

Остапенко Ж.І.

PhD., ст. викладач

Мельник В.М.

д.т.н., професор

Костик С.І.

к.т.н., доцент

Косова В.П.

Асистент

**Національний технічний
університет України
«Київський політехнічний
інститут імені Ігоря
Сікорського»**

Ostapenko Zh.

Ph.D., Senior Lecturer

Mel'nick V.

Doctor of Technical Science, Professor

Kostyk S.Candidate of Technical Sciences,
Associate Professor**Kosova V.**

Assistant

**National Technical University
of Ukraine "Igor Sikorsky Kyiv
Polytechnic Institute"**

МОДЕЛЮВАННЯ ПОШИРЕННЯ
УЛЬТРАЗВУКОВИХ ХВИЛЬ В
АКУСТИЧНОМУ ЕКСТРАКТОРІ ДЛЯ
ОБРОБКИ РОСЛИННОЇ СИРОВИНИ ©
2026 by Остапенко Ж.І., Мельник В.М.,
Костик С.І., Косова В.П. is licensed under
CC BY 4.0

УДК 534.232:004.942:66.061.34**DOI: 10.37128/2306-8744-2026-3-3**

МОДЕЛЮВАННЯ ПОШИРЕННЯ УЛЬТРАЗВУКОВИХ ХВИЛЬ В АКУСТИЧНОМУ ЕКСТРАКТОРІ ДЛЯ ОБРОБКИ РОСЛИННОЇ СИРОВИНИ

Об'єктом дослідження є процес поширення ультразвукових хвиль і формування акустично індукованих гідродинамічних полів у рідкому середовищі акустичного екстрактора для обробки рослинної сировини.

Проблема, що вирішувалася, полягає у встановленні впливу кількості та просторової конфігурації ультразвукових випромінювачів на структуру швидкісних і акустичних полів у робочому об'ємі апарата, оскільки неоднорідність ультразвукового поля може обмежувати ефективність масообмінних та екстракційних процесів, а також призводити до нерівномірної інтенсивності обробки сировини в різних зонах робочого об'єму.

У роботі виконано чисельне моделювання в середовищі ANSYS CFX із використанням CFD-підходу для води за ізотермічних умов із гармонічним збудженням поверхні випромінювачів. Проаналізовано просторово-часовий розподіл швидкості потоку, акустичного тиску та їх градієнтів для двох конфігурацій – з одним центральним випромінювачем і з чотирма випромінювачами, розміщеними по периферії. Отримані результати показали, що багатоджерельне ультразвукове збудження формує більш однорідне акустичне поле, підвищує рівень пульсацій швидкості та тиску по всьому перерізу апарата і розширює зону інтенсивного гідродинамічного впливу.

Встановлені закономірності пояснюються суперпозицією та інтерференцією хвиль, згенерованих кількома джерелами, що призводить до зростання середніх значень гідродинамічних параметрів і градієнтів тиску, а також до формування умов, потенційно сприятливих для кавітаційних явищ.

Отримані результати можуть бути використані під час проектування та оптимізації ультразвукових екстракторів, вибору раціональної кількості та розміщення випромінювачів і визначення ефективних режимів ультразвукової обробки для інтенсифікації масообмінних і екстракційних процесів у системах переробки рослинної сировини.

Ключові слова: ультразвукова екстракція, акустичний екстрактор, CFD-моделювання, ультразвукове поле, акустичний тиск, гідродинаміка, масообмінні процеси, рослинна сировина.

Постановка проблеми. Екстракція біологічно активних речовин з рослинної сировини є ключовою операцією у фармацевтичній, харчовій та біотехнологічній промисловості. Традиційні методи екстракції хоча й широко застосовуються,

характеризуються значними енерговитратами, тривалістю та потребою у великих кількостях органічних розчинників. Ультразвукова екстракція розглядається як ефективний інструмент інтенсифікації масопереносу при вилученні біологічно активних речовин (БАР).



Застосування ультразвуку дозволяє суттєво знизити тривалість процесу, температуру та витрати розчинників, що неодноразово підтверджено експериментальними дослідженнями.

Більшість робіт, присвячених дослідженню впливу ультразвукового випромінювання на процеси екстрагування БАР, є переважно експериментальними і базуються на однофакторних або статистичних підходах до оптимізації режимів, без детального розгляду гідродинаміки потоку в апараті та просторового розподілу полів швидкостей, концентрацій і температури.

Сучасні математичні описи ультразвукової екстракції зазвичай обмежуються зосередженими або квазіоднорізними моделями масопереносу між клітиною, міжклітинним простором та об'ємним екстрагентом. Такі підходи дозволяють оцінити інтегральну кінетику процесу, але не враховують впливу реальної гідродинамічної картини в екстракторі, нерівномірності розподілу ультразвукового поля, локальних зон застою, інтенсивності перемішування та можливих градієнтів концентрації і температури в об'ємі апарата.

CFD-моделювання є потужним інструментом для вирішення задач, пов'язаних із моделюванням гідродинаміки та тепломасообміну під час поширення ультразвукових хвиль в суцільному середовищі. Однак, відсутність детальних CFD-досліджень ультразвукових екстракторів ускладнює цілеспрямоване конструювання обладнання та вибір раціональних режимів роботи. Це створює потребу в побудові тривимірної комп'ютерної моделі, яка б одночасно описувала гідродинаміку потоку рідини в екстракторі, масоперенос компонентів з твердої фази в рідину та вплив ультразвукової дії через модифікацію коефіцієнтів масопереносу. У зв'язку з цим актуальною є задача розроблення CFD-моделі акустичного екстрактора для рослинної сировини, яка дозволить кількісно оцінити вплив конструктивних параметрів апарата та режимів ультразвукової обробки на гідродинаміку та ефективність екстракції.

Аналіз останніх досліджень. Автори [1] встановили, що екстракція *Gardenia Yellow* з *Fructus Gardeniae* забезпечує вихід 95,15% за 40 хв при 40°C, що значно перевищує ефективність традиційних методів. Подібні закономірності описані для ізофлавонів *Iris tectorum*, де ультразвук забезпечує вищі виходи за 45 хв порівняно з 6 год та 18 год екстракції за Сокслетом та мацерацією відповідно [2].

Для вилучення буфадієнолідів із *ChanSu* оптимальні параметри ультразвукової екстракції (20 хв, 70% метанол, 125 Вт) забезпечують той самий рівень вилучення, що й екстракція за

Сокслетом за 6 год [3]. Екстракція куркуміну з *Curcuma amada* демонструє 72% виходу за 1 год ультразвукової екстракції порівняно з 62% після 8 год традиційної екстракції [4].

Основою інтенсифікації процесу екстракції з використанням ультразвукового випромінювання є кавітаційні явища, що супроводжуються пульсаціями тиску, локальним нагрівом, мікроструменями та колапсом бульбашок. Це спричиняє руйнування клітин, зменшення розміру частинок і зниження дифузійного опору. Додатково формуються мікротечії й турбулентні збурення, які покращують конвективний масоперенос.

Найбільш інтенсивна кавітація спостерігається в діапазоні 18-45 кГц. Експериментальні дані демонструють зниження ефективності екстракції зі зростанням частоти. Наприклад, екстракція кумарину з *Justicia pectoralis* при переході до високої частоти супроводжується зменшенням виходу на 15,7–30,8 % [5]. Це узгоджується з теоретичними даними, які свідчать про зменшення кавітаційного ефекту в діапазоні 400–800 кГц [6].

