

Section: Technical Sciences

DOI 10.70286/EOSS-17.11.2025.008

АНАЛІЗ КОНСТРУКЦІЙ ПРИСТРОЇВ ПЕРЕМІШУВАННЯ В ЄМКІСНИХ АПАРАТАХ ДЛЯ В'ЯЗКИХ ХАРЧОВИХ ПРОДУКТІВ

Якобчук Роман Леонідович

к.т.н., доцент

Пономаренко Віталій Васильович

д.т.н., доцент

Денисюк Богдан Петрович

аспірант

Кафедра технологічного обладнання та
комп'ютерних технологій проектування
Національний університет харчових технологій, Україна

Анотація. У роботі проведено аналіз сучасних конструкцій пристроїв перемішування, що застосовуються в ємкісних апаратах харчової промисловості для обробки в'язких середовищ. Розглянуто вплив геометрії та типу мішалок на гідродинамічні характеристики потоку, рівномірність розподілу температури й концентрації, а також енергоспоживання процесу. Показано ефективність комбінованих систем, які поєднують осьові та радіальні принципи перемішування, що дозволяє зменшити зони застою та підвищити коефіцієнт теплообміну. Обґрунтовано перспективність використання CFD-моделювання для оптимізації форми лопатей і визначення раціональних параметрів роботи перемішувальних пристроїв. Результати можуть бути використані для вдосконалення конструкцій апаратів та підвищення енергоефективності технологічних процесів.

Ключові слова: пристрої перемішування; комбінована конструкція; CFD-моделювання; в'язкі продукти; тепло- та масообмін; енергоефективність; харчові продукти; ємкісний апарат.

Вступ. Виробництво багатьох харчових продуктів (соусів, джемів, пюре, молочних десертів та ін.) відбувається в ємкісних апаратах та пов'язане з необхідністю отримання однорідної консистенції продукції, що доволі часто відбувається одночасно з її нагріванням або охолодженням.

У багатьох технологічних процесах – пастеризації, гомогенізації, кристалізації, ферментації – ефективність перемішування безпосередньо визначає якість готового продукту, стабільність структури та енерговитрати. Основним засобом підвищення інтенсивності процесів є удосконалення

конструкцій перемішуючих пристроїв, що забезпечують рівномірність розподілу температури, концентрації в об'ємі апарата.

Інтенсивне перемішування харчових продуктів є одним із ключових напрямів інтенсифікація процесів тепло- та масообміну при виробництві харчової продукції та сприяє підвищенню ефективності виробництва у харчовій промисловості.

Особливо актуальною ця проблематика є при виготовленні харчової продукції з високою в'язкістю. Проблематика інтенсифікації перемішування високов'язких та неньютонівських рідин (продуктів) в апаратах різного типу активно досліджується протягом останніх десятиліть. Встановлено [1], що тип і конструкція мішалки (перемішуючого пристрою) мають визначальний вплив на час перемішування та енергоспоживання.

Torotwa та Ji [2] порівняли різні типи мішалок за допомогою CFD-моделювання, показавши, що зміна кута нахилу лопатей із 30° до 45° зменшує час змішування на 25–40 %. Слід додати, що імітаційні дослідження за допомогою різних програмних засобів є надзвичайно ефективними. Крім скорочення часу досліджень при низьких матеріальних затратах вони дозволяють оперативно отримати результати, скорегувати їх, отримати нові дані, що сприяє оптимізації як конструкції так і технічної характеристики процесу.

Подальший розвиток досліджень у цій галузі спрямований на пошук інструментів, що дають змогу більш точно прогнозувати гідродинамічні процеси в апаратах із перемішуванням. Саме тому в роботах [6–8] акцентується увага на CFD-моделюванні, яке дозволяє визначати оптимальну форму лопатей та прогнозувати утворення застійних зон без необхідності проведення натурального експерименту.

Використання стандартних пристроїв перемішування, тобто традиційних конструкцій мішалок (лопатевих, якірних, турбінних, пропелерних тощо), має низку суттєвих недоліків. Такі пристрої зазвичай застосовуються без урахування специфічних реологічних властивостей середовища та геометрії апарата, що обмежує ефективність перемішування. Унаслідок цього в робочому об'ємі можуть утворюватися «мертві зони» (зони застою), де продукт не перемішується належним чином, відбувається локальний перегрів біля нагрівальної поверхні, спостерігається нерівномірність температурного та концентраційного поля, а також зростають енерговитрати на процес.

У дослідженнях [3–5] доведено, що комбіновані мішалки, які складаються з декількох робочих органів різних конструкцій, дозволяють створювати інтенсивні циркуляційні потоки, що покращують теплообмін, при цьому не відбувається значного зростання енерговитрат.

