубі рідина відривається від мембрани із створенням глибокого вакууму над поверхнею стовпа рідини.

Рис. 1 – Схема пульсатора з активною мембраною

кавітаційного диспергатора–екстрактора пульсаційного типу, в якому вперше, для посилення кавітаційних ефектів, застосовано сопло Вентурі. Конструктивна схема цього пристрою, яка показана на рис. 2 і принцип його роботи практично ті ж самі, як і у традиційного пульсатора з активною мембраною, зображеного на рис. 1, але з певною принциповою відмінністю.

Рис. 2 – Кавітаційний диспергатор-екстрактор пульсаційного типу

зазвичай сопло Вентурі, при застосуванні його в системах рециркуляції в якості кавітатора, працює в умовах, коли через сопла безперервно проходить стаціонарний турбулентний і односпрямований потік рідини [12,13,16]. Це дозволяє визначити раціональну геометрію сопла і оптимальні режими його роботи. В даному випадку в соплі Вентурі періодично змінюється і швидкість, і напрямок течії через сопло, що потребує спеціальної розробки аналітичної методики розрахунку оптимальних режимів роботи апарата.

Висновки. Проведено критичний огляд традиційних та інноваційних технологій екстрагування з рослинної сировини з аналізом їх переваг та недоліків. Розглянуто основні фактори, які забезпечують можливість інтенсифікувати процес екстракції та підвищити ступінь вилучення ЦР. Показано, що найбільш перспективними з точки зору використання в технологіях екстрагування і можливості забезпечення високих показників продуктивності та енергоефективності процесів екстракції є застосування кавітаційних механізмів гідродинамічної кавітації. Як приклад, наведено розроблені в ІТТФ НАНУ новітні модифікації пульсаційних кавітаційних екстракторів, в тому числі, з застосуванням сопел Вентурі в якості ефективного кавіта-

Через різку зміну тиску в об'ємі суміші в трубі відбувається руйнування дисперсної фази, і вилучення компонентів з клітин сировини. Одночасно в ємності під дією потужного струменя з труби відбувається інтенсивне турбулентне перемішування. Завдяки зміні різниці тиску рідина в трубі швидко гальмується і змінює напрямок руху на зворотний. На цій стадії камера через клапан підключається до РНТ, завдяки чому мембрана відкриває отвір з камери в трубу і перекриває отвір з камери до РВТ. При русі суміші вверх по трубі відбувається різке гальмування рідинного потоку на верхній поверхні камери, до якої прилягає мембрана, внаслідок чого створюються потужні ефекти гідроудару всередині камери і в трубі. На цій стадії камера знову підключається до РВТ, на чому завершується черговий цикл роботи пульсатора. Таким чином за період одного циклу в рідинному тракті апарата ініціюється сукупність потужних механізмів ДІВЕ: адиабатне закипання, кавітація, гідравлічний удар, дія зсувних напружень та інтенсивна турбулізація суміші.

В ІТТФ НАНУ на основі модифікації існуючого кавітаційного пульсатора [21], створено принципово новий тип

Новизна конструкції полягає в тому, що в середину з'єднувальної труби між камерою та ємністю вміщено сопло Вентурі заданої геометрії. При проходженні в трубі рідини, швидкість якої періодично змінюється за величиною і напрямом, в соплі відбувається періодична зміна тиску і створюються динамічні кавітаційні ефекти, що сукупно сприяє конвективному переносу ЦР через капіляри і пори частинок сировини. Як показали попередні дослідження апарата, застосування в пульсаційному екстракторі сопла Вентурі суттєво скорочує час екстракції, створює можливість роздрібнюватися частинки і суттєво збільшити за рахунок цього вихід ЦР. Ще однією особливістю конструкції апарата є те, що, як видно з рис. 2, робочу камеру, на відміну від традиційної схеми (рис. 1), розміщено під завантажувальною ємністю.

Це не впливає на режими роботи апарата, але запобігає накопиченню повітря всередині робочої камери в процесі роботи, що посилює ефективність кавітаційної дії. Ще одна особливість полягає в тому, що

тора, що забезпечує збільшення ступеня вилучення якісної цільової продукції з грубодисперсної рослинної сировини при порівняно невисоких питомих енерговитратах.