Теоретичну інтерпретацію цих процесів наведено у математичній моделі авторів [6], де описано масоперенос між клітинним об'ємом, міжклітинним простором і основною рідинною фазою. Розрахунки показують скорочення тривалості екстракції приблизно у 1,5 раза за наявності ультразвуку.

Температура чинить подвійний вплив: з одного боку, підвищення температури зменшує в'язкість розчинників і покращує дифузію, з іншого – може викликати деградацію термолабільних компонентів і послаблювати кавітацію через збільшення тиску насиченої пари. Оптимальні температури для екстракції *Gardenia Yellow*, ізофлавонів, флавоноїдів і куркуміну перебувають у межах 35–50°C [1-2, 4, 7].

Окрім інтенсифікації масопереносу, важливо оцінювати вплив ультразвукового випромінювання на якість одержаних продуктів. У більшості досліджень деградації цільових компонентів не спостерігали при дотриманні помірних температур і оптимальної тривалості обробки. Наприклад, при екстракції кумарину з *Justicia pectoralis* підвищення частоти ультразвуку зменшувало вихід цільового продукту, але не призводило до хімічного розкладу кумарину. [5]

У роботі [7] було проведено дослідження екстрагування флавоноїдів з *Sparganii rhizoma*. Після очищення екстракту на поліамідній смолі вміст флавоноїдів сягав 94,6%, а дослідження антиоксидантних властивостей показали високу антиоксидантну активність отриманих фракцій.

Дослідження [8] демонструють, що при попередній ультразвуковій обробці чорного кмину до холодного пресування, зростання потужності ультразвуку збільшує кислотне число і вміст фенольних сполук, підвищує пероксидне число та інтенсивність забарвлення, але не впливає на показник заломлення. Це свідчить про те, що



кращий масоперенос може супроводжуватися більшою схильністю до окисних процесів, що потрібно враховувати при виборі режимів.

Дослідження акустичної кавітації показали, що наявні гідродинамічні моделі не забезпечують коректного опису процесів у швидкозмінних полях тиску. Запропоновано вдосконалену модель, яка враховує другі похідні в рівнянні Релея-Плессета, що дозволило досягти узгодження з експериментальними даними щодо динаміки каверн, їх об'єму та пульсацій тиску при ультразвуковому збудженні. Показано, що модель є ефективною для чисельного аналізу кавітаційних течій у нестационарних акустичних полях. [9]

У роботі [10] проведено комплексне дослідження впливу амплітуди ультразвукової потужності на поведінку рідини в низькочастотному (24 кГц) сонореакторі та встановлено, що інтенсивність ультразвукового впливу суттєво визначає характеристики мікропухирців і акустичного струминного руху. Поеднання математичного моделювання, 3D CFD-симуляцій і експериментальних PIV-вимірювань показало, що зі збільшенням потужності зростають швидкість осциляції пухирців, умови утворення локальних «гарячих точок» та інтенсивність акустичного стримінгу. Встановлено кількісну залежність між потужністю ультразвуку, об'ємною часткою мікропухирців і швидкістю потоку, що підтверджує ефективність ультразвукового впливу на гідродинаміку рідин.

Експериментальне та чисельне дослідження впливу ультразвукових хвиль на процеси змішування в Т-подібному мікрореакторі дозволило встановити, що ультразвук низької частоти (42 кГц) істотно покращує якість змішування. Використання реакції Віллемс-Душмана дозволило кількісно оцінити індекс сегрегації, який зменшувався зі збільшенням витрати та за наявності ультразвукового впливу. Показано, що навіть за низького енергоспоживання ультразвуковий вплив дозволяє знизити індекс сегрегації на 10-20%. CFD-моделювання підтвердило експериментальні результати та пояснило механізми інтенсифікації змішування. [11]

У дослідженні [12] було вивчено вплив високочастотних ультразвукових хвиль на гідродинаміку та масообмін у системі поглинання CO₂ з рідини та встановлено, що ультразвукові явища, зокрема акустичний стримінг і акустичний фонтан, істотно інтенсифікують процеси змішування. За допомогою CFD-моделювання в середовищі ANSYS Fluent змодельовано сили ультразвукового впливу та проведено параметричний аналіз впливу висоти абсорбера й ультразвукової потужності. Показано, що максимальна інтенсифікація досягається за високої потужності та малої висоти апарата, тоді як енергоефективність зростає за протилежних умов. Отримані результати мають важливе значення для оптимізації та масштабування абсорбційних

процесів, інтенсифікованих ультразвуковим впливом.

Мета дослідження Метою проведених чисельних симуляцій є комплексне дослідження процесів поширення ультразвукових хвиль у рідкому середовищі акустичного екстрактора шляхом аналізу просторово-часового розподілу акустичного тиску, полів швидкості та хвильових структур у робочому об'ємі апарата.

Дослідження спрямоване на встановлення закономірностей формування акустичних і гідродинамічних полів під дією ультразвукового випромінювання, оцінку впливу кількості та конфігурації ультразвукових випромінювачів на інтенсивність ультразвуково-індукованого руху рідини, характер інтерференції хвиль і рівень локальних градієнтів швидкості, а також на виявлення зон підвищеної енергонавантажності рідкого середовища, що визначають ефективність масообмінних та екстракційних процесів під час обробки рослинної сировини.

Матеріали і методи. Об'єктом дослідження є процес поширення ультразвукових хвиль у рідкому середовищі акустичного екстрактора та пов'язані з ним акустично індуковані гідродинамічні явища у робочому об'ємі апарата. Дослідження охоплює формування просторово-часових розподілів акустичного тиску, швидкості потоку та їх градієнтів у водному середовищі. Розглянуто дві конструктивні конфігурації екстрактора: з одним центральним розміщеним ультразвуковим випромінювачем і з чотирма випромінювачами, симетрично розташованими по периферії. Ультразвукове збудження задавалося у вигляді гармонічного зміщення поверхні випромінювачів. Об'єкт дослідження охоплює процеси інтерференції хвиль, формування акустичного стримінгу та просторової неоднорідності гідродинамічних параметрів у межах апарата.

Виклад основного матеріалу. Математичне моделювання поширення ультразвукових хвиль у рідинному середовищі ґрунтується на рівняннях механіки суцільних середовищ і дозволяє кількісно описати акустичну відповідь рідини на високочастотне збудження. В основі такої моделі лежить розгляд рідини як слабо стисливого континууму, в якому ультразвукові коливання тиску, густини та швидкості є взаємопов'язаними та поширюються у вигляді пружних хвиль. Застосування математичної моделі дає змогу врахувати вплив геометрії апарата, граничних умов та параметрів випромінювачів на просторово-часовий розподіл акустичного поля. Особливу роль у цьому контексті відіграє аналіз миттєвих і середніх значень акустичного тиску, а також його градієнтів, які визначають інтенсивність кавітаційних та акустично індукованих гідродинамічних ефектів. Таким чином, побудова адекватної математичної моделі є необхідною передумовою для прогнозування

ефективності ультразвукового впливу на рідинні системи та оптимізації режимів роботи екстрактора.

Лінійне хвильове рівняння для коливань акустичного тиску у однорідному, ізотропному, стисливному і нерухомому рідкому середовищі [13]:

$$\nabla^2 p(\mathbf{r}, t) - \frac{1}{c^2} \frac{\partial^2 p(\mathbf{r}, t)}{\partial t^2} = 0 \quad (1)$$

де ∇^2 – оператор Лапласа, який описує суму другорядних просторових похідних по координатах x, y, z ; $p(\mathbf{r}, t)$ – акустичний тиск; $c = \sqrt{K/\rho}$ – швидкість звуку у воді; K – об'ємний модуль пружності; ρ – густина води.

