

УДК 66.061:532.528

**ВИВЧЕННЯ ПРОЦЕСУ ЕКСТРАГУВАННЯ РОСЛИННОЇ СИРОВИНИ
В ПРОТОЧНОМУ КАВІТАЦІЙНОМУ ЗМІШУВАЧІ СТАТИЧНОГО ТИПУ****Авдєєва Л.Ю.¹**, докт. техн. наук, **Макаренко А.А.²**, канд. техн. наук, **Турчина Т.Я.³**, канд. техн. наук*Інститут технічної теплофізики НАН України, вул. Марії Капніст, 2а, Київ, 03057, Україна*¹*провідний науковий співробітник, tbd_s_itf@ukr.net, <http://orcid.org/0000-0002-3434-1669>*²*науковий співробітник, tbd_s_itf@ukr.net, <http://orcid.org/0000-0003-2338-5364>*³*старший науковий співробітник, tbd_s_itf@ukr.net, <https://orcid.org/0000-0003-4902-3732>*<https://doi.org/10.31472/ttpe.2.2024.4>

В статті представлено результати дослідження процесу екстрагування суцвіть календули лікарської в проточному гідродинамічному кавітаційному змішувачі статичного типу. Наведенні графіки залежності вмісту сухих речовин в екстракті від циклу оброблення рослинної суспензії та від внутрішнього діаметру горловини сопла. Представлені дослідження мікроструктури зразків водної суспензії нагідок, оброблених методом гідродинамічної кавітації. За результатами експериментальних і аналітичних досліджень визначено раціональні геометричні параметри конструкції апарату і теплотехнологічні режими проведення процесу екстрагування.

The article presents the results of a study on the extraction process of marigold flower heads in a flow hydrodynamic cavitation static-type mixer. The provided graphs show the dependence of dry matter content in the extract on the processing cycle of the plant suspension and the inner diameter of the nozzle throat. Microstructure studies of water suspensions of marigold heads processed by hydrodynamic cavitation are also presented. Based on the results of experimental and analytical research, rational geometric parameters of the apparatus design and heat technological modes for the extraction process have been determined.

Бібл. 13, рис. 4.

Ключові слова: екстрагування, масообмінні процеси, рослинні екстракти, гідродинамічна кавітація, трубка Вентурі, число кавітації.

Постановка проблеми. Рослинні екстракти, які є головним джерелом багатьох біологічно активних речовин (БАР) і сполук, широко використовуються в рецептурах багатьох харчових продуктів, а також фармацевтичних і косметичних засобів. Не зважаючи на те, що екстрагування відноситься до одного з найстаріших способів виділення БАР, проведення цього процесу все ще вимагає багатьох уточнень. Це пов'язано із тим, що рослинна сировина має значні відмінності за морфологічною структурою, своїм складом і фізико-хімічними властивостями. Особливістю дифузійних процесів при отриманні екстрактів з рослинної сировини є наявність жорстких клітинних перегородок, які значно знижують швидкість розчинення БАР і переходу твердої фази в розчинну. Крім того, переважно більшість екстракційних препаратів отримують з висушеної рослинної сировини, отриманої шляхом теплового сушіння. Внаслідок сушіння клітинна стінка набуває властивостей пористої перегородки, через яку можуть дифундувати БАР, молекули яких не перевищують розміру

пор. Всі ці фактори значно ускладнюють проведення ефективних масообмінних процесів, а процес екстрагування набуває складного фізико-хімічного характеру, який пов'язаний з поверхневими явищами через взаємодію молекул екстрагенту з молекулами клітинних структур рослинної сировини. Значна кількість видів рослинної сировини, різноманітність її складу і властивостей вимагає застосування нових і постійного удосконалення існуючих методів екстрагування [1, 2].

Календула лікарська (*Calendula officinalis* L.), широко відома як в офіційній, так і в народній медицині. Для отримання БАР використовується є вся надземна частина рослини в період цвітіння, але найчастіше для одержання екстрактів використовуються суцвіття. До складу БАР суцвіть входять: каротиноїди (каротин, лікопін, віолаксантин, цитраксантин, рубіксантин, флавохром), флавоноїди (нарцисин, рамнетин, ізорамнетин-3-триглюкозид, ізокверцитрин), олія ефірна, сапоніни, календен, смолисті і дубильні речовини, слиз, інулін, кислоти органічні (яблучна, саліцилова, пентадецило-

ва), фітостерин, ферменти, вітамін С, алкалоїди. Екстракти з БАР календули чинять протизапальну, ранозагоювальну, бактерицидну, спазмолітичну і жовчогінну дію, прискорюють процеси регенерації тканин. Великий спектр фармакологічної активності суцвіть календули, обґрунтований наявністю різноманітних класів БАР робить цю сировину цінним ресурсом для виробництва лікарських препаратів та дієтичних добавок[3].

Аналіз останніх досліджень та публікацій. Комплексна і ефективна переробка рослинної сировини, що є нагальною виробничою потребою, вимагає використання найбільш ефективних способів обробки з високим ступенем впливу на матеріал і зменшення енерговитрат при виконанні технологічного процесу. Для цього необхідно застосування нових або удосконалення існуючих науково обґрунтованих технологій і обладнання із застосуванням таких режимних параметрів проведення всіх етапів обробки, що враховують специфіку переробки різного роду рослинної сировини [1, 2, 4].