References

1. Lysianskiy, V.M., Grebeniuk, S.M. (1987). *Ekstragirovaniye v pischevoy promyshlennosti*. M.: Agropromizdat.
2. Babenko, Yu.I., Ivanov, Eu.V. (2009). *Ekstragirovaniye. Teoriya i prakticheskoye prilozheniye*. S-Pb.: NPO "Professional".
3. Chemat, F., Khan, M.K. (2011). Applications of ultrasound in food technology: Processing, preservation and extraction. *Ultrason. Sonochem*, 18, 813–835.
4. Shirsath, S.R., Sonawane, S.H., Gogate, P.R. (2012). Intensification of extraction of natural products using ultrasonic irradiations.—A review of current status. *Chem. Eng. Process. Process Intensif.*, 53, 10–23.
5. Chemat, F., Cravotto, G. (2013). *Microwave-assisted extraction for bioactive compounds: Theory and Practice*. Food Engineering Series. New York, NY: Springer US.
6. Sensoy, I., Sastry, S.K. (2004). Extraction using moderate electric fields. *J. Food Sci.*, 69, 7-13.
7. Kudimov, Yu.N., Kazub, V.T., Golov, E.V. (2002). Electrorazryadnyye protsessy v zhidkosti i kinetika ekstragirovaniya biologicheskii-aktivnykh komponentov. *Cast' I. Udarnyye volny I kavitatsiya. Vestnik Tambovskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta*, 8(2), 253–263.
8. Benthin, B., Danz, H., Hamburger, M. (1999). Pressurized liquid extraction of medicinal plants. *J Chromatogr. A.*, 837(1/2), 211–219.
9. Sihvonen, M., Jarvenpaa, E., Hietaniemi, V., Huopalahti, R. (1999). Advances in supercritical carbon dioxide technologies. *Trends in Food Science and Technology*, 10, 217–222.
10. Lijun Wang, Curtis L.Weller. (2006). Recent advances in extraction of nutraceuticals from plants. *Trends in Food Science & Technology*. 17, 300–312.
11. Roctagno, M.and Prado, J. (Ed.). (2013). *Natural product extraction: Principles and applications*. Royal Society of Chemistry, Cambridge, UK.
12. Dolinskiy, A.A., Ivanitskiy, G.K. (2008). *Teplomassoobmen i hidrodinamika v paro-zhidkostnykh dispersnykh sredakh. Teplofizicheskiye osnovy diskretno-impulsnogo vvoda energii*. Kiyev: Nauk. dumka.
13. Viten'ko, T.M. (2009). *Gidrodinamichna kavitatsiya u teplomasoobminnykh, khimichnykh i biologichnykh protsesakh*. Ternopil': Vydavn. Ternop. derzhav. techn. un-tu imeni I.Pulyuya.
14. Roohinejad, Sh., Koubaa, M., Greiner, R., Orlie, V., Lebovka, N. (2016). Negative pressure cavitation extraction: A novel method for extraction of food bioactive compounds from plant materials. *Trends in Food Science & Technology*. 52, 98–108.
15. Viten'ko, T.N., Gumnitskiy, Ya.M. (2007). Mechanizm aktiviruyuschego deystviya gidrodinamicheskoy kavitatsii na vodu. *Khimiya i tekhnologiya vody*. 29(5), 422-432.
16. Parag, R. Gogate, P.R. (2011). Hydrodynamic Cavitation for Food and Water Processing. *Food Bioprocess Technol.*, 4(6), 996–1011.
17. Abiyev, R.Sh. (2000). Modelirovaniye pul'satsionnogo ekstraktora U-obraznogo tipa. *Khimicheskoye mashinostroyeniye*. 8, 11–14.
18. Ivanitskiy, G.K., Gozhenko, L.P. (2013). Zastosuvanya pulsatsiynogo dyspergatora dlya intensyfikatsii dysperguvannya frezernogo torfu. *Naukovi pratsi ONAKHT*, 43(1) 120–123.
19. Ivanitskiy, G.K., Gozhenko, L.P. (2014). Analiticheskoye issledovaniye usloviy vozniknoveniya kavitatsii v trubie pulsatsionnogo dyspergatora udarnogo tipa. *Prom. teplotekhnika*, 36(6), 49–56.
20. Ivanitskiy, G.K., Korchinskiy, A.A., Matyushkin, M.V. (2003). Matematicheskoye modelirovaniye protsessov v pulsatsionom dyspergatore udarnogo tipa. *Prom. teplotekhnika*, 25(1), 29–34.
21. Ivanitskiy, G.K., Chaika, O.I., Gozhenko, L.P. (2013). Zastosuvannya kavitatsiynogo reaktora pul'satsiynogo tupu dlya ekstraguvannya z roslinnoi syroviny. *Naukovi pratsi ONAKHT*, 47(2), 138–142.

Отримано в редакцію 12.05.2020
Прийнято до друку 28.09.2020

Received 12.05.2020
Approved 28.09.2020