Рівняння (1) описує лінійне розповсюдження повздовжніх хвиль у рідині, коли

флуктуації тиску є невеликими відносно середнього тиску середовища, а нелінійні ефекти і дисипація можуть бути незначними.

Комп'ютерна модель. Дослідження проводилося за допомогою програмного комплексу ANSYS CFX (версія 21.2) для моделювання ультразвукових випромінювачів у водному середовищі. Було виконано дві незалежні симуляції з ідентичними параметрами, що відрізнялися лише конфігурацією випромінювачів. В одному випадку був використаний центрально розміщений випромінювач (рис. 1, а), в іншому – 4 випромінювачі, розташовані по периферії через кожні 90 градусів (рис. 1, б).

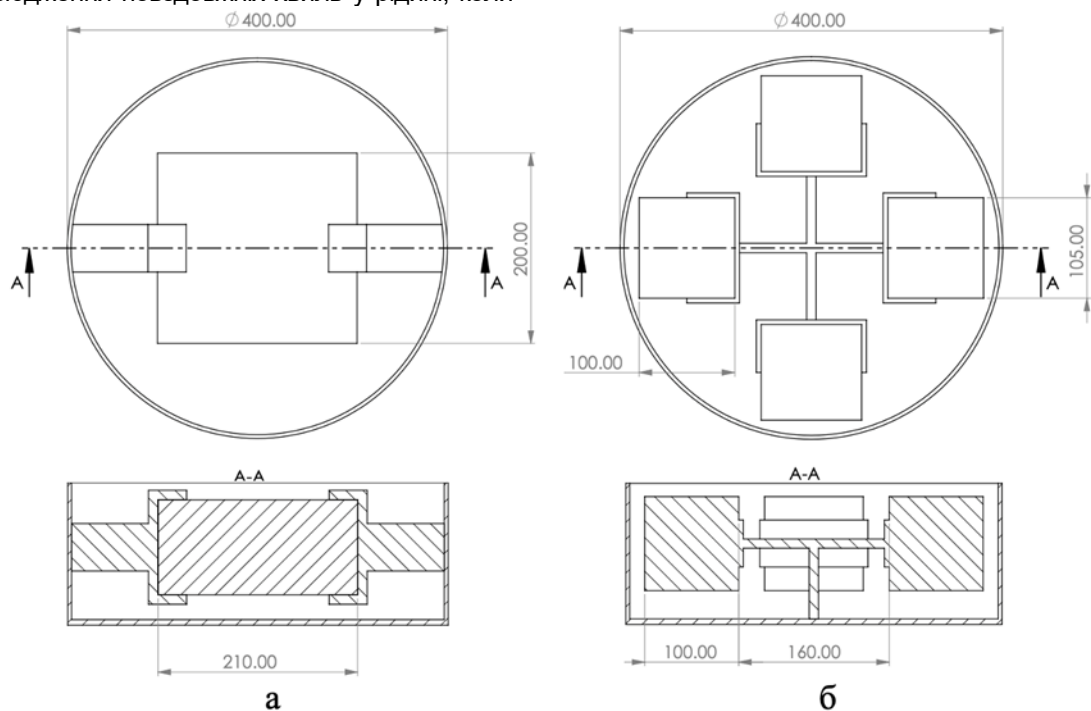


Рис.1. Геометрія розрахункової області: а – центральне розміщення випромінювача; б – розміщення 4-х випромінювачів по периферії

У першій симуляції застосовувався один суцільний ультразвуковий випромінювач, розташований у нижній частині домену (геометрія представлена як пластина). У другій симуляції використовувалися чотири окремі випромінювачі, також розташовані в нижній частині з симетричним розміщенням, з загальною площею поверхні, еквівалентною площі суцільного випромінювача з першої симуляції. Це дозволило порівняти ефективність розподілених джерел ультразвуку порівняно з монолітним.

Фізична модель базувалася на CFD (обчислювальній гідродинаміці) з використанням солвера CFX. Аналіз був транзйєнтним (часовим), з початковим часом 0 с, загальною тривалістю 0,001 с та кроком часу $1 \cdot 10^{-7}$ с. Домен моделі становив рідинне середовище (вода), визначене як безперервна флюїдна фаза з матеріалом

"Compressible Water" (стислива вода для акустичних симуляцій).

Моделювання проводилось для ізотермічних умов, без врахування теплообміну в рідині, із припущенням, що зміна температури внаслідок кількості теплоти, яка може виділятися при кавітаційних явищах для такого об'єму рідини буде незначною. При цьому зміни температури на теплофізичні властивості середовища при таких змінах температури будуть також незначними, то і припускаємо, що швидкість поширення звукових хвиль також для всього об'єму суцільного середовища буде постійною. Також припускається, що в початковий момент дослідження рідина знаходиться у відносному спокої, з можливими незначними ламінарними потоками. Фізичні властивості суцільного середовища обирались для води за температури

25 °С: густина $\rho = 997$ кг/м³; молярна маса $M=0,018$ кг/моль; теплоємність при постійному тиску

$C_p = 4176$ Дж/(кг·К); динамічна в'язкість $\mu = 8,93 \cdot 10^{-4}$ Па·с; теплопровідність $\lambda = 0,611$ Вт/(м·К); критерій Прандтля $Pr = 6,3$ [14].

Густина води при моделюванні задавалася для вирішення задач пов'язаних із поширенням звуку задавалася виразом:

$$\rho = \rho_{25} + \frac{P}{v^2}, \quad (2)$$

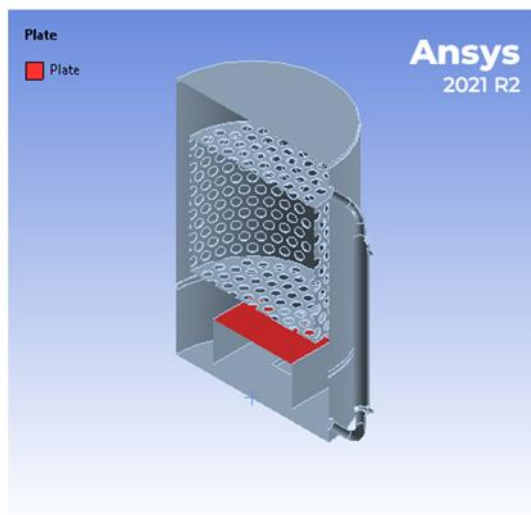
де ρ_{25} – густина води при температурі 25 °С; P – тиск в потоці суцільного середовища, Па; $v = 1480$ м/с – швидкість поширення звукових хвиль у воді за температури 25 °С.

Випромінювачі моделювалися виключно, як плоскі гладкі поверхні на яких задавалися граничні умови "Plate" без застосування матеріалів, всі інші поверхні вважались жорсткими стінками, на яких задавалися граничні умови "Walls" (рис. 2. а, б).

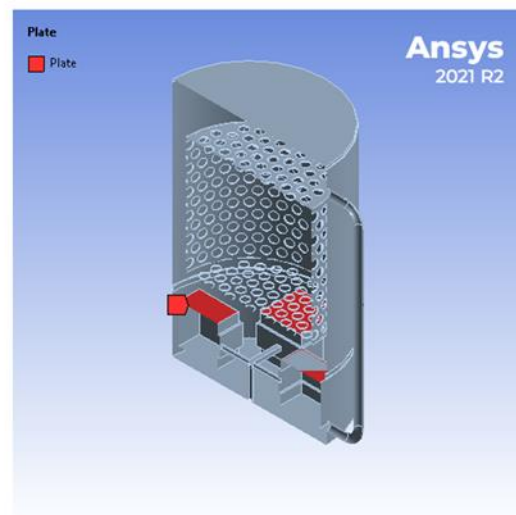
Поверхня випромінювача ("Plate"): нерухома в напрямках осей X та Z , з заданим зміщенням у напрямку вертикальної осі Y за виразом "Plate Displacement":

$$y(t) = A \cdot \sin(2\pi f \cdot t), \quad (3)$$

де, $y(t)$ – зміщення поверхні випромінювача в момент часу t , м; A – амплітудне значення зміщення (амплітуда), м; f – частота коливань поверхні випромінювача, Гц.