Ефективність екстрагування твердої речовини рідиною залежить від її розчинності та швидкості переходу з однієї фази в іншу. Розчинність можна збільшити за рахунок використання відповідного розчинника, а швидкість переходу речовини з твердої фази в розчин можна змінити впливаючи на швидкість проникнення рідини в тверду фазу, швидкість дифузії речовини в рідину, або швидкість вилучення речовини з поверхні розділу фаз. Прискорити швидкість переходу речовини з твердої фази в розчин можна шляхом збільшення площі поверхні частинок твердої фази за рахунок подрібнення зразка або інтенсивного перемішування маси для здійснення постійної подачі свіжого розчинника на межу розділення фаз для створення високої різниці концентрацій. Швидкість екстрагування також залежить від тиску і температури проведення процесу [2].

Ідеального розчинника для екстракції рослинної сировини поки немає. Екстрагент повинен проникати через стінки клітинних мембран і вибірково розчиняти всередині клітини біологічно активні речовини. При виборі розчинника необхідно враховувати його низьку токсичність, активність при невисоких температурах проведення процесу екстрагування, швидкий масообмін та запобігання повторному структуроутворенню і утворенню дисоціатів. В результаті комбінування різних екстрагентів можна отримати комплексний розчинник для забезпечення вибіркової екстракції певної конкретної речовини або комплексу речовин, хімічний склад або фізіологічну направленість екстракту, його стабільність, стійкість до дії мікрофлори

та інші властивості. В якості екстрагентів цінних речовин та властивостей календули використовується спирт, підготовлена вода, ефіри, олія, діоксид вуглецю або їх поєднання. До переваг використання води в якості екстрагенту відноситься доступність, низька собівартість і наявність гідрофільних біополімерів у структурі рослинної клітини. Водні екстракти характеризуються високою біодоступністю біологічно активних речовин, широким спектром використання, нетоксичністю, відносно низькою собівартістю і комплексною дією. [4].

При виробництві екстракту календули використовуються різноманітні методи для отримання найбільшої кількості корисних БАР і сполук, які потім використовуються в якості інгредієнтів для есенцій, мазей, кремів тощо. Для отримання водних екстрактів лікарських рослин, в т.ч. квіток календули традиційними методів вважаються мацерація або перколяція. Однак такі методи мають значні недоліки, такі як використання великого об'єму розчинника та тривалий час екстракції. Для інтенсифікації масообмінних процесів при екстрагуванні на сьогодні перевага надається обладнанню із інтенсивним впливом на дисперсну систему різноманітних зовнішніх факторів, які дозволяють змінити в потрібному напрямку стан системи і швидкість протікання в ній процесів масопереносу. При виборі обладнання важливим є зменшення енерговитрат, скорочення тривалості найбільш енергоємних технологічних процесів, висока продуктивність, безперервність роботи, отримання заданих характеристик готових екстрактів [5, 6].

Таким чином, основними причинами, що ускладнюють процес екстрагування є особливості рослинної сировини і швидкість масообміну при екстрагуванні. Тому актуальними є раціональний вибір обладнання і дослідження впливу теплофізичних умов процесу екстракції, що можуть бути застосовані як інтенсифікуючі чинники при виділенні біологічно активних речовин з певної рослинної сировини.

Метою роботи є дослідження переходу твердих речовин суцвіть календули лікарської в розчинний стан в кавітаційному змішувачі статичного типу для інтенсифікації масообмінних процесів при отриманні водних екстрактів.

Матеріали та методи. Для дослідження були використані попередньо подрібнені до 0,1-2 мм сухі суцвіття календули лікарської. Екстрагентом було обрано дистильовану воду. Перед кавітаційною обробкою квітки нагідок витримували для набухання в дистильованій воді при температурі 20 ± 2 °C впро-

довж 25 хв. при гідромодулі 1:15. При використанні таких параметрів спостерігалась максимальна різниця концентрацій і виявлено найвищу інтенсивність переходу сухих речовин в початкову суспензію. Після проведеної витримки отриману суспензію обробляли в експериментальному кавітаційному змішувачі.

Для проведення дослідження екстрагування методом кавітації використовувався дослідний кавітаційний реактор типу трубки Вентурі. Експериментальний стенд [7] складався з таких основних частин: пульту управління, змінного кавітаційного реактора, об'ємного шестеренного насосу із запірною арматурою, манометрів, витратоміра, термометра з виносним датчиком, циліндричної приймальної ємності, з'єднувального трубопроводу та вивідного патрубку для відбору зразків. Кавітаційний реактор представляє собою сопло Вентурі з геометричними розмірами: діаметр вхідного і вихідного каналу 0,042 м, кут розкриття конфузора 90°, кут розкриття дифузора 120°. Горловина сопла - вузький циліндричний канал постійного діаметру в якому втрати енергії зумовлені лише опором в'язкого тертя стінок каналу. Дослідження проводились при діаметрах горловини сопла кавітаційного реактора 0,006 м, 0,008 м, 0,010 м і 0,012 м. Довжина горловини сопла 0,020 м.

Ефективність екстрагування визначали за кількістю водорозчинних речовин (СР), які перейшли в екстракт за ДСТУ 8004:2015 Концентрати харчові. Методи визначення вологи.

В якості параметра для характеристики явища кавітації в середині даного реактора використовувались значення числа кавітації (χ), що розраховували за формулою (1):

$$\chi = \frac{p - p_{\text{кав}}}{1/2 \rho \cdot v^2}, \quad (1)$$

де p – тиск перед соплом, Па;

v – швидкість течії в горловині сопла, м/с;

$p_{\text{кав}}$ – тиск насиченої пари, при якому виникає кавітація, Па;

ρ – густина рідини, кг/м³.

