УДК 664.063.8

ANALYSIS OF DESIGNS OF LIQUID MIXING DEVICES IN FOOD PROCESSING APPARATUSES

B. Denysiuk, https://orcid.org/0009-0006-9854-0735
R. Yakobchuk, https://orcid.org/0000-0001-9777-5790
National University of Food Technologies, Kyiv, Ukraine

Key words:
Mixing devices
Liquid products
Working body
CFD modeling
Hydrodynamics
Heat and mass transfer

Article history:
Received 04.05.2026
Received in revised form 20.05.2026
Accepted 10.06.2026
Published 30.06.2026

Corresponding author:
R. Yakobchuk
E-mail:
yakroman@ukr.net

Citation: Денисюк Б. П., Якобчук Р. Л. (2026). Аналіз конструкцій пристроїв перемішування рідин в апаратах харчових виробництв. *Наукові праці Національного університету харчових технологій*, 32(3), 221—233. https://doi.org/10.24263/2225-2924-2026-32-3-17

ISSN 2617-1945 (online)
ISSN 2225-2924 (print)

ABSTRACT

An analysis of mixing device designs used in food production equipment, taking into account the rheological properties of the media is presented in the article. Many food products are characterized by high viscosity, non-Newtonian behavior, yield stress, and a complex structure. These properties complicate the formation of a uniform flow, promote stagnant zones, and reduce the intensity of heat and mass transfer. The study is based on an analysis of literature sources on mixing devices.

It was shown that individual working elements did not always provide sufficient mixing intensity in viscous food media. Turbine impellers generated local shear stresses and were effective for low-viscosity liquids; however, with increasing viscosity, their action was limited to the zone near the impeller. Propeller-type elements form axial circulation and improve bulk mixing, but have a weaker effect on the near-wall zone. Anchor and frame designs enhance heat transfer near the vessel walls, but insufficiently activate the central part of the volume. Under high-viscosity conditions, this leads to uneven temperature distribution, product heterogeneity, and lower process efficiency.

The feasibility of using combined mixing devices, in which different working elements complement one another, is substantiated. Combining an anchor element with an internal propeller intensifies heat transfer in the near-wall zone, activates axial flow, and reduces stagnant regions in the central part of the vessel. CFD modeling is considered a tool for evaluating flow structure, energy consumption, and the influence of working-element geometry. The obtained results can be used to improve the efficiency of processes in the food industry and to develop design solutions that account for the rheological properties of products.

DOI: 10.24263/2225-2924-2026-32-3-17

АНАЛІЗ КОНСТРУКЦІЙ ПРИСТРОЇВ ПЕРЕМІШУВАННЯ РІДИН В АПАРАТАХ ХАРЧОВИХ ВИРОБНИЦТВ

Б. П. Денисюк, https://orcid.org/0009-0006-9854-0735
Р. Л. Якобчук, https://orcid.org/0000-0001-9777-5790
Національний університет харчових технологій, Київ, Україна

У статті проаналізовано конструкції пристроїв перемішування в апаратах харчових виробництв з урахуванням реологічних властивостей середовищ. Значна частина харчових продуктів має високу в'язкість, неньютонівську поведінку, граничну напругу зсуву та складну структуровану будову. Такі властивості ускладнюють формування рівномірного потоку, сприяють появі застійних зон і знижують інтенсивність тепло- та масообміну. Дослідження виконано на основі аналізу джерел щодо пристроїв перемішування.

Показано, що окремі робочі органи не завжди забезпечують достатню інтенсивність перемішування у в'язких харчових середовищах. Турбінні робочі органи створюють локальні зсувні напруження і є ефективними для малов'язких рідин, однак зі зростанням в'язкості дія обмежується зоною біля мішалки. Пропелерні робочі органи формують осьову циркуляцію та покращують об'ємне перемішування, проте слабше впливають на пристінну зону. Якірні та рамні конструкції підвищують тепловіддачу біля стінок апарата, але недостатньо активізують центральну частину об'єму. За високої в'язкості це спричиняє нерівномірний температурний розподіл, неоднорідність продукту й зниження ефективності процесу.