а



б

Рис. 2. Граничні умови: а – центральне розміщення випромінювача; б – розміщення 4-х випромінювачів по периферії

Для симуляції ультразвукового випромінювання буди задані наступні параметри: амплітуда коливань поверхні випромінювача $A = 5 \cdot 10^{-7}$ м; частота коливань поверхні випромінювача $f = 36$ кГц.

Відповідно рівняння коливань (3) у явному вигляді має вид:

$$y(t) = 5 \cdot 10^{-7} \cdot \sin(2\pi \cdot 36000 \cdot t). \quad (4)$$

Всі інші поверхні, так звані стінки домену "Walls" задавалися, нерухомі, без ковзання, з опцією "No Slip Wall" та стаціонарним рухом сітки.

Деформація сітки реалізовувалася за моделлю "Displacement Diffusion" з підвищенням жорсткості поблизу малих об'ємів (експонента жорсткості 2,0, референсний об'єм – середній контрольний). Початкові умови: нульова швидкість у всіх напрямках, відносний тиск 1 атм. Вихідні дані включали тиск та швидкість, записані кожні 10 кроків часу без сітки.

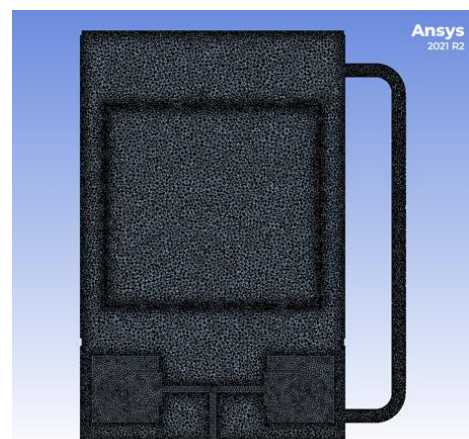


Рис.3. Розрахункова сітка в ANSYS CFX

Сітка генерувалася для всього робочого об'єму з лінійними елементами, розміром елемента 3 мм, без адаптивного розміру (рис. 3). Швидкість зростання – 1,2, максимальний розмір – 6 мм. Застосовано дефітуринг сітки (розмір дефітурингу за замовчуванням 1,5·10⁻² мм) та захоплення кривизни (мінімальний розмір 3·10⁻² мм,

нормальний кут кривизни 18°), але без захоплення близькості. Суть його застосування полягає у видаленні дрібних деталей (фічерів), які не впливають на загальну точність розрахунку, але значно ускладнюють побудову сітки та збільшують час моделювання. Діагональ (bounding box) – 883,22 мм, середня площа поверхні – 3192,7 мм², мінімальна довжина ребра – 8,4431 мм. Загальна статистика сітки для нашої моделі: 1 263 165 вузлів, 6 847 275 елементів.

Контроль солвера задавався з наступними параметрами: схема адвекції (Advection Scheme) – високої роздільності, критерії збіжності – RMS (Root Mean Square) з цільовим залишком 10-5, максимум 10 ітерацій коефіцієнтів на один крок. Схема часу – другого порядку (Backward Euler).

Результати і обговорення. За результатами чисельного моделювання, виконаного в середовищі ANSYS CFX, проаналізовано гідродинамічну відповідь рідинного екстрактора циліндричної форми на ультразвукове збудження для двох конфігурацій випромінювачів. На представлених контурах швидкостей (рис. 4) відображено просторовий розподіл миттєвих та середніх значень модуля швидкості потоку в усьому об'ємі апарату в діапазоні 0-0,4 м/с, що дозволяє оцінити інтенсивність акустично індукованого стримінгу.

У випадку одного ультразвукового випромінювача, розташованого в нижній центральній частині апарату (рис. 4. а), формується локалізована зона підвищених швидкостей над випромінювачем, яка характеризується яскраво вираженим осьовим струменем та градієнтами швидкості, що зменшуються у напрямку до

периферії. Максимальні швидкості в цій конфігурації досягають значень близьких до 0,35-0,40 м/с, однак їх просторовий розподіл є суттєво неоднорідним, а середні швидкості в основному об'ємі екстрактора залишаються на рівні 0,10-0,18 м/с, що вказує на обмежену зону ефективного ультразвукового впливу.

Натомість у конфігурації з чотирма ультразвуковими випромінювачами (рис. 4. б) спостерігається принципово інша структура поля швидкостей. Накладання хвиль, що генеруються кількома джерелами, призводить до формування чітко вираженої інтерференційної картини, яка проявляється у вигляді чергування зон підвищених і знижених швидкостей по всьому перерізу апарату. Це зумовлює більш рівномірний розподіл акустичного стримінгу та значне розширення області інтенсивного гідродинамічного впливу. Хоча пікові значення швидкості в окремих локальних зонах можуть бути дещо нижчими або співставними з випадком одного випромінювача (близько 0,30-0,38 м/с), середні швидкості по об'єму екстрактора зростають до 0,18-0,25 м/с, що свідчить про ефективнішу інтенсифікацію гідродинамічних і масообмінних процесів.

Горизонтальні перерізи апарату (рис. 4. в, г) додатково підтверджують зазначені висновки. Для одного випромінювача поле швидкостей має виражену осьову симетрію з концентрацією високошвидкісних зон поблизу центральної області, тоді як у випадку чотирьох випромінювачів швидкісні контури демонструють складну багатовихрову структуру, характерну для інтерференції акустичних хвиль і суперпозиції стримінгових течій.

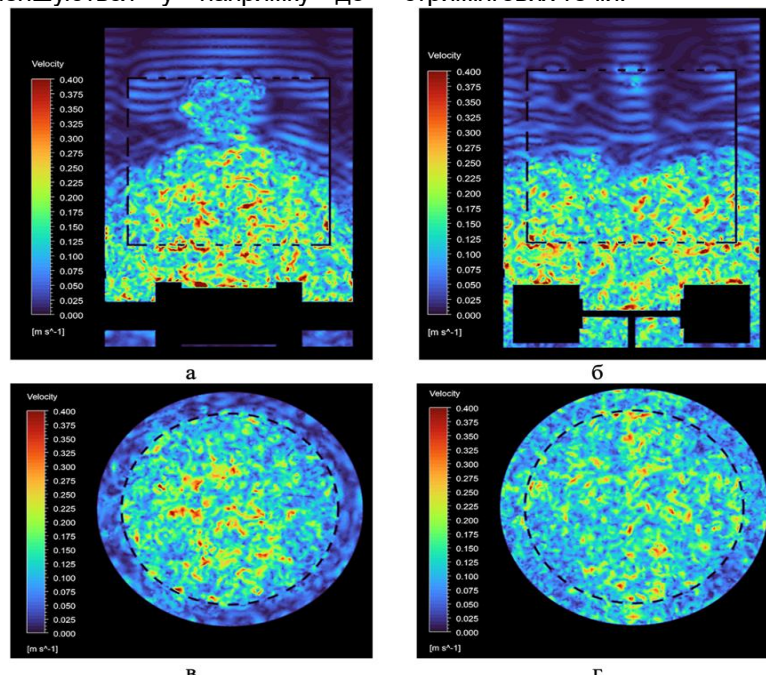


Рис. 4. Контур (градієнт) поля швидкості ультразвукових хвиль в екстрагенті по всьому об'єму апарату: а, в – відповідно вертикальний та горизонтальний перерізи апарату з центральним розміщенням випромінювача; б, г – відповідно вертикальний і горизонтальний перерізи апарату з розміщенням 4-х випромінювачів по периферії

На представлених контурах рис. 5 відображено просторовий розподіл миттєвих значень акустичного тиску в рідині в діапазоні

приблизно $-10...+10$ атм, що дозволяє оцінити інтенсивність акустичного збудження та пов'язані з ним градієнти тиску по всьому об'єму апарата.

