

[0000-0002-1571-401X] **К. В. Базіло**, д-р техн. наук, професор,
[0000-0003-1727-3286] **С. О. Філімонов**, канд. техн. наук, доцент,
e-mail: s.filimonov@chdtu.edu.ua
[0000-0003-0136-7587] **Н. В. Філімонова**, канд. техн. наук
Черкаський державний технологічний університет
б-р Шевченка, 460, м. Черкаси, 18006, Україна

РОЗПОДІЛ АКУСТИЧНОГО ТИСКУ В УЛЬТРАЗВУКОВІЙ СИСТЕМІ ІНТЕНСИФІКАЦІЇ ЕКСТРАКЦІЙНИХ ПРОЦЕСІВ

Сьогодні популярнішими стають харчові продукти функціонального призначення, зокрема оздоровчого та профілактичного, з підвищеним вмістом вітамінів, мікроелементів, макроелементів, незамінних амінокислот та біологічно активних речовин. Такі продукти дають людині змогу зберігати своє здоров'я, а також повністю задовольнити фізіологічні потреби в енергії та харчових сполуках, якими користується організм для побудови клітин, органів і тканин.

Екстракція – один із найбільш поширених методів, використовуваних у процесі отримання біологічно активних речовин з рослинної або тваринної сировини. Ефективність екстракції може бути збільшена, використовуючи інтенсифікуючі методи впливу, що застосовуються в процесі екстракції, наприклад ультразвук.

В роботі розглянуто конструкцію і особливості математичного опису ультразвукових систем для інтенсифікації процесу екстракції, принцип дії якого базується на використанні п'єзоелектричних ультразвукових випромінювачів. Побудовано комп'ютерну модель за допомогою пакета програм COMSOL Multiphysics ультразвукової системи для інтенсифікації процесу екстракції з урахуванням повного набору геометричних, фізико-механічних та електричних параметрів. В результаті визначено частоту, при якій забезпечуються максимальні амплітуди коливань ультразвукової системи для інтенсифікації процесу екстракції, що приводить до реалізації найбільш ефективного резонансного режиму роботи системи. Визначено місця розташування максимального акустичного тиску на об'єкт екстракції в ультразвуковій системі для інтенсифікації процесу екстракції при виготовленні концентрованих напоїв функціонального призначення.

Ключові слова: п'єзоелемент, ультразвукова система, процес екстракції, акустичний тиск, моделювання.

Вступ. В останні десятиліття стан здоров'я населення характеризується негативними тенденціями: скорочується середня тривалість життя, зростає загальна захворюваність. У більшості людей виявляються порушення харчування, обумовлені як недостатнім споживанням харчових речовин, в першу чергу вітамінів, макро- і мікронутрієнтів, повноцінних білків, так і нераціональним їх співвідношенням.

Відомі напої часто містять небезпечні, особливо для здоров'я дітей, барвники, консерванти, підсолоджувачі, поліпшувачі смаку, штучні інгредієнти, що викликають алергічні реакції, порушення обмінних процесів та інші негативні зміни [1].

Серед факторів харчування, що мають особливо важливе значення для підтримки

здоров'я, працездатності й активного довголіття людини, найважливіша роль належить повноцінному і регулярному постачанню організму необхідних мікронутрієнтів: вітамінів, макро- і мікроелементів.

Результати аналізу споживчого вітчизняного ринку свідчать про поступове підвищення попиту на якісні напої різних груп з наявністю у їх складі компонентів з натуральної рослинної сировини. Ці функціональні напої мають підвищену біологічну цінність завдяки вмісту вітамінів, органічних кислот, білків, ефірних олій та інших біологічно активних речовин. Значна частина напоїв має виражену лікувальну дію.

Сьогодні популярнішими стають харчові продукти функціонального призначення, зокрема оздоровчого та профілактичного, з

підвищеним вмістом вітамінів, мікроелементів, макроелементів, незамінних амінокислот та біологічно активних речовин (БАР). Такі продукти дають людині змогу зберігати своє здоров'я, а також повністю задовольнити фізіологічні потреби в енергії та харчових сполуках, якими користується організм для побудови клітин, органів і тканин. Тому саме харчова індустрія на сьогодні є важливою складовою охорони здоров'я і займає особливе місце у сфері інтелектуальної та виробничої діяльності людини [2].

Функціональні харчові продукти – перспективні продукти для збагачення біологічно активними речовинами.

Згідно з Законом України «Про безпеку та якість харчових продуктів» функціональний харчовий продукт – це харчовий продукт, який містить у своєму складі лікарські компоненти та/або може бути використаний для профілактики чи пом'якшення перебігу хвороби людини [3].

Постановка проблеми. Екстракція – один із найбільш поширених методів, використовуваних у процесі отримання біологічно активних речовин з рослинної або тваринної сировини.

Ефективність екстракції може бути збільшена, використовуючи інтенсифікуючі методи впливу, що застосовуються в процесі екстракції, наприклад ультразвук [4].

Перевагами ультразвукової екстракції порівняно з іншими способами є: мінімальне застосування ручної праці; скорочення часу технологічного процесу; видалення шкідливих домішок; збільшення виходу екстрактивних речовин.