Обґрунтовано доцільність використання комбінованих пристроїв перемішування, у яких різні робочі органи взаємно доповнюють один одного. Поєднання якірного елемента з внутрішнім пропелером посилює теплообмін у пристінній зоні, активізує осьовий потік і зменшує застійні ділянки в центральній частині апарата. CFD-моделювання розглянуто як інструмент оцінювання структури потоків, енергоспоживання та впливу геометрії робочих органів. Отримані результати можуть бути використані для підвищення ефективності процесів у харчовій промисловості та розроблення конструктивних рішень з урахуванням реологічних властивостей продуктів.

Ключові слова: *пристрої перемішування, рідкі продукти, робочий орган, CFD-моделювання, гідродинаміка, тепломасообмін.*

Постановка проблеми. Сучасна харчова промисловість зустрічається з викликами, що обумовлені необхідністю обробки складних багатокомпонентних продуктів, які характеризуються нестандартною реологічною поведінкою. Виробництво широкого спектра харчових продуктів вимагає реалізації процесів змішування в умовах високої в'язкості та неньютонівського характеру течії. Ключовою проблемою у цій сфері є те, що ефективність теплових (пастеризація, стерилізація, уварювання) та масообмінних (ферментація, кристалізація, розчинення) процесів лімітується гідродинамічним режимом в робочому об'ємі апарата.

Апарат з механічним пристроєм перемішування є одним із найпоширеніших видів обладнання, що застосовується в харчовій промисловості. Пристрій перемішування — це конструкція, яка включає привід, вал і робочий орган (мішалку), що забезпечує інтенсивне перемішування середовища. Привід, зазвичай, складається з електродвигуна, редуктора або мотор-редуктора та опорної конструкції. Обертання на вал передається через муфту або безпосередньо від мотор-редуктора. На кінці вала закріплюється робочий орган — основний елемент, що формує гідродинамічний режим потоку в апараті.

Традиційний підхід до проєктування ємкісного обладнання, що базується на використанні уніфікованих робочих органів (лопатевих, якірних, рамних), часто ігнорує складну внутрішню структуру харчових середовищ. В'язкі харчові продукти, зазвичай, демонструють псевдопластичні (зсувне розрідження), в'язкопластичні або тиксотропні (залежність в'язкості від часу дії навантаження) властивості. Ігнорування цих характеристик при виборі геометрії пристрою перемішування (робочих органів) зумовлює виникнення низки критичних технологічних проблем.

По-перше, спостерігається явище гідродинамічної ізоляції зон. При перемішуванні рідин з межею плинності (наприклад, кетчупи або шоколадні маси) навколо робочого органу формується так звана «каверна» (cavern) — зона активного руху, де напруга зсуву перевищує межу плинності матеріалу. Поза межами цієї зони матеріал залишається у стані спокою, утворюючи застійні зони («мертві зони»). Це явище детально описано у працях (Alraddadi, 2023; Kazemzadeh, 2017), де вказується на неможливість досягнення однорідності продукту в таких умовах без використання спеціалізованих коаксіальних або комбінованих конструкцій пристроїв перемішування.

По-друге, низька інтенсивність оновлення поверхні теплообміну призводить до локальних перегрівів. У процесах теплової обробки, таких як уварювання овочевих соків, досліджених (Черевко та ін., 2019), або пастеризація в'язких молочних сумішей, утворення пограничного термічного шару з високим термічним опором стає бар'єром для ефективної теплопередачі. Це не лише збільшує енерговитрати, але й, що критично для харчової промисловості, викликає незворотні зміни якості продукту: денатурацію білків, карамелізацію цукрів, пригорання на стінках апарата та погіршення органолептичних показників.

По-третє, енергетична ефективність стандартних рішень є незадовільною. Намагання компенсувати недоліки змішування шляхом простого збільшення частоти обертання робочого органу призводить до експоненційного зростання споживаної потужності (Salho та Hamzah, 2024). При цьому значна частина енергії дисипує у вигляді тепла безпосередньо біля лопатей, що може бути негативним для продукту, тоді як периферійні зони апарата залишаються нерухомими.