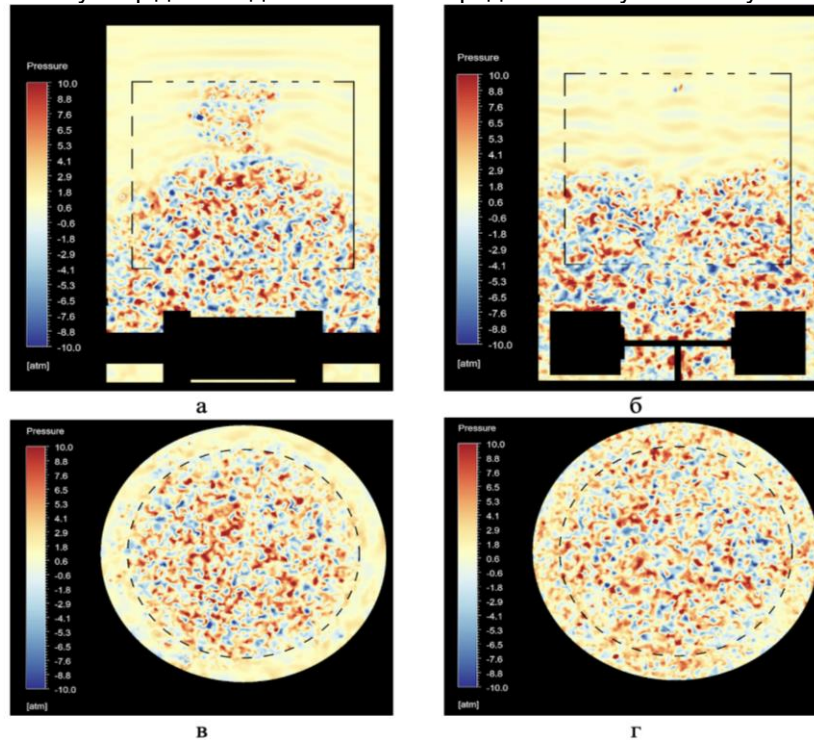


Рис. 5. Контур (градієнт) поля тиску ультразвукових хвиль в екстрагенті по всьому об'єму апарату: а, в – відповідно вертикальний та горизонтальний перерізи апарату з центральним розміщенням випромінювача; б, г – відповідно, вертикальний і горизонтальний перерізи апарату з розміщенням 4-х випромінювачів по периферії

У випадку одного ультразвукового випромінювача, розташованого в нижній центральній частині екстрактора (рис. 5. а), формується локалізована зона підвищених амплітуд тиску безпосередньо над джерелом випромінювання. Максимальні миттєві значення акустичного тиску в цій конфігурації досягають величин, близьких до $\pm 8-10$ атм, при цьому спостерігається різко виражений осьовий характер поширення хвилі та значні просторові градієнти тиску в приосвовій області. Водночас у периферійних зонах апарата амплітуда коливань тиску суттєво зменшується, а середні значення тиску за об'ємом залишаються відносно низькими, що вказує на неоднорідність ультразвукового поля та обмежену зону ефективного акустичного впливу.

Для конфігурації з чотирма ультразвуковими випромінювачами (рис. 5. б) характер поля тиску істотно змінюється. Суперпозиція хвиль, згенерованих кількома джерелами, призводить до формування вираженої інтерференційної картини, яка проявляється у вигляді чергування зон підвищеного та зниженого миттєвого тиску в усьому об'ємі екстрактора. У цьому випадку пікові значення тиску в окремих локальних максимумах

залишаються співставними з конфігурацією одного випромінювача

(до $\pm 8-9$ атм), однак істотно зростають середні значення акустичного тиску та його градієнтів по всьому перерізу апарата. Це свідчить про більш рівномірний розподіл акустичної енергії та ефективніше залучення рідини до ультразвукового впливу.

Горизонтальні перерізи екстрактора в середній площині (рис. 5. в, г) додатково підтверджують зазначені закономірності. Для одного випромінювача поле тиску має майже осьову симетрію з концентрацією високих амплітуд у центральній зоні, тоді як у випадку чотирьох випромінювачів спостерігається складна просторово-неоднорідна структура, характерна для інтерференції стоячих і біжучих ультразвукових хвиль. З урахуванням температури рідини 25°C та відомих значень тиску насиченої пари води можна стверджувати, що локальні області з мінімальними миттєвими значеннями тиску (нижче $0,031$ атм, або $3,17$ кПа відносно середнього) є потенційно сприятливими для ініціювання кавітаційних явищ. Особливо ймовірним виникнення кавітації є у випадку конфігурації із 4-ма випромінювачами, де інтерференція хвиль призводить до зростання як

амплітуди коливань тиску, так і об'єму рідини, в якому реалізуються кавітаційно-активні умови.

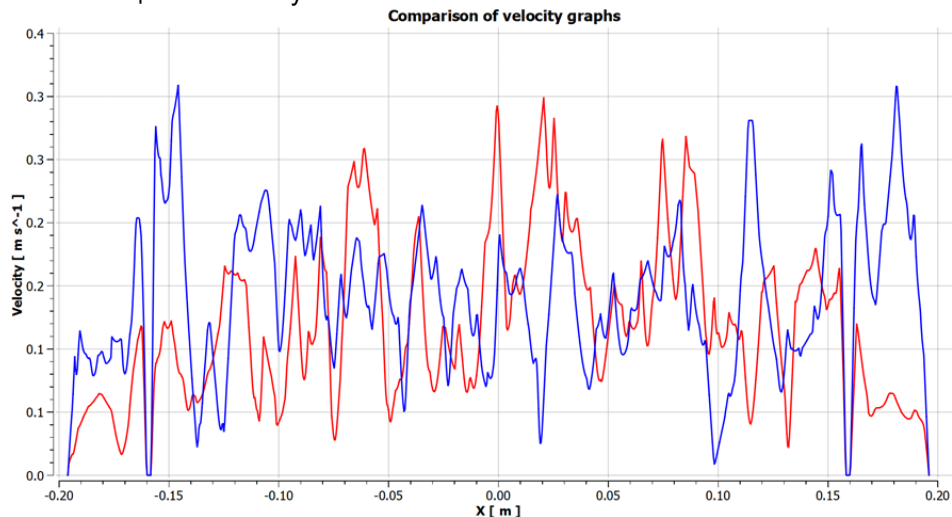


Рис. 6. Графік пульсацій швидкості: червона крива – центральним розміщенням випромінювача, синя крива – 4 випромінювача, розміщені по периферії

На рис. 6 наведено графіки пульсацій миттєвих значень швидкості потоку. Аналіз показує, що у випадку центрального розміщення випромінювача швидкість потоку змінюється відносно плавно, з помірною амплітудою пульсацій і концентрацією максимальних значень переважно в центральній зоні апарата, тоді як у напрямку до периферії інтенсивність коливань зменшується. Для конфігурації з чотирма випромінювачами, розміщеними по периферії характерні суттєво інтенсивніші пульсації швидкості з підвищеною амплітудою та наявністю численних локальних максимумів і мінімумів по всьому перерізу апарата, що свідчить про формування складної багатовихрової структури потоку та більш інтенсивний акустично індукований стримінг.