На сьогодні ультразвукове обладнання недостатньо використовується через високу вартість, вузьку спеціалізацію і низьку ефективність розроблених раніше великогабаритних промислових установок, відсутність малогабаритних високоефективних ультразвукових апаратів для сучасних малих і середніх виробництв, військових частин, індивідуального застосування.

Питання забезпечення населення України якісним обладнанням є важливою складовою забезпечення конституційного права громадян на охорону здоров'я (стаття 49 Конституції України).

Маркетингові дослідження були проведені в рамках Плану реалізації Стратегії розвитку Черкаської області на період 2021 –

2023 рр. [5] на основі положень Державної стратегії регіонального розвитку України на період до 2027 р. [6], відповідно до Порядку розроблення регіональних стратегій розвитку і планів заходів з їх реалізації, а також проведення моніторингу та оцінки результативності реалізації зазначених регіональних стратегій і планів заходів (затверджений постановою Кабінету Міністрів України від 11.11.2015 № 932 [7]) і з урахуванням процесів державного стратегічного планування розвитку окремих секторів економіки країни та її регіонів, що враховують потреби їх розвитку та необхідність підвищення конкурентоспроможності.

В процесі підготовки Плану реалізації Стратегії максимально застосовувалися принципи ЄС, методологія та інструменти для стратегічного й операційного планування з незначними поправками для відображення особливостей України.

В регіоні наявна потужна база для виробництва сільськогосподарської продукції. Враховуючи це, глибока переробка сільськогосподарської продукції (зокрема готових продуктів харчування), якість і безпека харчових продуктів починають відігравати провідну роль. Окрім того, інноваційні харчові технології та висока якість і безпека харчових продуктів дозволять суттєво полегшити процеси просування таких продуктів як на внутрішніх, так і на зовнішніх ринках.

Ця операційна мета спрямована на стимулювання співробітництва та партнерства науки і бізнесу регіону в харчових технологіях, а також інтеграцію досліджень та інновацій у харчові технології задля високої якості та безпеки продуктів харчування.

Розвиток ультразвукової техніки і технології стримується також низькою інформованістю споживачів про ефективність ультразвукових впливів і відсутністю методичних рекомендацій, що враховують особливості застосування ультразвукових технологій в умовах малих виробництв.

Сучасні ультразвукові технології ґрунтуються на використанні двох властивостей, які мають певні матеріали: п'єзоелектрика та магнітострикція. В роботах [8-10] розглянуто конструкції ультразвукових систем для інтенсифікації біотехнологічних процесів, які містять п'єзоелектричний ультразвуковий генератор, що базується на генерації електричних коливань певної частоти, які матеріал з п'єзоелектричними властивостями (перетво-

рювач) перетворює на механічні коливання. В роботах [11-13] наведено особливості моделювання ультразвукових систем для інтенсифікації кавітаційних процесів, принцип дії яких базується на використанні п'єзоелектричних ультразвукових випромінювачів. Проте розглянуті роботи не об'єднані будь-яким системним підходом, мають характер розрізнених епізодів, на підставі чого можна стверджувати, що сьогодні існує потреба у створенні цілісної методики моделювання п'єзоелектричних перетворювачів, яка могла б використовуватися як теоретична основа розрахунку характеристик і параметрів систем. Таким чином, актуальність розробки фізично змістовних моделей систем з п'єзоелектричними перетвореннями зберігається й нині.

Мета та задачі дослідження. Метою роботи є моделювання ультразвукової системи для інтенсифікації процесу екстракції за допо-

могою програми COMSOL Multiphysics для визначення місця розташування максимального акустичного тиску на об'єкт екстракції в ультразвуковій системі.

Для досягнення поставленої мети необхідно вирішити такі завдання:

- створити віртуальну модель ультразвукової системи за допомогою програми COMSOL Multiphysics;
- визначити резонансні частоти ультразвукової системи;
- визначити акустичний тиск у рідині на визначених резонансних частотах.

Матеріали та методи. На рисунку 1 зображено досліджувану аксонометричну модель ультразвукової системи для інтенсифікації процесу екстракції при виготовленні концентрованих напоїв функціонального призначення.