Ці та інші дослідження доводять, що комбіновані мішалки є перспективними конструкціями сучасних пристроїв перемішування, що доводять свою ефективність високими технологічними показниками, енергоефективністю при достатньо простому виконанню.

Мета та задачі дослідження. Метою роботи є узагальнення та аналіз сучасних технічних рішень щодо типів і конструкцій пристроїв перемішування в ємкісних апаратах харчової промисловості, призначених для обробки в'язких середовищ. Основна увага зосереджена на визначенні напрямів удосконалення конструкцій з метою підвищення ефективності тепло- та масообмінних процесів.

Для реалізації поставленої мети необхідно розв'язати такі завдання дослідження:

- провести порівняльний аналіз існуючих типів перемішувачів та встановити їх ефективність у роботі з в'язкими харчовими середовищами;
- визначити вплив геометричних і кінематичних параметрів мішалок на гідродинамічні характеристики потоку в апаратах;
- оцінити доцільність використання комбінованих систем перемішування для інтенсифікації тепло- та масообміну;
- обґрунтувати застосування CFD-моделювання як інструменту оптимізації форми лопатей і конструктивних параметрів мішалок;
- розробити рекомендації щодо вдосконалення конструкцій пристроїв перемішування для підвищення енергоефективності ємкісних теплообмінних апаратів.

Результати дослідження та їх обговорення. Актуальною науково-практичною задачею є розробка обґрунтованих конструкцій пристроїв перемішування, тобто таких, геометричні та кінематичні параметри яких визначені на основі аналітичних розрахунків, комп'ютерного моделювання та експериментальних даних. Такі конструкції покликані забезпечити якісне перемішування фаз для досягнення високої степені гомогенізації, інтенсивного тепло- та масообміну за рахунок формування рівномірних циркуляційних потоків у робочому об'ємі, підвищення турбулентності потоку та ефективного руйнування застійних зон, що водночас дозволяє зменшити питомі енерговитрати процесу.

Різноманіття типів перемішувачів у харчовій промисловості зумовлене особливостями середовищ – від низьков'язких рідин до гелеподібних мас.

За напрямком руху потоку розрізняють три основні групи мішалок. Радіальні мішалки створюють турбулентний потік переважно в горизонтальній площині, що забезпечує інтенсивне перемішування рідин із низькою в'язкістю. Осьові мішалки (пропелерного типу) формують потік уздовж осі апарата, сприяючи ефективній вертикальній циркуляції, завдяки чому відбувається вирівнювання температурного та концентраційного поля у всьому об'ємі робочого середовища. Комбіновані системи поєднують властивості осьових і радіальних мішалок, формуючи комплексний гідродинамічний режим, який підвищує ефективність тепло- та масообміну. Для покращення циркуляції середовища такі системи можуть оснащуватися напрямними трубами – конструктивними елементами, що спрямовують потік уздовж осі апарата, зменшують утворення вихорів і сприяють рівномірному розподілу енергії в об'ємі.

Порівняльний аналіз показав, що перехід від стандартних перемішуючих пристроїв до осьово-радіальних конструкцій з кутом нахилу $35\text{--}45^\circ$ дозволяє: підвищити коефіцієнт теплообміну на $20\text{--}40\%$, скоротити час змішування до 50% , зменшити споживання енергії на $15\text{--}25\%$.

Використання комбінованих конструкцій мішалок забезпечує рівномірний розподіл температури та концентрацій у всьому об'ємі апарата, що є особливо ефективним у виробництві паст, йогуртів, соусів та інших в'язких харчових продуктів. Для більш точного проектування таких систем і оптимізації їх роботи застосовують сучасні чисельні методи аналізу, які дозволяють оцінити гідродинамічні характеристики середовища ще на стадії проектування.

CFD-моделювання потоків в апараті дозволяє прогнозувати поведінку багатозадачних систем, підбираючи оптимальні геометричні параметри мішалок для певних видів продуктів.

Хоча більшість досліджень зосереджена на процесах перемішування та гомогенізації, отримані результати можна поширити на тепло- та масообмін, оскільки ефективна циркуляція середовища усуває застійні зони та сприяє вирівнюванню температурного і концентраційного полів у всьому об'ємі апарата.

Так, наприклад, системи з комбінованими конструкціями мішалок створюють потужні циркуляційні потоки, що підводять холодні (гарячі) потоки до стінки й швидко розподіляють тепло по об'єму [4]. Модифіковані лопаті [2] збільшують турбулентну кінетичну енергію, що руйнує пограничний шар і тим самим підвищує коефіцієнт теплопередачі.