Аналогічні закономірності встановлено під час аналізу пульсацій акустичного тиску

(рис. 7). Для конфігурації з центрально розміщеним випромінювачем коливання тиску мають відносно регулярний характер із локалізацією високих амплітуд поблизу джерела та поступовим зменшенням у напрямку до периферії. У випадку використання чотирьох випромінювачів, розміщених по периферії спостерігаються значно інтенсивніші пульсації тиску з чергуванням позитивних і негативних пікових значень уздовж усієї осі, що є наслідком інтерференції ультразвукових хвиль і формування просторово неоднорідного, але енергетично насиченого акустичного поля. Підвищені градієнти тиску створюють сприятливі умови для виникнення кавітаційних явищ та інтенсифікації масообмінних і екстракційних процесів у всьому об'ємі апарата.

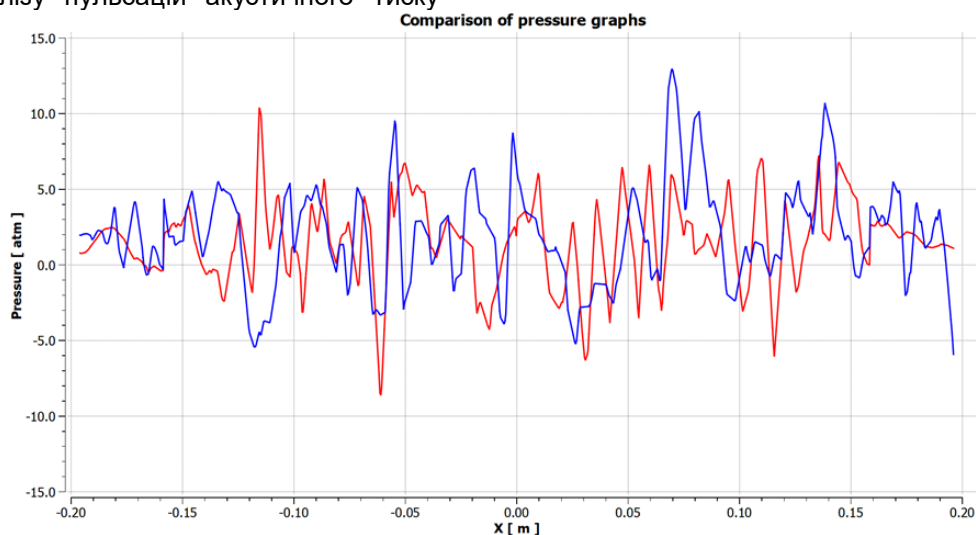


Рис. 7. Графік пульсацій тиску: червона крива – центральним розміщенням випромінювача, синя крива – 4 випромінювача, розміщені по периферії



Таким чином, результати CFD-моделювання переконливо показують, що використання кількох ультразвукових випромінювачів забезпечує більш однорідне поле швидкостей, підвищені середні значення гідродинамічних параметрів і, відповідно, кращі умови для масообміну та екстракційних процесів об'ємі апарата. Окремо слід зазначити, що використання кількох ультразвукових випромінювачів забезпечує більш однорідне акустичне поле, підвищені середні значення пульсацій тиску та градієнтів тиску, а також створює передумови для виникнення кавітаційних явищ.

Отримані результати чисельного моделювання показали, що структура гідродинамічних і акустичних полів у робочому об'ємі екстрактора істотно залежить від кількості та конфігурації ультразвукових випромінювачів. У випадку одного випромінювача формується локалізована зона підвищених швидкостей і амплітуд тиску поблизу джерела з поступовим зменшенням інтенсивності до периферії. Використання чотирьох випромінювачів призводить до формування інтерференційної картини, підвищення рівня пульсацій швидкості й тиску по всьому перерізу апарата та більш рівномірного розподілу акустичної енергії. Це пояснюється суперпозицією хвиль, що зумовлює зростання середніх значень гідродинамічних параметрів і градієнтів тиску та розширення зони інтенсивного акустично індукованого стримінгу. На відміну від підходів, що обмежуються інтегральними характеристиками процесу, у роботі детально проаналізовано просторово-часову структуру швидкісних і акустичних полів з урахуванням геометрії апарата та конфігурації джерел збудження, що дозволило встановити відмінності між одно- та багатоджерельною схемами ультразвукового впливу.

Практичне значення результатів полягає у можливості їх використання під час проектування й оптимізації ультразвукових екстракторів, зокрема для обґрунтування кількості та розміщення випромінювачів і вибору ефективних режимів обробки з метою інтенсифікації масообмінних процесів.

Обмеження дослідження пов'язані з ізотермічним характером моделі, розглядом однорідного рідкого середовища без твердої фази та відсутністю врахування багатозфазних ефектів інтенсивної кавітації. Умови воєнного стану зумовили зосередження дослідження на чисельному моделюванні через обмежений доступ до експериментальної бази. У зв'язку з цим основний акцент було зроблено на чисельному моделюванні із застосуванням CFD-підходу. Подальші дослідження доцільно спрямувати на врахування твердої фази, температурних

факторів та експериментальну верифікацію отриманих результатів.

Висновки. Проведене CFD-моделювання поширення ультразвукових хвиль у рідкому середовищі акустичного екстрактора дозволило проаналізувати просторово-часовий розподіл акустичного тиску, швидкісних полів і хвильових структур у робочому об'ємі апарата та кількісно оцінити гідродинамічну відповідь рідини на ультразвукове збудження. Встановлено, що у випадку використання одного ультразвукового випромінювача формується локалізована зона інтенсивного акустично індукованого руху над джерелом, у якій максимальні значення швидкості досягають 0,35-0,40 м/с, однак середні швидкості в основному об'ємі екстрактора залишаються на рівні 0,10-0,18 м/с, що свідчить про обмежену зону ефективного ультразвукового впливу. Показано, що застосування чотирьох ультразвукових випромінювачів, розміщених по периферії, призводить до принципової зміни структури акустичних і швидкісних полів унаслідок суперпозиції хвиль та формування вираженої інтерференційної картини, що забезпечує більш рівномірний розподіл швидкостей у всьому об'ємі апарата. При цьому пікові локальні значення швидкості становлять 0,30-0,38 м/с, а середні швидкості зростають до 0,18-0,25 м/с, що вказує на ефективнішу інтенсифікацію процесів перемішування та масообміну порівняно з конфігурацією з одним джерелом.

Аналіз просторового розподілу миттєвих значень акустичного тиску показав, що для одного випромінювача характерна локалізація максимальних амплітуд тиску безпосередньо над джерелом, де пікові значення досягають приблизно $\pm 8-10$ атм, тоді як у периферійних зонах амплітуда коливань тиску суттєво зменшується. У випадку використання чотирьох ультразвукових випромінювачів спостерігається зростання середніх значень акустичного тиску та його градієнтів по всьому перерізу апарата за збереження співставних пікових значень тиску (до $\pm 8-9$ атм), що свідчить про більш однорідний розподіл акустичної енергії в об'ємі екстрактора.