Дослідження мікроструктури суспензій проводили мікроскопічним методом за допомогою мікроскопа «МБІ ЗУ 4.2» з одночасною мікрофотозйомкою окремих зразків за допомогою цифрового фотоапарату при збільшенні 280х. Для досліджень готувались в середньому по 6-10 проб кожного зразку.

Викладення основних результатів досліджень.

Вибір методу екстрагування, співвідношення компонентів, теплотехнологічних режимних параметрів проведення виробництва екстрактів залежать від конкретного виду рослинної сировини. Перспективними для застосування при екстрагуванні є апарати, дія яких заснована на використанні явища гідродинамічної кавітації. Серед значної кількості їх модифікацій, цікавість викликають проточні статичні кавітаційні апарати. Кавітаційні апарати статичного типу мають один або декілька спеціальних нерухомих елементів у вигляді сопел, діафрагм, перегородок, або дисків, що перешкоджають руху потоку. В результаті відбувається різка зміна напрямку руху потоку рідини із різкою зміною тиску нижче за деяке критичне значення (поріг кавітації) із розривами суцільності рідини і утворенням кавітаційних бульбашок. Викид кумулятивного мікроструменя, який виникає в результаті зхлопування бульбашок, призводить до порушення рівноваги системи і супроводжується виникненням аномально високих локальних тисків, температур і потенціалів, що керують інтенсивністю перенесення маси, імпульсу і енергії через міжфазну поверхню. Висока ефективність обробки складних дисперсних систем в проточних кавітаційних апаратах здійснюється за рахунок імпульсного багатofакторного впливу: вихроутворення, мікромасштабних пульсацій тиску, інтенсивної кавітації, ударних хвиль і нелінійних гідроакустичних ефектів [8]. Дуже часто статичні кавітаційні апарати виготовляють на основі трубки Вентурі (NRHCR). Ці апарати відрізняються значною ефективністю багатofакторного впливу на матеріал, а також характеризуються простотою і надійністю конструкції. Їх використання дозволяє посилити інтенсивність впливу при обробці складних дисперсних систем і покращити фізичні, хімічні та біологічні характеристики отриманих продуктів, збільшити загальну кількість розчинних речовин і стабільність екстрактів. Коротка тривалість обробки рослинного матеріалу в кавітаційному змішувачі дозволяє зменшити негативний вплив механічної і термічної обробки і зберегти більшу кількість поживних біологічно активних речовин, порівняно до традиційної пастеризації [9, 10].

Загальна конструкція апарату, геометричні параметри виконання сопла, параметри руху течії (абсолютний тиск і швидкість), а також властивості рослинного матеріалу і утвореної суспензії значно впливають на гідродинамічні умови і розвиток кавітаційних ефектів при проведенні обробки.

В дослідженнях використовувались сопла Вентурі з горловинами від 0,006 м до 0,12 м. Дослідні проби відбирались через: 3 цикли (12 с), 9 циклів (36 с), 15 циклів (60 с), 30 циклів (120 с). Ефективність екстрагування визначали за кількістю сухих речовин (СР) в екстракті.

Дослідження показали високу ефективність масопереносу при обробці рослинної суспензії в експериментальному кавітаційному змішувачі. Результати досліджень, наведених раніше показали, що збільшення тривалості кавітаційного впливу призводить до поступового збільшення вмісту сухих речовин в усіх зразках [11]. Найбільшою інтенсивністю змін характеризуються процеси, які відбуваються під впливом кавітаційної обробки впродовж першої хвилини обробки (15 циклів). Вміст сухих речовин в екстрактах, отриманих в результаті 15 циклів обробки зразка суспензії квіток нагідок лікарських при різних діаметрах горловини сопла наведений на рис. 1.

Результати досліджень (рис.1) показали, що збільшення діаметру горловини сопла призводить до зменшення інтенсивності масопереносу, що призводить до зменшення приросту кількості СР в екстракті. Процес екстрагування при діаметрі горловини сопла 6 мм відбувався найбільш ефективно, але при цьому, через високу дисперсність частинок після 15 циклів обробки отриманого зразка, значно ускладнюється процес його фільтрування. Найменші значення кількості СР спостерігались у зразка, отриманого в результаті обробки в соплі з горловиною 0,12 м, кількість СР в якому зменшувалась на 20%. Отримані експериментальні результати підтверджуються і розрахунком числа кавітації. Цей кавітаційний змішувач характеризується найбільшим числом кавітації - 1,36. Таким чином, для екстрагування БАР з суцвіть календули доцільним є використання реактора з горловиною сопла 0,08 м і 0,10 м.

Інтенсивність виникнення кавітаційних ефектів залежить від швидкості руху потоку – при зростанні швидкості збільшується розрідження потоку і збільшується різниця тисків при проходженні потоку через сопло, тому явище кавітації характерно для великих швидкостей. Для напірних потоків в трубах швидкість потоку впливає на характер руху рідини, що визначається числом Рейнольдса (Re). Цей показник описує вплив сил інерції і сил внутрішнього тертя і дозволяє поєднати фактори руху рідини: основні характеристики потоку (діаметр труби, середня швидкість) і характеристики самої рідини (густина, в'язкість). Критерій Re використовується для дослідження, розрахунків і моделювання течії рідини [7]. Опосередковано про наявність кавітації в потоці при проходженні через дослідне сопло свідчать високі значення числа Re . Так, в дослідному стенді при течії рідини в трубі з діаметром $d = 0,042$ м без використання сопла Вентурі число Рейнольдса має значення $Re = 288036$, що відповідає турбулентному режиму, але не призводить до виникнення кавітації. Залежність числа кавітації від числа Рейнольдса при діаметрах горловини сопла кавітаційного реактора 0,006 м, 0,008 м, 0,010 м і 0,012 м наведена на рис. 2.