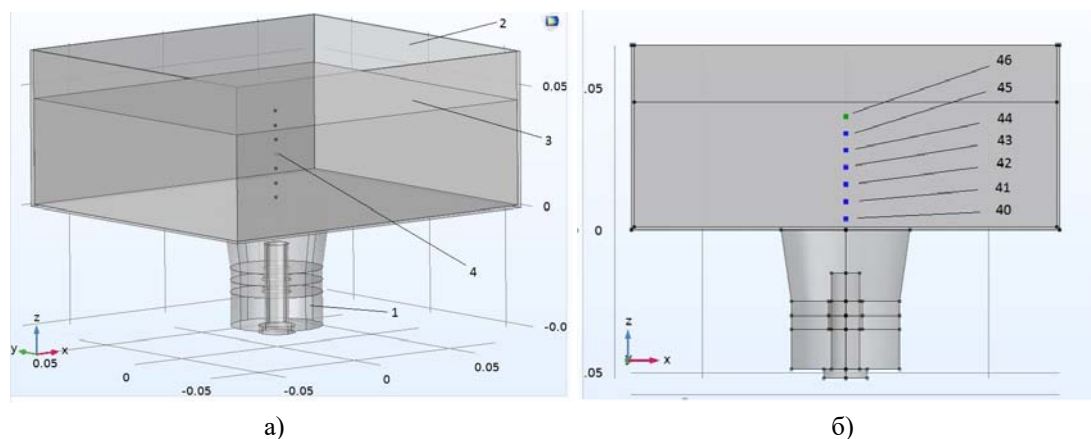


Рисунок 1. Аксонометрична модель ультразвукової системи для інтенсифікації процесу екстракції: а) загальний вигляд: 1 – ультразвуковий випромінювач; 2 – резервуар, 3 – рідина, 4 – точки, в яких проводиться реєстрація акустичного тиску (40-46, нумерація точок відповідає нумерації у моделі COMSOL Multiphysics); б) вид збоку

враховуючи технічні особливості п'єзоелектричних ультразвукових випромінюючих систем і всі складнощі, що виникають при їх виготовленні, оптимальним рішенням є використання чисельних методів розрахунку, що реалізуються спеціальними САПР [14].

Для дослідження акустичного тиску під час випромінювання ультразвукових хвиль було проведено чисельне моделювання процесу роботи ультразвукової системи для інтенсифікації процесу екстракції в програмі COMSOL Multiphysics 5.5.

Відомості про математичну модель, яка враховує мультифізичні процеси, що описуються комбінацією різних рівнянь в частинних похідних, і деякі основні моменти обчис-

лень за допомогою модуля Piezoelectric Effects та інструментів COMSOL's Solid Mechanics and Electrostatics детально наведено в [15, 16]. Аналіз роботи ультразвукової системи для інтенсифікації процесу екстракції здійснювався в режимі Frequency response. Для визначення акустичного тиску використовувався модуль Pressure Acoustics, Frequency Domain. Для об'єднання наведених вище модулів використовувався мультифізичний зв'язок Acoustic-Structure Boundary.

Як розв'язувач використовувався Direct, в якому був обраний чисельний метод SPOOLES для розв'язку систем лінійних рівнянь з розрідженими матрицями [17].

Розміри резервуара у моделі: довжина – 150 мм, ширина – 135 мм, висота – 65 мм, товщина стінки становить 1 мм. Розміри ультразвукового випромінювача у моделі: діаметр хвилеводу – максимум 55 мм, діаметр хвилеводу – мінімум 45 мм, довжина хвилеводу – 24 мм, товщина відбивача – 12 мм, діаметр п'єзоелементів – 45 мм, загальна довжина – 46 мм. З'єднання резервуару та ультразвукового випромінювача виконувалось за допомогою епоксидного клею. Як матеріал для моделювання п'єзоелектричного двигуна було використано марку п'єзокераміки PZT-4. Марка матеріалу хвилеводу та відбивача ультразвукового випромінювача, а також резервуара відповідає сталі AISI 4340. Як рідина використовувалася вода.

При моделюванні ультразвукової системи для інтенсифікації процесу екстракції було прийнято тип граничних умов Fixed до верхньої торцевої частини резервуара. Електричний потенціал (Electric potential) 300 В прикладений до зовнішніх сторін п'єзоелементів, а загальний «мінус» (Ground) – до сторін п'єзоелементів, які з'єднані між собою. Поляризація п'єзоелектричних елементів зустрічна.

Принцип роботи ультразвукової системи полягає в наступному. При подачі змінної електричної напруги на п'єзоелементи виникають механічні коливання, які передаються у резервуар з рідиною, в результаті чого у рідині виникає акустичний тиск.

Чисельні експерименти та результати дослідження. Важливим кроком для отримання достовірних результатів чисельного моделювання є побудова кінцево-елементної моделі конструкції ультразвукової системи введенням сітки Mesh, від якої істотно залежать отримані результати обчислень. Розрахункова сітка кінцевих елементів Mesh вибиралася з наступними умовами. Використовувалися лагранжеві кінцеві елементи з елементарними базисними функціями другого порядку – Lagrange-Quadratic. Кількість лагранжевих елементів становить 6 на локальну довжину хвилі, яка розповсюджується у конструкції та у воді. Сітка була побудована тетрагональним розбиттям, а досліджувані тривимірні моделі були представлені сукупністю з більш ніж двадцяти тисяч елементів для кожної складової конструкції (рисунок 2).

Оскільки сила акустичного впливу на пряму залежить від вибору робочої (резонанс-

ної) частоти ультразвукового випромінювача, то першим етапом було визначення максимальної амплітуди коливань на частотах у діапазоні від 36 кГц до 43 кГц (використаний ультразвуковий випромінювач розрахований на частоту 40 кГц.). Результати моделювання представлені на рисунку 3.