Встановлено наявність локальних областей зі зниженими миттєвими значеннями тиску нижче 0,031 атм (3,17 кПа відносно середнього), які є потенційно сприятливими для ініціювання кавітаційних явищ. Найбільш імовірні умови їх виникнення реалізуються у конфігурації з чотирма випромінювачами внаслідок інтерференції ультразвукових хвиль та збільшення об'єму рідини, залученого до кавітаційно-активних режимів. Отримані результати CFD-моделювання показують, що використання кількох ультразвукових випромінювачів забезпечує більш однорідне поле швидкостей, підвищені середні значення гідродинамічних параметрів і градієнтів тиску, а



також кращі умови для інтенсифікації масообмінних та екстракційних процесів у всьому об'ємі акустичного екстрактора.

Отримані результати мають теоретичне значення для поглиблення уявлень про просторово-часову структуру акустичних і гідродинамічних полів у системах ультразвукової обробки та практичне значення для проектування й оптимізації ультразвукових екстракторів. Зокрема, вони дозволяють обґрунтувати доцільність використання багатоджерельної схеми ультразвукового впливу для підвищення однорідності акустичного поля, інтенсифікації масообмінних процесів і створення сприятливіших умов для екстракції біологічно активних речовин у всьому об'ємі апарата.

Список використаних джерел

1. Wang, X. P., Dong, S. X., Chen, F. (2011). Ultrasonic-Assisted Extraction of Gardenia Yellow from Fructus Gardeniae. *Advanced Materials Research*, 396-398, 1075–1078. <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/amr.396-398.1075>
2. Sun, Y., Liu, Z., Wang, J. (2011). Ultrasound-assisted extraction of five isoflavones from *Iris tectorum* Maxim. *Separation and Purification Technology*, 78(1), 49–54. <https://doi.org/10.1016/j.seppur.2011.01.017>
3. Sun, Y., Bi, J., Zhang, L., Ye, B. (2012). Ultrasound-assisted extraction of three bufadienolides from Chinese medicine *ChanSu*. *Ultrasonics Sonochemistry*, 19(6), 1150–1154. <https://doi.org/10.1016/j.ultsonch.2012.03.003>
4. Shirsath, S.R., Sable, S.S., Gaikwad, S.G., Sonawane, S.H., Saini, D.R., Gogate, P.R. (2017). Intensification of extraction of curcumin from *Curcuma amada* using ultrasound assisted approach: Effect of different operating parameters. *Ultrasonics Sonochemistry*, 38, 437–445. <https://doi.org/10.1016/j.ultsonch.2017.03.040>
5. Rodriguez-Chanafra, J.E., Robaina-Mesa, M., Rodriguez-Riera, Z., Jauregui-Haza, U. (2016). Ultrasound-assisted extraction of coumarin from *Justicia pectoralis* Jacq. *Revista Mexicana de Ciencias Farmaceuticas*, 47, 96–103. URL: <https://www.redalyc.org/articulo.oa?id=57956609008>
6. Korobiichuk, I., Mel'nick, V., Ostapenko, Zh., Ruzhinska, L. (2023). Study of heat and mass transfer processes during extraction of plant raw materials under the influence of ultrasound. *Ultrasonics Sonochemistry*, 98, 106512. <https://doi.org/10.1016/j.ultsonch.2023.106512>
7. Wang, X., Wu, Q., Wu, Y., Chen, G., Yue, W., Liang, Q. (2012). Response Surface Optimized Ultrasonic-Assisted Extraction of Flavonoids from *Sparganii Rhizoma* and Evaluation of Their in Vitro Antioxidant Activities. *Molecules*, 17(6), 6769–6783. <https://doi.org/10.3390/molecules17066769>

<https://doi.org/10.3390/molecules17066769>

8. Moghimi, M., Farzaneh, V., Bakhshabadi, H. (2018). The effect of ultrasound pretreatment on some selected physicochemical properties of black cumin (*Nigella Sativa*). *Nutrire*, 43(1), 18. <https://doi.org/10.1186/s41110-018-0077-y>
9. Žnidarčič, A., Mettin, R., Dular, M. (2015). Modeling cavitation in a rapidly changing pressure field – Application to a small ultrasonic horn. *Ultrasonics Sonochemistry*, 22, 482–492. <https://doi.org/10.1016/j.ultsonch.2014.05.011>
10. Sajjadi, B., Abdul Raman, A.A., Ibrahim, S. (2015). Influence of ultrasound power on acoustic streaming and micro-bubbles formations in a low frequency sono-reactor: Mathematical and 3D computational simulation. *Ultrasonics Sonochemistry*, 24, 193–203. <https://doi.org/10.1016/j.ultsonch.2014.11.013>
11. Rahimi, M., Aghel, B., Hatamifar, B., Akbari, M., Alsairafi, A.A. (2014). CFD modeling of mixing intensification assisted with ultrasound wave in a T-type microreactor. *Chemical Engineering and Processing: Process Intensification*, 86, 36–46. <https://doi.org/10.1016/j.cep.2014.10.006>
12. Mohd Tamidi, A., Lau, K.K., Quek, V.C., Tengku Mat, T.M.U. (2025) Modeling of a High-Frequency Ultrasonic Wave in the Ultrasonic-Assisted Absorption System (UAAS) Using a Computational Fluid Dynamics (CFD) Approach. *Processes*, 13(6), 1737. <https://doi.org/10.3390/pr13061737>
13. Greenspon, J. E. (2003). Acoustics, Linear. *Encyclopedia of Physical Science and Technology*, 129–167. <https://doi.org/10.1016/b0-12-227410-5/00009-0>
14. Malezhyk, I. F. (Ed.). (2012). Protsepy i aparaty kharchovykh vyrobnytstv. Kursove proektuvannia [Processes and equipment of food production. Course design]. NUKHT. URL: <https://dspace.nuft.edu.ua/server/api/core/bitstream/16b60f95-8e40-4d86-a636-5a2f23c5806c/content>

References

1. Wang, X. P., Dong, S. X., Chen, F. (2011). Ultrasonic-Assisted Extraction of Gardenia Yellow from Fructus Gardeniae. *Advanced Materials Research*, 396-398, 1075–1078. <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/amr.396-398.1075>
2. Sun, Y., Liu, Z., Wang, J. (2011). Ultrasound-assisted extraction of five isoflavones from *Iris tectorum* Maxim. *Separation and Purification Technology*, 78(1), 49–54. <https://doi.org/10.1016/j.seppur.2011.01.017>
3. Sun, Y., Bi, J., Zhang, L., Ye, B. (2012). Ultrasound-assisted extraction of three bufadienolides from Chinese medicine *ChanSu*. *Ultrasonics Sonochemistry*, 19(6), 1150–1154. <https://doi.org/10.1016/j.ultsonch.2012.03.003>



4. Shirsath, S.R., Sable, S.S., Gaikwad, S.G., Sonawane, S.H., Saini, D.R., Gogate, P.R. (2017). Intensification of extraction of curcumin from *Curcuma amada* using ultrasound assisted approach: Effect of different operating parameters. *Ultrasonics Sonochemistry*, 38, 437–445. <https://doi.org/10.1016/j.ultsonch.2017.03.040>

5. Rodriguez-Chanafray, J.E., Robaina-Mesa, M., Rodriguez-Riera, Z., Jauregui-Haza, U. (2016). Ultrasound-assisted extraction of coumarin from *Justicia pectoralis* Jacq. *Revista Mexicana de Ciencias Farmaceuticas*, 47, 96–103. URL: <https://www.redalyc.org/articulo.oa?id=57956609008>