Аналіз результатів показав, що отримана залежність носить нелінійний характер (рис. 2). Як видно з рисунка, збільшення числа Re призводить до поступового зменшення χ . За даними літератури, встановлення кавітаційного режиму і найбільша інтенсивність виникнення кавітаційних ефектів спостерігається при $\chi < 1$. Оброблення водної суспензії суцвіть календули в даному конкретному експериментальному змішувачі висока інтенсивність кавітаційних ефектів спостерігається при діаметрах горловини сопла кавітаційного реактора 0,006 м ($\chi = 0,18$), 0,008 м ($\chi = 0,53$), 0,010 м ($\chi = 0,84$). Подальше збільшення діаметру горловини до 0,012 м в дослідному профілі кавітаційного реактора призводить до зниження інтенсивності кавітаційного впливу

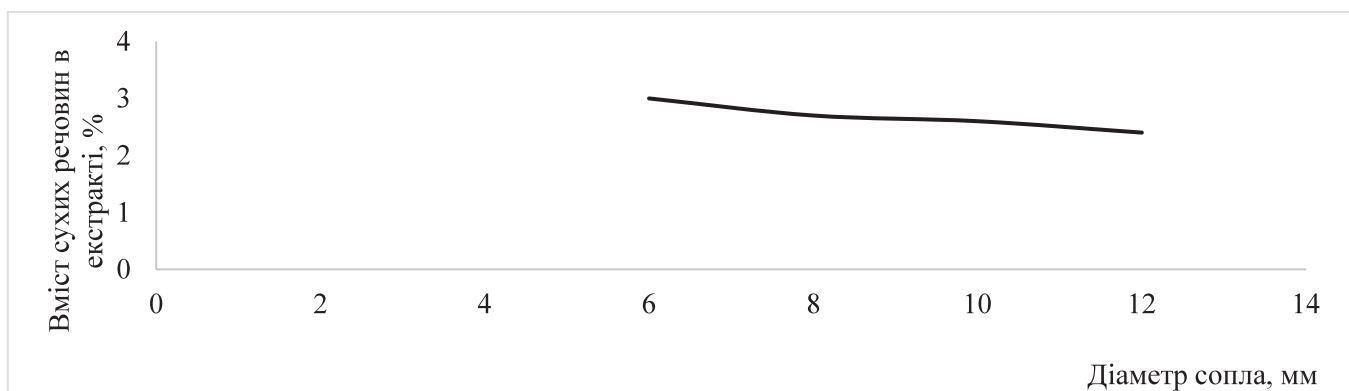


Рис. 1. Залежність вмісту сухих речовин від діаметру горловини сопла

на суспензію з суцвіть календули, що можна пояснити зменшенням швидкості потоку в експериментальному стенді з використанням об'ємного шестеренного насоса при однакових витратах рідини.

Крім того, позитивним є ефект підвищення температури матеріалу, що виникає в результаті виникнення інтенсивної гідродинамічної кавітації. За даними літератури це дозволяє провести інактивацію мікроорганізмів і видалення небажаних термостабільних ферментів в екстракті без використання нагрівальних пристроїв, що призводить до покращення якості і збільшення терміну зберігання продуктів і препаратів [12, 13].

Залежність вмісту сухих речовин при екстрагуванні в кавітаційному змішувачі при діаметрі горловини сопла $d = 0,008$ м в результаті 60 циклів обробки наведені на рис.3. Дослідні проби відбирались через 3 цикли (12 с), 9 циклів (36 с), 15 циклів (60 с), 30 циклів (120 с) та 60 циклів (240 с).

Дослідження показали високу ефективність кавітаційної обробки на процеси масопереносу при екстрагуванні водної суспензії суцвіть нагідок

лікарських. Отримані результати свідчать (рис.3), що збільшення тривалості екстрагування в кавітаційному змішувачі призводить до збільшення вмісту сухих речовин. Найбільшою інтенсивністю характеризуються масообмінні процеси, які відбуваються під впливом кавітаційної обробки впродовж 1 хв. (15 циклів). При подальшій обробці інтенсивність масообмінних процесів дещо знижується.

Аналізуючи отримані результати і узагальнюючи попередні висновки було зроблено висновок про доцільність екстрагування суцвіть календули в експериментальному кавітаційному змішувачі з діаметром горловини сопла 8 мм і 10 мм впродовж 1 хв. (15 циклів).

Дослідження мікроструктури дослідних зразків є важливим етапом вивчення зміни їх структурно-механічних властивостей, які дозволяють візуально охарактеризувати особливості впливу використаних кавітаційних умов обробки зразків.