Однак, як було зазначено вище, підвищення інтенсивності режиму перемішування призводить до зростання енергоспоживання, що в умовах харчової промисловості, де критично важливе застосування енергоефективного обладнання, виступає суттєвим обмеженням [5].

У харчовій промисловості сировина часто характеризується високою в'язкістю, утворенням емульсій та схильністю до адгезії до стінок апарата, при цьому до обладнання ставляться суворі гігієнічні вимоги. Конструкції з комбінованими мішалками або турбулізаторами можуть ускладнювати CIP (Cleaning-In-Place) – автоматизоване очищення обладнання без його розбирання. Підвищене енергоспоживання та складність обслуговування таких систем обмежують їх широке застосування у виробничих процесах.

Для середовищ із середньою в'язкістю та при стандартних режимах температурної обробки може бути достатньо модернізованої мішалки з модифікованими лопатями, без суттєвих змін конструкції апарата.

Для складніших умов процесу – таких як висока в'язкість середовища, наявність великих твердих частинок, а також високі вимоги до гомогенності та ефективності тепло- та масообміну – рекомендується застосовувати системи з комбінованими або подвійними мішалками, які забезпечують більш інтенсивну циркуляцію та рівномірний розподіл енергії у робочому об'ємі.

Проведений аналіз існуючих пристроїв перемішування (лопатевих, якірних, пропелерних, турбінних, стрічкових) показав їхні обмеження в роботі з в'язкими середовищами.

Якірні та лопатеві мішалки формують переважно тангенційний (обертальний) рух середовища та забезпечують інтенсивний контакт рідини зі стінками апарата, особливо при використанні скребків для видалення налиплого продукту. Водночас вони створюють значну зону застою в центральній частині об'єму. Напрямок удосконалення цих мішалок полягає в їх комбінуванні з центральними циркуляційними елементами, що дозволяє зменшити застійні зони та підвищити ефективність тепло- та масообміну.

Пропелерні та турбінні мішалки створюють осьові або радіальні потоки, що забезпечує ефективне перемішування в об'ємі апарата. Проте при роботі з високов'язкими рідинами вони малоефективні поблизу стінок, оскільки середовище може «прокручуватися» навколо мішалки без належного контакту зі стінками. Напрямок удосконалення включає оптимізацію профілю лопатей та використання відбивних перегородок для спрямування потоку.

Стрічкові та шнекові мішалки найкраще підходять для перемішування високов'язких паст, забезпечуючи повне перемішування продукту та ефективну циркуляцію по всьому об'єму. Водночас їх виготовлення є технологічно складним, очищення за допомогою СІР – трудомістким, а експлуатація характеризується підвищеним енергоспоживанням.

Жоден окремий тип пристрою перемішування не забезпечує оптимальної ефективності для всіх умов технологічного процесу. Перспективним напрямком розвитку є створення комбінованих систем перемішування, які інтегрують різні принципи гідродинаміки. Зокрема, це можуть бути конструкції, що поєднують пристінний рух, створюваний якірними або скребковими елементами, з інтенсивним радіально-осьовим потоком у центральній частині апарата, що утворений турбінними або пропелерними мішалками. Такий підхід забезпечує рівномірне перемішування, зменшення застійних зон та підвищення ефективності тепло- та масообміну.

Для прикладу наведено розроблену нами конструкцію комбінованої мішалки для пастеризаційної ванни ВДП-600, яка зазвичай комплектується лопатевою мішалкою. Значним недоліками лопатевих мішалок є: мала ефективність перемішування в'язких рідин, таких, як йогурт; обмежений об'єм рідини, яку необхідно інтенсивно перемішувати; відносна складність виготовлення і висока вартість.

Відомо, що для перемішування в'язких мас, таких, як йогурт, добре зарекомендували себе стрічкові мішалки, що дозволяють отримати будь-яку ступінь циркуляції потоку в об'ємі апарату. Висока ефективність перемішування досягається за рахунок дії стрічкової мішалки, яка транспортує рідину від поверхні до днища, і за рахунок виносу рідини знизу апарату до поверхні, що здійснюваного спіральною стрічкою. Стрічка, вигнута по гвинтовій лінії, створює складне перемішування без утворення застійних зон. Так, як стрічку встановлюють з малим зазором щодо стінки посудини, вона підвищує рухливість

поверхневої плівки рідини і підвищує швидкість теплопередачі в апаратах з тепловими сорочками. Також, для забезпечення уникнення застійних зон на дні ванни, додатково монтується пропелерна мішалка (рис. 1).