Окремим аспектом проблематики є складність масштабування процесів при проведенні досліджень. Результати, отримані на лабораторних моделях, часто не відтворюються на промислових апаратах через нелінійність гідродинамічних ефектів у неньютонівських середовищах. Експериментальні методи дослідження є обмеженими, що зумовлює необхідність широкого залучення методів обчислювальної гідродинаміки (CFD) для верифікації конструктивних рішень, як це показано в працях (Ge, 2024; Torotwa, 2018).

Згідно з даними досліджень (Brahim, 2022; Torotwa, 2018), оптимізація геометрії лопатей робочого органу дозволяє досягти необхідного ступеня змішування при значно менших енерговитратах. Проте існує розрив між теоретичними розробками пристроїв перемішування та їх реальним впровадженням у конструкції серійних апаратів.

Таким чином, науково-технічна проблема полягає в суперечності між зростаючими вимогами до якості та однорідності в'язких харчових продуктів і обмеженими функціональними можливостями існуючого обладнання. Розв'язання цієї проблеми вимагає переходу від емпіричного конструювання до науково обґрунтованого синтезу комбінованих пристроїв перемішування, що враховують реологічну характеристику середовища.

Мета дослідження: аналіз конструктивних особливостей і принципів роботи пристроїв перемішування в апаратах харчових виробництв з урахуванням реологічних властивостей продуктів, виявлення їх впливу на гідродинаміку і тепломасообмін та обґрунтування доцільності застосування комбінованих пристроїв перемішування.

Матеріали і методи. Дослідження базується на аналізі науково-технічної літератури, присвяченої процесам перемішування харчових продуктів, конструктивним особливостям перемішуючих робочих органів та їх застосуванню в апаратах харчових виробництв.

Результати дослідження. Аналіз літературних джерел свідчить, що однією з визначальних проблем забезпечення ефективного перемішування в харчовій промисловості є складна реологічна поведінка середовищ. Узагальнення результатів досліджень, зокрема (Ameur, 2018; Xie, 2019), показує, що застосування класичних ньютонівських моделей для опису властивостей харчових продуктів призводить до суттєвих похибок при оцінюванні потужності приводу й тривалості процесу перемішування.

З огляду на зазначене вище, ключова гідродинамічна проблема полягає у формуванні псевдопластичних зон у робочому об'ємі апарата. Для таких середовищ характерне зниження в'язкості зі зростанням градієнта швидкості, що зумовлює утворення поблизу робочого органу зони інтенсивного руху з пониженою в'язкістю. Водночас із віддаленням від вала градієнт швидкості зменшується, що спричиняє різке зростання в'язкості та перехід рідини до режиму повзучої течії або стагнації.

У праці (Alraddadi та ін., 2023) показано, що для рідин, які описуються моделлю Bingham-Papanastasiou, критичним є забезпечення перевищення напруги зсуву над межею плинності в усьому об'ємі апарата. У протилежному випадку, зокрема при недостатніх напругах поблизу стінок, формуються нерухомі шари («мертві зони»), які істотно погіршують інтенсивність тепло- та масообміну, виконуючи роль теплоізолятора.

Дослідження (Ramsay та ін., 2016) розширюють уявлення про специфіку таких процесів. Зокрема, при перемішуванні в'язкопластичних середовищ робочими органами типу «метелик» встановлено прояв нормальних напруг (ефект Вайсенберга), що спричиняє піднімання рідини вздовж вала та зміну структури потоку порівняно з ньютонівськими системами. Це, у свою чергу, обґрунтовує необхідність

перегляду підходів до конструювання пристроїв перемішування на заміну орієнтації на розвиток турбулентності, пріоритетним стає забезпечення ефективного об'ємного переміщення середовища.

Зважаючи на викладені особливості гідродинаміки та реологічну поведінку середовищ, на основі узагальнення опрацьованих джерел запропоновано класифікацію основних типів пристроїв перемішування (робочих органів) за характером створюваного потоку та їх доцільністю застосування для в'язких систем (табл. 1).