Під час проведення досліджень вивчались зміни мікроструктури і морфологічних особливостей дисперсних частинок фракцій зразків суспензій суцвіть календули з гідромодулем 1:15, отриманих за різної тривалості

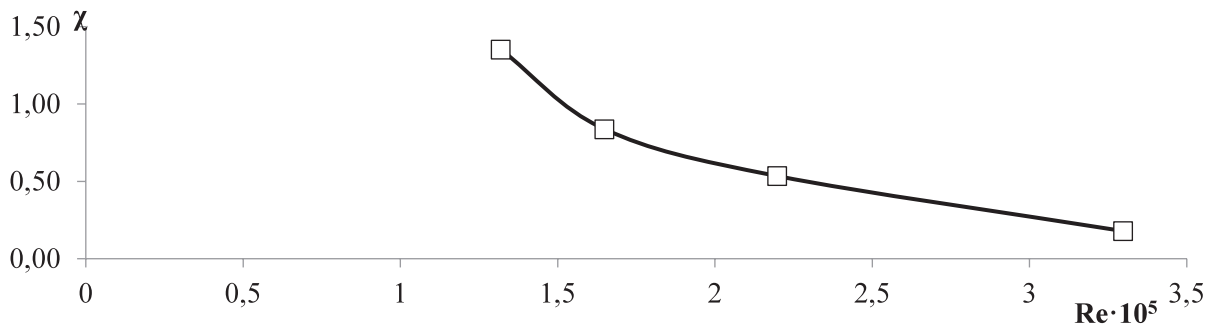


Рис. 2. Залежність числа кавітації від числа Рейнольдса

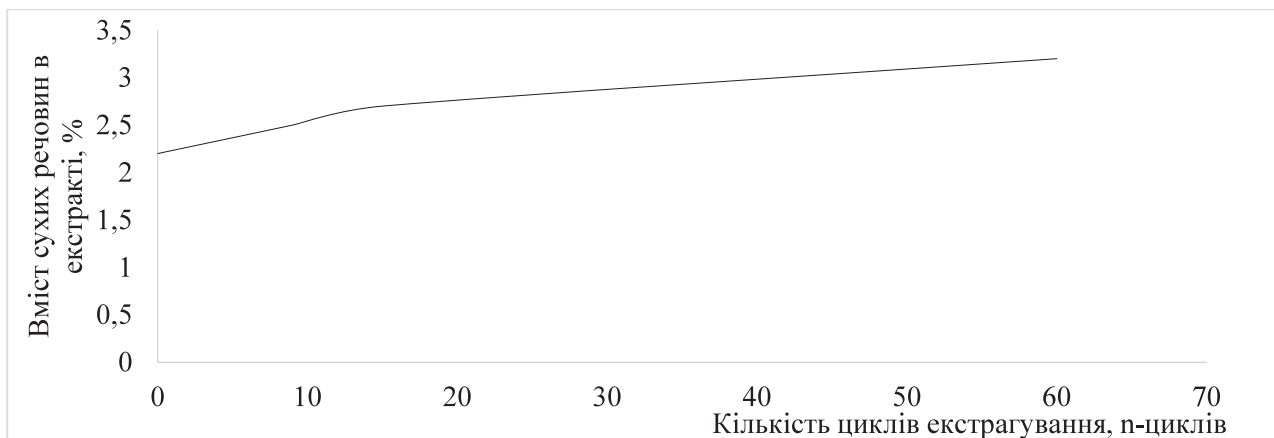


Рис. 3. Залежність вмісту сухих речовин в екстракті від циклу оброблення рослинної суспензії

впливу гідродинамічної кавітації в кавітаційному змішувачі типу трубки Вентурі з діаметром горлови-ни сопла 8 мм. Дослідження проводили за допомогою оптичного мікроскопа з використанням комп'ютерних програм аналізу зображень. Отримані зображення мікроструктури представлено рис. 4

Дослідження дозволили візуально підтвердити, що гідродинамічна кавітація характеризується потужним гідродинамічним впливом на частинки дисперсної фази рослинної сировини на мікрорівні. В результаті чого відбуваються значні зміни властивостей рослинної сировини, а БАР переходять в екстракт. Отримані резуль-