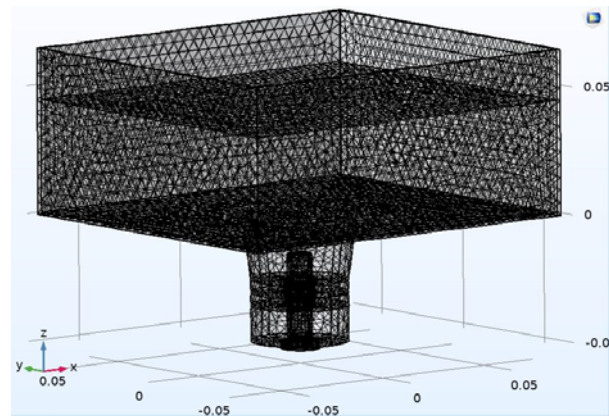


Рисунок 2. Кінцево-елементна модель ультразвукової системи для інтенсифікації процесу екстракції

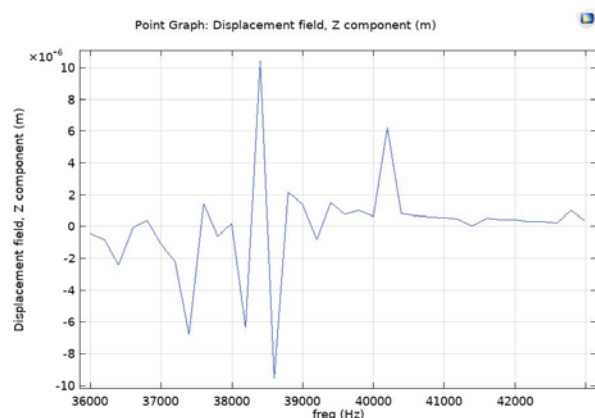


Рисунок 3. Амплітудно-частотна характеристика ультразвукової системи для інтенсифікації процесу екстракції

З рисунка 3 видно, що максимальна амплітуда коливань відповідає частотам 38,4 кГц, 38,6 кГц та 40,2 кГц. Слід зауважити, що значення амплітуди коливань вище нуля відповідають розтягненню, а нижче нуля – стисненню ультразвукового випромінювача.

На рисунку 4 за результатами (рисунок 3) представлено наочну деформацію ультразвукової системи на частотах, які відповідають максимальним амплітудам коливань.

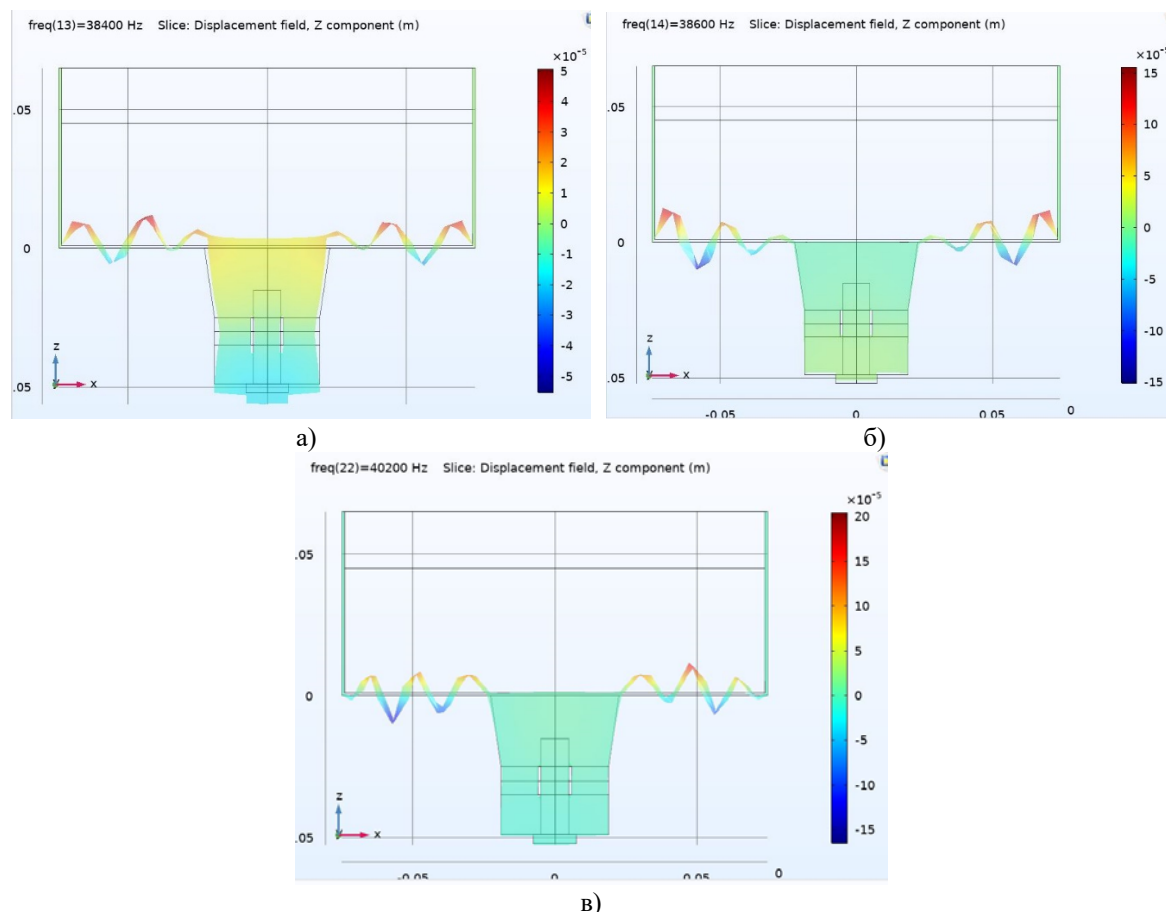


Рисунок 4. Результати чисельного моделювання для визначення резонансної амплітуди коливань ультразвукової системи для інтенсифікації процесу екстракції в режимі Frequency response на частотах: а) 38,4 кГц; б) 38,6 кГц; в) 40,2 кГц