6. Korobiichuk, I., Mel'nick, V., Ostapenko, Zh., Ruzhinska, L. (2023). Study of heat and mass transfer processes during extraction of plant raw materials under the influence of ultrasound. *Ultrasonics Sonochemistry*, 98, 106512. <https://doi.org/10.1016/j.ultsonch.2023.106512>

7. Wang, X., Wu, Q., Wu, Y., Chen, G., Yue, W., Liang, Q. (2012). Response Surface Optimized Ultrasonic-Assisted Extraction of Flavonoids from *Sparganii Rhizoma* and Evaluation of Their in Vitro Antioxidant Activities. *Molecules*, 17(6), 6769–6783. <https://doi.org/10.3390/molecules17066769>

8. Moghimi, M., Farzaneh, V., Bakhshabadi, H. (2018). The effect of ultrasound pretreatment on some selected physicochemical properties of black cumin (*Nigella Sativa*). *Nutrire*, 43(1), 18. <https://doi.org/10.1186/s41110-018-0077-y>

9. Žnidarčič, A., Mettin, R., Dular, M. (2015). Modeling cavitation in a rapidly changing pressure field – Application to a small ultrasonic horn. *Ultrasonics Sonochemistry*, 22, 482–492. <https://doi.org/10.1016/j.ultsonch.2014.05.011>

10. Sajjadi, B., Abdul Raman, A.A., Ibrahim, S. (2015). Influence of ultrasound power on acoustic streaming and micro-bubbles formations in a low frequency sono-reactor: Mathematical and 3D computational simulation. *Ultrasonics Sonochemistry*, 24, 193–203. <https://doi.org/10.1016/j.ultsonch.2014.11.013>

11. Rahimi, M., Aghel, B., Hatamifar, B., Akbari, M., Alsairafi, A.A. (2014). CFD modeling of mixing intensification assisted with ultrasound wave in a T-type microreactor. *Chemical Engineering and Processing: Process Intensification*, 86, 36–46. <https://doi.org/10.1016/j.cep.2014.10.006>

12. Mohd Tamidi, A., Lau, K.K., Quek, V.C., Tengku Mat, T.M.U. (2025) Modeling of a High-Frequency Ultrasonic Wave in the Ultrasonic-Assisted Absorption System (UAAS) Using a Computational Fluid Dynamics (CFD) Approach. *Processes*, 13(6), 1737. <https://doi.org/10.3390/pr13061737>

13. Greenspon, J. E. (2003). Acoustics, Linear. *Encyclopedia of Physical Science and Technology*, 129–167. <https://doi.org/10.1016/b0->

[12-227410-5/00009-0](https://doi.org/10.1016/b0-12-227410-5/00009-0)

Malezhyk, I. F. (Ed.). (2012). *Protsesy i aparaty kharchovykh vyrobnytstv. Kursove proektuvannia* [Processes and equipment of food production. Course design]. NUKHT. URL: <https://dspace.nuft.edu.ua/server/api/core/bitstreams/16b60f95-8e40-4d86-a636-5a2f23c5806c/content>

ULTRASONIC WAVE PROPAGATION MODELING IN AN ACOUSTIC EXTRACTOR FOR PLANT MATERIAL PROCESSING

The object of the study is the process of ultrasonic wave propagation and the formation of acoustically induced hydrodynamic fields in the liquid medium of an acoustic extractor intended for the processing of plant raw materials.

Problem to be solved: determining the influence of the number and spatial configuration of ultrasonic transducers on the structure of velocity and acoustic fields within the working volume of the apparatus, since the non-uniformity of the ultrasonic field may limit the efficiency of mass-transfer and extraction processes, as well as lead to uneven treatment intensity of the raw material in different regions of the working volume.

Numerical simulation was performed in the ANSYS CFX using a CFD approach for water under isothermal conditions with harmonic excitation of the transducer surfaces. The spatial and temporal distributions of flow velocity, acoustic pressure, and their gradients were analyzed for two configurations: one with a single centrally located transducer and another with four transducers arranged along the periphery. The results obtained demonstrated that multi-source ultrasonic excitation forms a more uniform acoustic field, increases the level of velocity and pressure pulsations across the entire cross-section of the apparatus, and expands the zone of intensive hydrodynamic influence.

The identified patterns are explained by the superposition and interference of waves generated by multiple sources, which leads to an increase in the average values of hydrodynamic parameters and pressure gradients, as well as to the formation of conditions potentially favorable for cavitation phenomena.

The results obtained can be applied in the design and optimization of ultrasonic extractors, in the selection of a rational number and arrangement of transducers, and in determining effective ultrasonic treatment modes for the intensification of mass-transfer and extraction processes in plant raw material processing systems.

Keywords: ultrasonic extraction, acoustic extractor, CFD modeling, ultrasonic field, acoustic pressure, hydrodynamics, mass transfer processes, plant raw materials.

Відомості про авторів

Остапенко Жанна Ігорівна – доктор філософії, старший викладач кафедри біотехніки та інженерії факультету біотехнологій і біотехніки, Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського» (03056, Берестейський проспект 37, м. Київ, Україна, zhanna.ost@gmail.com), <https://orcid.org/0000-0003-0949-9912>

Мельник Вікторія Миколаївна – доктор технічних наук, професор, завідувач кафедри біотехніки та інженерії факультету біотехнологій і біотехніки, Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського» (03056, Берестейський проспект 37, м. Київ, Україна, vmelnyk71@gmail.com), <https://orcid.org/0000-0002-0004-7218>

Костик Сергій Ігорович – кандидат технічних наук, доцент кафедри біотехніки та інженерії факультету біотехнологій і біотехніки, Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського» (03056, Берестейський проспект 37, м. Київ, Україна, kostyksergey@ukr.net), <https://orcid.org/0000-0002-2817-7233>

Косова Віра Петрівна – асистент кафедри біотехніки та інженерії факультету біотехнологій і біотехніки, Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського» (03056, Берестейський проспект 37, м. Київ, Україна, vera_62@ukr.net), <https://orcid.org/0000-0002-3441-6536>

Zhanna Ostapenko – Ph.D., Senior Lecturer in the Department of Biotechnology and Engineering, Faculty of Biotechnology and Biotechnics, National Technical University of Ukraine "Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute (03056, 37 Beresteyskyi Avenue, Kyiv, Ukraine, zhanna.ost@gmail.com), <https://orcid.org/0000-0003-0949-9912>

Viktoria Melnyk – Doctor of Technical Sciences, Professor, Chair of the Department of Biotechnology and Engineering, Faculty of Biotechnology and Biotechnics, Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute (03056, 37 Brest Avenue, Kyiv, Ukraine, vmelnyk71@gmail.com), <https://orcid.org/0000-0002-0004-7218>

Serhiy Kostyk – Candidate of Technical Sciences, Associate Professor of the Department of Biotechnology and Engineering, Faculty of Biotechnology and Biotechnics, National Technical University of Ukraine "Kyiv Polytechnic Institute named after Igor Sikorsky" (03056, Beresteyskyi Avenue 37, Kyiv, Ukraine, kostyksergey@ukr.net), <https://orcid.org/0000-0002-2817-7233>

Vira Petrivna Kosova – Assistant, Department of Biotechnology and Engineering, Faculty of Biotechnology and Biotechnology, Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute National Technical University of Ukraine (03056, 37 Beresteysky Avenue, Kyiv, Ukraine, vera_62@ukr.net), <https://orcid.org/0000-0002-3441-6536>

Стаття надійшла 14.07.2026

Стаття прийнята 25.07.2026

Опубліковано 12.10.2026