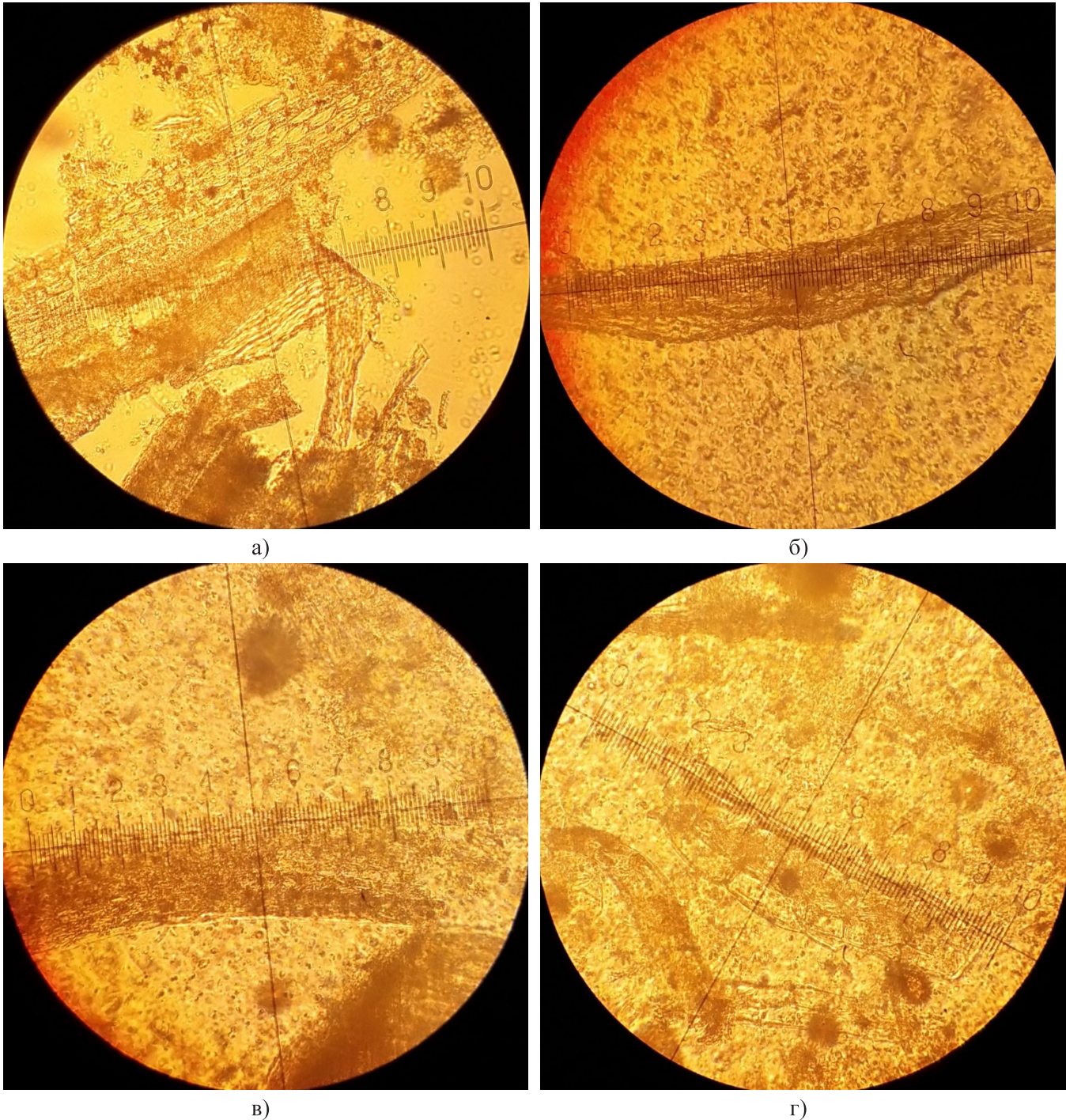


Рис. 4. Мікроструктура зразків водної суспензії нагідок, оброблених методом гідродинамічної кавітації. Збільшення 7x40 (або 280x): а) 3 цикли (12 с); б) 9 циклів (36 с); в) 15 циклів (60 с); г) 60 циклів (4 хв.)

тати показали, що запропонована обробка призводить до поступового руйнування морфологічної структури рослинних клітин сировини. Аналіз результатів досліджень мікроструктури зразка (рис. 4 а) на початковому етапі кавітаційної обробки (впродовж 3 циклів обробки) показав значну неоднорідність розмірів структурних елементів зразка по всьому об'єму, наявність упорядкованих і неупорядкованих рослинних клітин сферичної, еліптичної і, здебільшого, циліндричної форми розміром 25-200 мкм. Зразок характеризується наявністю великих включень упорядкованих повздовжніх рослинних клітин (не менше 90%), на зображенні чітко видно клітинні оболонки. Упорядковані рослинні клітини мають щільну волокноподібну перегородку утворену міцелярними нитками целюлози. Така структура пояснює складність і значні витрати енергії на диспергування сировини. Подальша обробка (рис. 4 б, в, г) призводить до поступового диспергування, розділення окремих клітинних ділянок і зменшення розміру окремих частинок. Дослідження зразка, отриманого після 15 циклів обробки зразка (рис. 4, в) показали значне руйнування рослинних клітин в полі зору. Спостерігається розмивання клітинних оболонок і накопичення значної кількості частинок нерозчинних фракцій розміром 4-20 мкм (до 80%), які знаходяться поза зоною рослинних клітин. Це дозволяє ефективно провести процес екстрагування і значно збільшити кількість БАР в екстракті. Наявністю найдрібніших частинок характеризується зразок (рис. 4, г), отриманий в результаті 60 циклів кавітаційної обробки (4 хв.), де кількість таких частинок зросла до 85-90%.

Таким чином, під дією інтенсивного впливу гідродинамічної кавітації відбуваються незворотні морфологічні зміни структурних систем рослинного матеріалу. В результаті відповідно змінюються і структурно-механічні і фізико-хімічні властивості одержаних суспензій. Проведені дослідження довели, що кавітаційна обробка зразків призводить до суттєвого зменшення дисперсності частинок і збільшення площі контакту твердої фази (рослинної сировини) і рідкої фази (екстрагенту). Внаслідок підвищується ефективність масообмінних процесів при екстрагуванні, покращуються умови екстрагування і збільшується кількість водорозчинних речовин в екстракті.

Висновки

Дослідний статичний кавітаційний змішувач типу сопла Вентурі показав себе як високоефективне обладнання в технологіях отримання екстрактів з рослинної сировини.

Використання апаратів такого типу дозволяє значно збільшити ефективність масообмінних процесів при екстрагуванні за рахунок диспергування частинок твердої фази рослинного зразка, поступового збільшення поверхні контакту між фазами при подрібненні і інтенсивного перемішування маси суспензії для створення високої різниці концентрацій. Таким чином, досягається значне зменшення тривалості проведення процесу.

Раціональний вибір геометричних параметрів конструкції апарату і теплотехнологічних режимів проведення процесів дозволяє отримати екстракти заданого хімічного складу із високим вмістом БАР.

Отримані висновки підтверджуються дослідженнями мікроструктури.