Обговорення результатів. Визначивши основні резонансні частоти ультразвукової системи для інтенсифікації процесу екстракції за допомогою мультифізичного зв'язку Acoustic-Structure Boundary, визначимо акустичний тиск у контрольних точках згідно з

рисунком 1. Розподілення акустичного тиску у контрольних точках визначалося в діапазоні частот від 36 кГц до 43 кГц. Розрахункові результати моделювання зображено у графічному вигляді (рисунк 5).

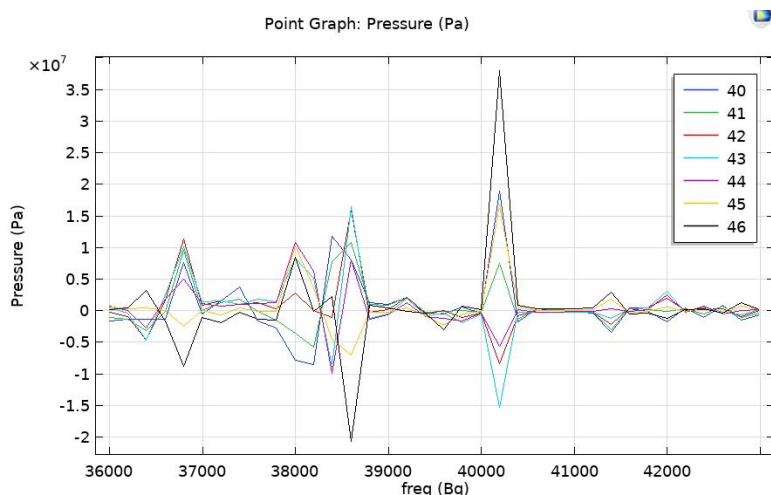


Рисунок 5. Амплітудно-частотна характеристика акустичного тиску в резервуарі з рідиною ультразвукової системи

З графіка видно, що максимальний акустичний тиск спостерігається на частотах 38,6 кГц та 40,2 кГц у точках № 40 (перша точка знизу), 45 (друга точка зверху) та 46 (перша точка зверху). Ці результати корелюють з результатами, отриманими для механічного резонансу. Акустичний тиск на частоті 40,2 кГц

практично у два рази більший, ніж на усіх інших частотах. Це означає, що інтенсифікація процесу екстракції буде проходити швидше.

Окрім графічних результатів, у процесі розрахунку було отримано ще й візуалізацію розповсюдження акустичного тиску, яка представлена на рисунку 6.