Подальші дослідження будуть спрямовані на розробку та обґрунтування нових конструкцій пристроїв перемішування, здатних інтенсифікувати процеси тепло- та масообміну у ємнісних теплообмінних апаратах харчової промисловості. Такий підхід дозволить підвищити ефективність технологічних процесів, зменшити зони застою середовища та оптимізувати енергоспоживання обладнання.

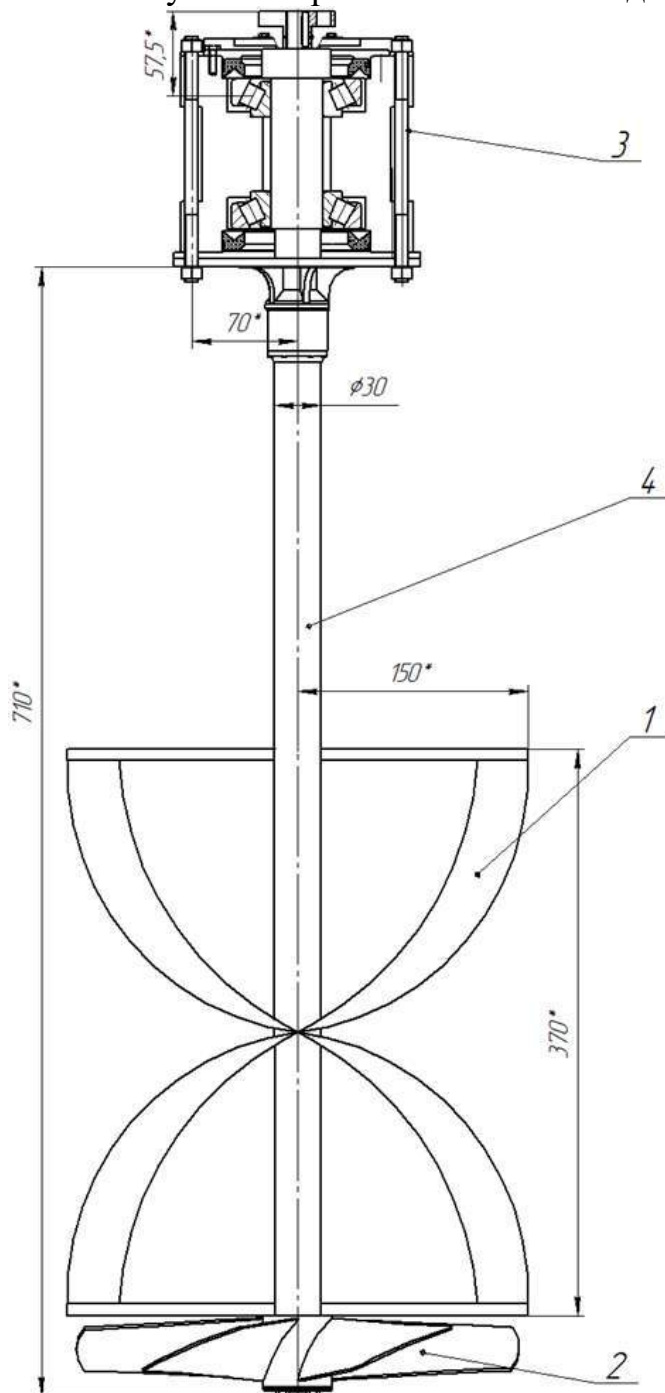


Рисунок 1. Модернізована комбінована мішалка для пастеризаційної ванни:

1 – стрічкова мішалка, 2 – пропелерна мішалка, 3 – вузол кріплення мішалки, 4 – вал мішалки

Висновки. Інтенсифікація тепло- та масообміну в ємкісних теплообмінних апаратах досягається за рахунок удосконалення конструкцій перемішуючих пристроїв, зокрема через застосування осьово-радіальних систем із напрямними елементами, що забезпечують високу однорідність середовища. CFD-моделювання є ключовим інструментом для розробки та оптимізації таких систем.

Перспективними напрямками подальших досліджень є використання ергономічно оптимізованих форм лопатей і адаптивного керування швидкістю обертання для підвищення ефективності тепло- та масообмінних процесів.