ЛІТЕРАТУРА

1. *Hamuel J.* Phytochemicals: Extraction Methods, Basic Structures and Mode of Action as Potential Chemotherapeutic Agents [Internet]. Phytochemicals - A Global Perspective of Their Role in Nutrition and Health. InTech; 2012. Available from: <http://dx.doi.org/10.5772/26052>
2. *Azwanida, N.N.* A Review on the Extraction Methods Use in Medicinal Plants, Principle, Strength and Limitation. Medicinal and Aromatic Plants, 2015. 4, 196. doi:10.4172/2167-0412.1000196
3. *Rojas Bedoya LC, Gómez López K, Marín Pareja N.* Extraction of metabolites from Calendula officinalis and evaluation of their colorant and antibacterial capacity. Rev. colomb. biotechnol. [Internet]. Jan 1, 2020 ; 22(1):60-9. <https://doi.org/10.15446/rev.colomb.biote.v22n1.79999>
4. *Abubakar AR, Haque M.* Preparation of Medicinal Plants: Basic Extraction and Fractionation Procedures for Experimental Purposes. J Pharm Bioallied Sci. 2020;12(1):1-10. doi:10.4103/jpbs.JPBS_175_19
5. *Ak, G. Zengin, G. Sinan, K.I. Mahomoodally, M.F. Picot-Allain, M.C.N. Cakir, O. Bensari, S. Yilmaz, M.A.; Gallo, M. Montesano, D.* A Comparative Bio-Evaluation and Chemical Profiles of Calendula officinalis L. Extracts Prepared via Different Extraction Techniques. Appl. Sci. 2020, 10, 5920. <https://doi.org/10.3390/app10175920>
6. *Ourabia, Imane & Djebbar, Réda, Samira, Tata, Sabaou, Nasseridine, Fouial-Djebbar, Djamilia.* Determination of essential oil composition, phenolic content, and antioxidant, antibacterial and antifungal activities of marigold (calendula officinalis l.) cultivated in algeria. Carpathian Journal of Food Science and Technology. 2019. 11. 93-110. 10.34302/crpfst/2019.11.2.8.

7. Долінський А.А., Авдєєва Л.Ю., Макаренко А.А. Кавітаційні технології для виробництва нанопрепаратів. Київ: Наук. Думка. 2020. 112 с.
8. Накорчевский А.И., Басок Б.И. Гидродинамика и тепломассоперенос в гетерогенных системах и пульсирующих потоках (под ред. А.А. Долинского). – Киев, Наукова думка, 2001. – 348 с.
9. Avdieieva L., Makarenko A., Turchyna T., Dekusha H., Kozak M. Cavitation technology for intensification of plant raw materials extraction. Food science and technology. 2023. Vol. 17, Issue 1. P. 38-50 <https://doi.org/10.15673/fst.v17i1.2559>
10. Terán Hilares R, Dos Santos JG, Shiguematsu NB, Ahmed MA, da Silva SS, Santos JC. Low-pressure homogenization of tomato juice using hydrodynamic cavitation technology: Effects on physical properties and stability of bioactive compounds. Ultrason Sonochem. 2019;54:192-197. doi:10.1016/j.ultsonch.2019.01.039
11. Авдєєва Л. Ю., Макаренко А. А. Ефективність використання сопел типу Вентурі при отриманні водних рослинних екстрактів. Scientific Works of NUFT 2022. Volume 28, Issue 6. С. 64 -72 DOI: 10.24263/2225-2924-2022-28-6-8
12. Xun Sun, Chan Hyeok Kang, Jong Jin Park, Hyun Soo Kim, Ae Son Om, Joon Yong Yoon, An experimental study on the thermal performance of a novel hydrodynamic cavitation reactor, Experimental Thermal and Fluid Science, V. 99, 2018, P. 200-210, <https://doi.org/10.1016/j.expthermflusci.2018.02.034>.
13. Milly PJ, Toledo RT, Harrison MA, Armstead D. Inactivation of food spoilage microorganisms by hydrodynamic cavitation to achieve pasteurization and sterilization of fluid foods [published correction appears in J Food Sci. 2008 Mar;73(2):vii]. J Food Sci. 2007;72(9):M414-M422. doi:10.1111/j.1750-3841.2007.00543.x

**STUDY OF THE PROCESS OF PLANT RAW
MATERIAL EXTRACTION
IN A STATIC-TYPE CAVITATION INLINE MIXER**

Avdieieva L.Yu.¹, Makarenko A.A.², Turchyna T. Ya.³

*Institute of Engineering Thermophysics of the National
Academy of Sciences of Ukraine, 2a, Maria Kapnist st.,
Kyiv, 03057, Ukraine*

¹Dr. Sci. (Engin Senior Research Scientist, <https://orcid.org/0000-0002-3434-1669>)

²PhD (Engin.), <https://orcid.org/0000-0003-2338-5364>

³PhD (Engin.), <https://orcid.org/0000-0003-4902-3732>

<https://doi.org/10.31472/tpe.2.2024.4>

Abstract. The flowering heads of calendula have a significant content of biologically active substances (BAS) with a wide range of pharmacological activities. Traditional methods for obtaining their aqueous extracts include maceration or percolation. However, these methods have significant drawbacks. The rational choice of equipment and the study of the influence of thermophysical conditions on the extraction process of specific plant raw materials to intensify mass transfer processes are relevant.

The aim of the study is to investigate the transition of solid substances of calendula flowers into a soluble state in a flow cavitation mixer of a static type to intensify mass transfer processes in obtaining aqueous extracts.

For the research, previously ground dry calendula flower heads, swollen in distilled water at a hydro module of 1:15 and reduced to 0,1-2 mm, were used. The work was carried out on an experimental cavitation mixer of the Venturi tube type with a variable cavitation reactor with a nozzle throat diameter ranging from 0,006 m to 0,12 m. The efficiency of extraction was determined by the amount of water-soluble substances, and the cavitation phenomenon was characterized by the cavitation number.