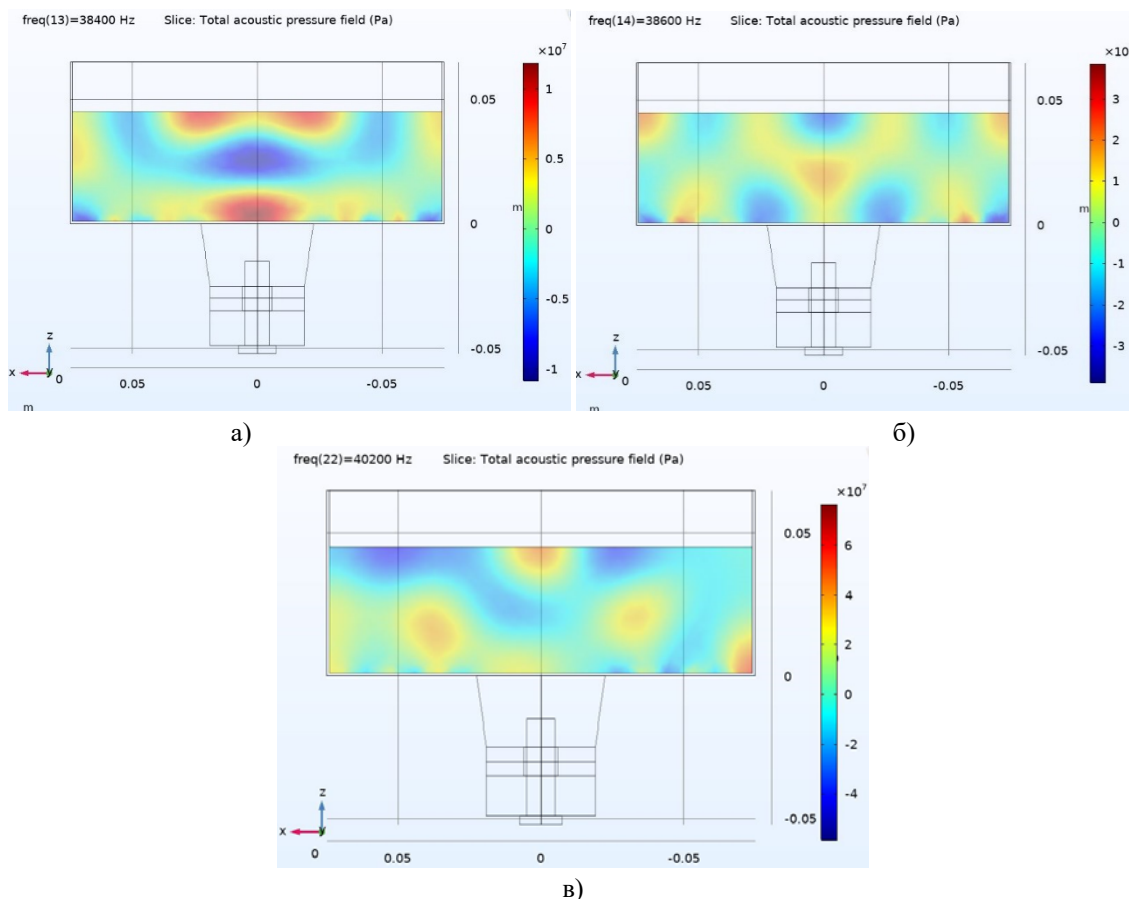


Рисунок 6. Результати чисельного моделювання для визначення акустичного тиску в резервуарі з рідиною ультразвукової системи на частотах: а) 38,4 кГц; б) 38,6 кГц; в) 40,2 кГц

З рисунка 6 (по шкалі справа) видно, що найбільший акустичний тиск сягає $3.7 \cdot 10^{-7}$ Па при частоті резонансу 40,2 кГц.

Подальші дослідження авторів можуть бути спрямовані на розробку мобільної ультразвукової системи для інтенсифікації процесу екстракції при виготовленні концентрованих напоїв функціонального призначення, а також на визначення найбільш ефективної геометрії резервуара ультразвукової системи за допомогою пакета прикладних програм COMSOL Multiphysics.

Висновки. Розглянуто конструкцію та особливості математичного опису ультразвукових систем для інтенсифікації процесу екстракції, принцип дії якого базується на вико-

ристанні п'єзоелектричних ультразвукових випромінювачів.

Наукова новизна роботи полягає в удосконаленні комп'ютерної моделі ультразвукової системи для інтенсифікації процесу екстракції за допомогою пакета програм COMSOL Multiphysics 5.5 з урахуванням повного набору геометричних, фізико-механічних та електричних параметрів.

Практична цінність роботи полягає в наступному:

- визначено частоту, при якій забезпечуються максимальні амплітуди коливань ультразвукової системи для інтенсифікації процесу екстракції, що приводить до реаліза-

ції найбільш ефективного резонансного режиму роботи системи;

– визначено місця розташування максимального акустичного тиску на об'єкт екстракції в ультразвуковій системі для інтенсифікації процесу екстракції;

– отримані дані можна використовувати при проектуванні пристроїв на основі ультразвукових випромінюючих систем для інтенсифікації процесу екстракції при виготовленні концентрованих напоїв функціонального призначення.