Список використаних джерел

1. Ascanio G. (2015). Mixing time in stirred vessels: A review of experimental techniques. *Chinese Journal of Chemical Engineering*, 23(7), 1065–1076. <https://doi.org/10.1016/j.cjche.2014.10.022>
2. Torotwa, I., & Ji, C. (2018). A Study of the Mixing Performance of Different Impeller Designs in Stirred Vessels Using Computational Fluid Dynamics. *Designs*, 2(1), 10. <https://doi.org/10.3390/designs2010010>
3. Yin, De-Wei & Kar, Kishore & Piras, Luciano. (2014). An Impeller-Draft Tube Agitation System for Gas-Liquid Mixing in a Stirred-Tank Reactor, *AIChE Annual Meeting At: Atlanta, Georgia, U.S.A. Volume: North American Mixing Forum / Mixing in Multiphase Systems / Abstract 354947 / Paper 143h*, https://www.researchgate.net/publication/267346937_An_Impeller-Draft_Tube_Agitation_System_for_Gas-Liquid_Mixing_in_a_Stirred-Tank_Reactor
4. Ge, M., & Zheng, G. (2024). Fluid–Solid Mixing Transfer Mechanism and Flow Patterns of the Double-Layered Impeller Stirring Tank by the CFD-DEM Method. *Energies*, 17(7), 1513. <https://doi.org/10.3390/en17071513>
5. Salho, A.K., Hamzah, D.A. (2024). A review of stirred tank dynamics: Power consumption, mixing time and impeller geometry. *International Journal of Heat and Technology*, Vol. 42, No. 3, pp. 1081-1092. <https://doi.org/10.18280/ijht.420335>
6. Xu, H., Guo, J., Xu, S., & Wang, K. (2025). The Influence and Optimization of Mixing Characteristics of Feed Based on Response Surface Methodology of Stirring Paddle Structure. *Processes*, 13(10), 3101. <https://doi.org/10.3390/pr13103101>
7. Lahamornchaiyakul, W. (2023). Computational Fluid Dynamics of Fluid Mixing by using the Vertical Impeller Axis and Inclined Impeller Axis. *Recent Science and Technology*, 15(3), 778–797. retrieved from <https://li01.tci-thaijo.org/index.php/rmutsvrj/article/view/249003>
8. Jirout, T., & Jiroutová, D. (2020). Application of Theoretical and Experimental Findings for Optimization of Mixing Processes and Equipment. *Processes*, 8(8), 955. <https://doi.org/10.3390/pr8080955>
9. Лементар, С. Ю., Бабко, Є. М., Гнатенко, М. А., & Мирончук, В. Г. (2004). Швидкість перемішування впливає на кристалізацію фруктози та якість кристалічного продукту. *Харчова і переробна промисловість*, 9, 24–25.
10. Краснолуцький, П.П. (2023). Обґрунтування конструктивних та технологічних параметрів мішалки метантенка. *Міжнародний науковий журнал*

інженерії та сільського господарства, 2 (3), 26–37.
<https://doi.org/10.46299/j.isjea.20230203.04>

11. Черевко, О. І., Маяк, О. А., Костенко, С. М., & Сардаров А. М. (2019) Експериментальне та імітаційне дослідження теплообміну під час уварювання овочевого соку. Прогресивні техніка та технології харчових виробництв ресторанного господарства і торгівлі, 2019, 1(29), 75–85.

МЕТОД ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ ЛІКУВАЛЬНО- ДІАГНОСТИЧНОГО ПРОЦЕСУ ЛІКАРНІ У ВОЄННИЙ ЧАС

Висоцька Олена

д.т.н., професор

Трунова Анна

к.т.н., доцент

Огус Ілля

здобувач вищої освіти магістерського рівня

Кафедра радіоелектронних та біомедичних

комп'ютеризованих засобів і технологій

Національний аерокосмічний університет

«Харківський авіаційний інститут», Україна

Умови воєнних дій, надзвичайних ситуацій і техногенних катастроф висувають особливі вимоги до стійкості та ефективності функціонування медичних закладів, що зумовлює потребу в спеціалізованих ІТ-рішеннях, здатних забезпечити безперервність лікувально-діагностичного процесу.

Більшість цивільних лікувальних установ не мають необхідної ІТ-інфраструктури, яка могла б гарантувати ефективну роботу в умовах обмеженого доступу до ресурсів, що підтверджує потребу у створенні адаптованих програмних засобів для таких умов.

Методи та методики дій у надзвичайних ситуаціях, інтегровані в інформаційні технології, дозволяють автоматизувати критично важливі процеси, знизити вплив людського чинника, підвищити швидкість ухвалення рішень і ефективність взаємодії медичного персоналу.

Впровадження спеціалізованих ІТ-засобів у медичну практику в умовах війни підвищує рівень оперативності, координації та результативності медичної допомоги, що напряду впливає на зниження летальності й підвищення виживаності пацієнтів.

Аналіз відомих методів забезпечення лікувально-діагностичного процесу лікарні у воєнний час показав їх обмежену точність, суб'єктивну оцінку, залежність від кваліфікації лікаря та труднощі застосування цих методів у