Results: The overall design of the cavitation apparatus, the profile and geometric parameters of the nozzle, the flow parameters, as well as the properties of the plant material, significantly affect the hydrodynamic conditions and the development of cavitation effects during processing. The Venturi-type flow cavitation mixer used in the research showed high efficiency in processing mass transfer processes during the extraction of a water suspension of calendula

flower heads. The results obtained indicate that the most significant impact of cavitation effects is observed at nozzle throat diameters of 0,08 m and 0,10 m, with cavitation numbers $\chi = 0,53$ and $\chi = 0,84$, respectively. In this case, the process duration can be limited to 60 seconds. The obtained conclusions are confirmed by microstructure studies.

References 13, figures 4.

Key words: extraction, mass transfer processes, plant extracts, hydrodynamic cavitation, Venturi tube, cavitation number.

1. *Hamuel J.* Phytochemicals: Extraction Methods, Basic Structures and Mode of Action as Potential Chemotherapeutic Agents [Internet]. Phytochemicals-A Global Perspective of Their Role in Nutrition and Health. InTech; 2012. Available from: <http://dx.doi.org/10.5772/26052>

2. *Azwanida, N.N.* A Review on the Extraction Methods Use in Medicinal Plants, Principle, Strength and Limitation. Medicinal and Aromatic Plants, 2015. 4, 196. doi:10.4172/2167-0412.1000196

3. *Rojas Bedoya LC, Gómez López K, Marín Pareja N.* Extraction of metabolites from Calendula officinalis and evaluation of their colorant and antibacterial capacity. Rev. colomb. biotechnol. [Internet]. Jan 1, 2020 ; 22(1):60-9. <https://doi.org/10.15446/rev.colomb.biote.v22n1.79999>

4. *Abubakar AR, Haque M.* Preparation of Medicinal Plants: Basic Extraction and Fractionation Procedures for Experimental Purposes. J Pharm Bioallied Sci. 2020;12(1):1-10. doi:10.4103/jpbs.JPBS_175_19

5. *Ak, G. Zengin, G. Sinan, K.I. Mahomoodally, M.F. Picot-Allain, M.C.N. Cakir, O. Bensari, S. Yilmaz, M.A.; Gallo, M. Montesano, D.* A Comparative Bio-Evaluation and Chemical Profiles of Calendula officinalis L. Extracts Prepared via Different Extraction Techniques. Appl. Sci. 2020, 10, 5920. <https://doi.org/10.3390/app10175920>

6. *Ourabia, Imane & Djebbar, Réda, Samira, Tata, Sabaou, Nasseridine, Fouial-Djebbar, Djamila.* Determination of essential oil composition, phenolic content, and antioxidant, antibacterial and antifungal activities of marigold (calendula officinalis L.) cultivated in Algeria. Carpathian Journal of Food Science and Technology. 2019. 11. 93-110. 10.34302/crpfjst/2019.11.2.8.

7. *Dolinskiy A.A., Avdieieva L.Yu., Makarenko A.A.* Kavitatsiyni tekhnolohiyi dlya vyrobnytstva nanopreparativ.[Cavitation Technologies for the Production of Nanopreparations] Kyiv: Nauk. Dumka. 2020. 112 p. (in Ukr.)

8. *Nakorchevsky A.I., Basok B.I.* Hydrodynamiky i teplomassoperenos v heterohennykh systemakh i pulsiruyushchikh potokakh [Hydrodynamics and Heat and Mass Transfer in Heterogeneous Systems and Pulsating Flows] (pod red. A.A. Dolinskoho). Kyiv, Naukova dumka, 2001. 348 p. (in Rus.)
9. *Avdieieva L., Makarenko A., Turchyna T., Dekusha H., Kozak M.* Cavitation technology for intensification of plant raw materials extraction. Food science and technology. 2023. Vol. 17, Issue 1. P. 38-50 <https://doi.org/10.15673/fst.v17i1.2559>
10. *Terán Hilares R, Dos Santos JG, Shiguematsu NB, Ahmed MA, da Silva SS, Santos JC.* Low-pressure homogenization of tomato juice using hydrodynamic cavitation technology: Effects on physical properties and stability of bioactive compounds. Ultrason Sonochem. 2019;54:192-197. doi:10.1016/j.ultsonch.2019.01.039
11. *Avdieieva L. Yu., Makarenko A. A.* Efektyvnist vykorystannya sopol typu Venturi pry otrymanni vodnykh roslynnykh ekstraktiv [The efficiency of using Venturi-type nozzles in obtaining aqueous plant extracts]. Scientific Works of NUFT 2022. Volume 28, Issue 6. P. 64-72 DOI: 10.24263/2225-2924-2022-28-6-8
12. *Xun Sun, Chan Hyeok Kang, Jong Jin Park, Hyun Soo Kim, Ae Son Om, Joon Yong Yoon,* An experimental study on the thermal performance of a novel hydrodynamic cavitation reactor, Experimental Thermal and Fluid Science, V. 99, 2018, P. 200-210, <https://doi.org/10.1016/j.expthermflusci.2018.02.034>.
13. *Milly PJ, Toledo RT, Harrison MA, Armstead D.* Inactivation of food spoilage microorganisms by hydrodynamic cavitation to achieve pasteurization and sterilization of fluid foods [published correction appears in J Food Sci. 2008 Mar;73(2):vii]. J Food Sci. 2007;72(9):M414-M422. doi:10.1111/j.1750-3841.2007.00543.x

Отримано 19.09.2023

Received 19.09.2023

Прийнято до друку 11.04.2024
Accepted for publication 11.04.2024