Список використаних джерел

- [1] Н. О. Стеценко, *Технологія оздоровчих напоїв та фітоконцентратів*. Київ, Україна: НУХТ, 2018.
- [2] А. І. Українець, та Г. О. Сімахіна, *Технологія оздоровчих харчових продуктів*. Київ, Україна: НУХТ, 2009.
- [3] Про внесення змін до Закону України "Про якість та безпеку харчових продуктів та продовольчої сировини", *Відомості Верховної Ради України*, № 50, 2005. [Електронний ресурс]. Режим доступу: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/2809-15#Text>. Дата звернення: Жовт. 22, 2022.
- [4] К. В. Базіло, В. М. Заїка, та Ю. Ю. Бондаренко, "Особливості застосування ультразвуку для інтенсифікації біохімічних процесів у фармацевтиці", в *Тези VI Міжнар. наук.-техн. конф. Датчики, прилади та системи – 2017*. Черкаси – Миколаїв – Херсон – Лазурне, 2017, с. 56-57.
- [5] План реалізації Стратегії розвитку Черкаської області на період 2021 – 2023 роки. Черкаси, 2020. [Електронний ресурс]. Режим доступу: <https://cutt.ly/PlwO8M9>. Дата звернення: Жовт. 22, 2022.
- [6] Кабінет Міністрів України (2020, серп. 05). *Постанова № 695, Про затвердження Державної стратегії регіонального розвитку на 2021 – 2027 роки*. [Електронний ресурс]. Режим доступу: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/695-2020-п#Text>. Дата звернення: Жовт. 22, 2022.
- [7] Кабінет Міністрів України (2015, Листоп. 11). *Постанова № 932, Про затвердження Порядку розроблення регіональних стратегій розвитку і планів заходів з їх реалізації, а також проведення моніторингу та оцінки результативності реалізації зазначених регіональних стратегій і планів заходів*. [Електронний ресурс]. Режим доступу: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/932-2015-п#Text>. Дата звернення: Жовт. 22, 2022.
- [8] K. G. Zinoviadou, C. M. Galanakis, M. Brnčić, et al., "Fruit juice sonication: Implications on food safety and physicochemical and nutritional properties", *Food Research International*, vol. 77, part 4, pp. 743-752, 2015. doi: 10.1016/j.foodres.2015.05.032.
- [9] M. Abid, S. Jabbar, T. Wu, M. M. Hashim, et al., "Effect of ultrasound on different quality parameters of apple juice", *Ultrasonics Sonochemistry*, vol. 20, iss. 5, pp. 1182-1187, 2013. doi: 10.1016/j.ultsonch.2013.02.010.
- [10] Y. Poodi, M. Bimakr, A. Ganjloo, and S. Zarringhalami, "Intensification of bioactive compounds extraction from Feijoa (*Feijoa sellowiana* Berg.) leaves using ultrasonic waves", *Food and Bioprocess Processing*, vol. 108, pp. 37-50, 2018. doi: 10.1016/j.fbp.2017.12.004.
- [11] Z. Shen, J. Xu, Z. Li, Y. Chen, Y. Cui, and X. Jian. "An improved equivalent circuit simulation of high frequency ultrasound transducer", *Front. Mater.*, 8, 663109, 2021. doi: 10.3389/fmats.2021.663109.
- [12] W. Tangsopha, J. Thongsri, and W. Busayaporn, "Simulation of ultrasonic cleaning and ways to improve the efficiency", in *2017 International Electrical Engineering Congress (iEECON)*, 2017, pp. 1-4. doi: 10.1109/IEECON.2017.8075747.
- [13] M. S. Mat-Shayuti, T. M. Y. S. Tuan Ya, M. Z. Abdullah, et al., "Simulations of different power intensity inputs towards pressure, velocity & cavitation in ultrasonic bath reactor", *South African Journal of Chemical Engineering*, vol. 34, pp. 57-62, 2020. doi: 10.1016/j.sajce.2020.06.002.
- [14] L. Wang, L. Zhao, Z. Jiang, et al., "High accuracy Comsol simulation method of bimorph cantilever for piezoelectric vibration energy harvesting", *AIP Advances*, 9, 095067, pp. 1-9, 2019. doi: 10.1063/1.5119328.
- [15] V. Ya. Halchenko, Yu. Yu. Bondarenko, S. A. Filimonov, and N. V. Filimonova, "Determination of influence of geometric parameters of piezoceramic plate on amplitude characteristics of linear piezomotor",

- Electrical Engineering & Electromechanics*, no. 1, pp. 17-22, 2019.
doi: 10.20998/2074-272X.2019.1.03.
- [16] V. Ya. Halchenko, S. A. Filimonov, A. V. Batrachenko, and N. V. Filimonova, "Increase the efficiency of the linear piezoelectric motor", *J. Nano-Electron. Phys.*, 10, no. 4, 04025, 2018.
doi: 10.21272/jnep.10(4).04025.
- [17] B. Behera, and H. B. Nemade, "Investigating translational motion of a dual friction-drive surface acoustic wave motor through modeling and finite element simulation", *Simulation*, 95 (2), pp. 117-125, 2019.
doi: 10.1177/0037549718778770.
- ### References
- [1] N. O. Stetsenko, *Technology of health drinks and phyto-concentrates*. Kyiv, Ukraine: National University of Food Technologies, 2018 [in Ukrainian].
- [2] A. I. Ukrayinets, and H. O. Simakhina, *Technology of health food products*. Kyiv, Ukraine: National University of Food Technologies, 2009 [in Ukrainian].
- [3] On amendments to the Law of Ukraine "On the quality and safety of food products and food raw materials", *Vidomosti Verkhovnoi Rady Ukrainy*, no. 50, 2005. [Online]. Available: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/2809-15#Text>. Accessed on: Oct. 22, 2022 [in Ukrainian].
- [4] C. V. Bazilo, V. M. Zaika, and Yu. Yu. Bondarenko, "Peculiarities of using ultrasound for intensification of biochemical processes in pharmaceuticals", in *Abstracts of the VI Int. Sci.-Tech. Conf. Sensors, Devices and Systems – 2017*. Cherkasy – Mykolayiv – Kherson – Lazurne, 2017, pp. 56–57 [in Ukrainian].
- [5] *The implementation plan of the Development Strategy of the Cherkasy region for the period 2021–2023*. Cherkasy, 2020. [Online]. Available: <https://cutt.ly/PlwO8M9>. Accessed on: Oct. 22, 2022 [in Ukrainian].
- [6] Cabinet of Ministers of Ukraine (2020, Aug. 05). *Resolution no. 695, On the approval of the State Regional Development Strategy for 2021 – 2027*. [Online]. Available: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/695-2020-п#Text>. Accessed on: Oct. 22, 2022 [in Ukrainian].
- [7] Cabinet of Ministers of Ukraine (2015, Nov. 11). *Resolution no. 932, On the approval of the Procedure for the development of regional development strategies and action plans for their implementation, as well as monitoring and evaluation of the effectiveness of the implementation of the specified regional strategies and action plans*. [Online]. Available: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/932-2015-п#Text>. Accessed on: Oct. 22, 2022 [in Ukrainian].
- [8] K. G. Zinoviadou, C. M. Galanakis, M. Brnčić, et al., "Fruit juice sonication: Implications on food safety and physico-chemical and nutritional properties", *Food Research International*, vol. 77, part 4, pp. 743-752, 2015.
doi: 10.1016/j.foodres.2015.05.032.
- [9] M. Abid, S. Jabbar, T. Wu, M. M. Hashim, et al., "Effect of ultrasound on different quality parameters of apple juice", *Ultrasonics Sonochemistry*, vol. 20, iss. 5, pp. 1182-1187, 2013.
doi: 10.1016/j.ultsonch.2013.02.010.
- [10] Y. Poodi, M. Bimakr, A. Ganjloo, and S. Zarringhalami, "Intensification of bioactive compounds extraction from Feijoa (*Feijoa sellowiana* Berg.) leaves using ultrasonic waves", *Food and Bioproducts Processing*, vol. 108, pp. 37-50, 2018.
doi: 10.1016/j.fbp.2017.12.004.
- [11] Z. Shen, J. Xu, Z. Li, Y. Chen, Y. Cui, and X. Jian. "An improved equivalent circuit simulation of high frequency ultrasound transducer", *Front. Mater.*, 8, 663109, 2021.
doi: 10.3389/fmats.2021.663109.
- [12] W. Tangsopha, J. Thongsri, and W. Busayaporn, "Simulation of ultrasonic cleaning and ways to improve the efficiency", in *2017 International Electrical Engineering Congress (iEECON)*, 2017, pp. 1-4.
doi: 10.1109/IEECON.2017.8075747.
- [13] M. S. Mat-Shayuti, T. M. Y. S. Tuan Ya, M. Z. Abdullah, et al., "Simulations of different power intensity inputs towards pressure, velocity & cavitation in ultrasonic bath reactor", *South African Journal of Chemical Engineering*, vol. 34, pp. 57-62, 2020.
doi: 10.1016/j.sajce.2020.06.002.
- [14] L. Wang, L. Zhao, Z. Jiang, et al., "High accuracy Comsol simulation method of bimorph cantilever for piezoelectric vibration energy harvesting", *AIP Advances*, 9, 095067, pp. 1-9, 2019.
doi: 10.1063/1.5119328.