Таблиця 1. **Порівняльний аналіз основних типів робочих органів за гідродинамічними характеристиками**

Тип робочого органу	Потік, що переважає	В'язкість	Переваги	Недоліки
Турбіна (рис. 1)	Радіальний (від центру до стінок)	Низька (< 10 Па·с)	Високий зсув, диспергування крапель	Слабке осьове змішування, швидке загасання потоку у в'язких середовищах, локалізація енергії
Пропелерна (рис. 2)	Осьовий (вздовж валу)	Низька-середня (< 50 Па·с)	Хороша циркуляція, підйом твердих частинок, менша потужність	Ковзання в'язкої рідини біля стінок, утворення центральної воронки
Якірна/рамна (рис. 3)	Тангенціальний (обертальний)	Висока (> 100 Па·с)	Очищення стінок, покращення теплообміну, робота з псевдопластиками	Слабке вертикальне змішування, обертання «твердим тілом» у центрі
Комбінована (рис. 4)	Змішаний (3D потік)	Дуже висока/неньютонівська	Синергія макро- та мікрозмішування, відсутність застійних зон, керований зсув	Складність конструкції, висока вартість, складність очищення

Відповідно до запропонованої класифікації, доцільно детальніше розглянути особливості роботи окремих типів робочих органів перемішування у різних реологічних умовах. Зокрема, результати досліджень (Chtourou, 2014; Foukrach, 2020) підтверджують, що турбіни Раштона (рис. 1) є базовим рішенням для процесів диспергування газу в рідині. Вони формують інтенсивні радіальні струмені, які, взаємодіючи зі стінками апарата, утворюють дві циркуляційні петлі — верхню та нижню, забезпечуючи ефективне перемішування у малов'язких середовищах.

Водночас для в'язких і в'язкопластичних систем ефективність такого типу робочих органів суттєво знижується. Через швидку дисипацію радіального імпульсу інтенсивність макропереносу різко падає. Як показано в (Ameur, 2018), зі зростанням в'язкості обмін масою між верхньою та нижньою зонами практично припиняється, що унеможливлює досягнення однорідності по всьому об'єму без застосування додаткових конструктивних елементів (наприклад, перегородок або комбінованих робочих органів).

Додатковим обмеженням є високі локальні зсувні напруги, характерні для турбін Раштона, які можуть призводити до руйнування структурно чутливих компонентів харчових продуктів, зокрема частинок фруктів або біополімерних матриць.

Це ще раз підкреслює необхідність узгодження типу робочого органу перемішування з реологічними властивостями середовища та вимогами до збереження структури продукту.

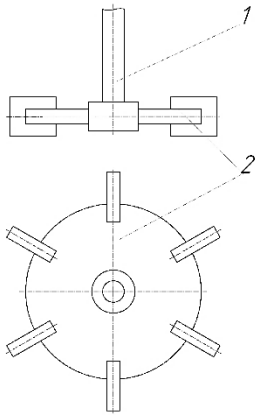


Рис. 1. Турбінний робочий орган перемішування: 1 — вал; 2 — робочий орган

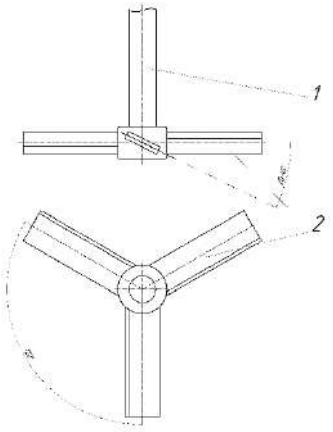


Рис. 2. Пропелерний робочий орган перемішування: 1 — вал; 2 — робочий орган

У контексті виявлених обмежень турбінних робочих органів перемішування доцільно розглянути альтернативні конструкції, орієнтовані на формування об'ємного переміщення середовища. Зокрема, осьові (пропелерні) робочі органи (рис. 2), у тому числі з похилими лопатями, характеризуються більш універсальними гідродинамічними властивостями та здатністю забезпечувати спрямований осьовий потік.