- [15] V. Ya. Halchenko, Yu. Yu. Bondarenko, S. A. Filimonov, and N. V. Filimonova, "Determination of influence of geometric parameters of piezoceramic plate on amplitude characteristics of linear piezomotor", *Electrical Engineering & Electromechanics*, no. 1, pp. 17-22, 2019.
doi: 10.20998/2074-272X.2019.1.03.
- [16] V. Ya. Halchenko, S. A. Filimonov, A. V. Batrachenko, and N. V. Filimonova, "Increase the efficiency of the linear piezoelectric motor", *J. Nano-Electron. Phys.*, 10, no. 4, 04025 (5 p.), 2018.
doi: 10.21272/jnep.10(4).04025.
- [17] B. Behera, and H. B. Nemade, "Investigating translational motion of a dual friction-drive surface acoustic wave motor through modeling and finite element simulation", *Simulation*, 95 (2), pp. 117-125, 2019.
doi: 10.1177/0037549718778770.

C. V. Bazilo, Dr. Tech. Sc., Professor,
S. O. Filimonov, Ph. D., Associate Professor,
e-mail: s.filimonov@chdtu.edu.ua
N. V. Filimonova, Ph. D.
Cherkasy State Technological University
Shevchenko blvd, 460, Cherkasy, 18006, Ukraine

DISTRIBUTION OF ACOUSTIC PRESSURE IN THE ULTRASONIC SYSTEM OF INTENSIFICATION OF EXTRACTION PROCESSES

Today, food products for functional purposes, especially health-improving and preventive ones, with a high content of vitamins, microelements, macroelements, essential amino acids, and biologically active substances (BAS), are becoming more popular. Such products allow a person to maintain his or her health, as well as fully meet the physiological needs for energy and nutrients, which the body uses to build cells, organs and tissues. Therefore, it is the food industry that is currently an important component of healthcare and occupies a special place in the field of intellectual and industrial human activities.

Extraction is one of the most common methods used in the process of obtaining biologically active substances from plant or animal raw materials. The efficiency of the extraction can be increased by using intensifying methods used in the extraction process, such as ultrasound.

The paper considers the design and features of the mathematical description of ultrasonic systems for the intensification of the extraction process, the principle of operation of which is based on the use of piezoelectric ultrasonic radiators. A computer model has been built using the COMSOL Multiphysics software package of the ultrasonic system to intensify the extraction process, taking into account the full set of geometric, physical, mechanical and electrical parameters. As a result, the frequency at which the maximum amplitudes of oscillations of the ultrasonic system are provided for the intensification of the extraction process, which leads to the implementation of the most effective resonant mode of operation of the system, is determined. The locations of the maximum acoustic pressure on the object of extraction in the ultrasonic system to intensify the extraction process in the manufacture of concentrated drinks for functional purposes are determined.

Further research by the authors can be directed to the development of a mobile ultrasonic system for intensifying the extraction process in the manufacture of concentrated drinks for functional purposes, as well as for determining the most efficient geometry of the ultrasonic system tank using the COMSOL Multiphysics application software package.

Keywords: piezoelectric element, ultrasonic system, extraction process, acoustic pressure, modeling.