Як показано в працях (Ramsay, 2016; Torotwa, 2018), на основі CFD-досліджень встановлено істотний вплив кута нахилу лопатей на ефективність перемішування. Зокрема, збільшення кута нахилу з 30° до 45° супроводжується посиленням насосної дії в осьовому напрямку та скороченням часу змішування на 25...40%. Додатково в дослідженні (Lahamornchaiyakul, 2023) проаналізовано вплив просторового положення вала: його нахил порушує осьову симетрію потоку, що дозволяє уникнути утворення центральної воронки без застосування відбивних перегородок. Це є суттєвою перевагою для харчових виробництв, де гігієнічні вимоги обмежують використання конструктивних елементів, здатних утворювати зони, які є складними для очищення.

Водночас, попри зазначені переваги, пропелерні робочі органи мають обмежену ефективність при перемішуванні в'язких і в'язкопластичних середовищ. Як відзначено у (Lahamornchaiyakul, 2023), формований ними потік локалізується переважно в центральній зоні апарата, тоді як пристінкові шари залишаються малорухомими або нерухомими. Це створює критичні умови для теплообмінних процесів, оскільки саме в пристінковій ділянці відбувається передача тепла, що вимагає додаткових конструктивних або режимних рішень для інтенсифікації перемішування.

З огляду на недостатню ефективність пропелерних робочих органів перемішування у пристінковій зоні для високов'язких середовищ доцільним є застосування

робочих органів із мінімальним зазором до стінки апарата (рис. 3). Такі конструкції забезпечують інтенсивне зсувне деформування саме в зоні теплообміну (біля стінок апарата) та сприяють залученню малорухомих шарів до процесу перемішування.

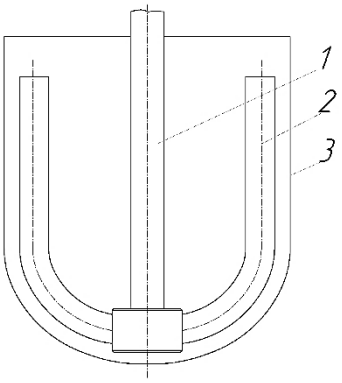


Рис. 3. Якірний/рамний робочий орган перемішування: 1 — вал; 2 — робочий орган; 3 — апарат (ємкість)

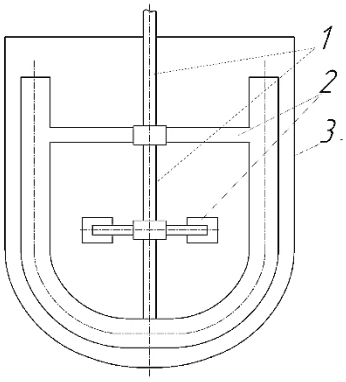


Рис. 4. Комбінований робочий орган перемішування: 1 — вал; 2 — робочий орган; 3 — апарат (ємкість)

Зокрема, у працях (Ameur, 2016; Kamla, 2021), присвячених удосконаленню якірних робочих органів перемішування, показано, що використання вигнутих профілів якорів, а також введення додаткових горизонтальних перемичок дозволяє частково порушити ламінарну структуру потоку та інтенсифікувати вертикальну циркуляцію. Це позитивно впливає на вирівнювання температурного поля та зменшення товщини пристінкового шару.

Разом з тим, попри зазначені конструктивні покращення, принциповий недолік якірних робочих органів зберігається. Вони формують переважно тангенціальний рух рідини, внаслідок чого в центральній частині апарата часто виникає зона квазітвердого обертання, де середовище рухається як єдине ціле разом із робочим органом. У цій зоні інтенсивність перемішування є мінімальною, що обмежує досягнення повної гомогенізації та потребує застосування комбінованих або додаткових конструктивних рішень.

Подальший розвиток підходів до інтенсифікації перемішування, що пов’язані з відходом від традиційних схем формування потоку та використанням принципів хаотичної адвекції. У цьому напрямі заслуговують на увагу дослідження (Gu та ін., 2025), в яких запропоновано концепцію так званого «деревоподібного перемішувача».

Застосування фрактальної геометрії в конструкції робочого органа забезпечує формування багатомасштабної вихрової структури потоку, що суттєво підвищує ефективність перемішування навіть при низьких числах Рейнольдса. Такий підхід сприяє інтенсифікації розтягування та згортання рідинних елементів, що є ключовими механізмами хаотичного перемішування.

У результаті досягається більш рівномірний розподіл компонентів у всьому об’ємі апарата та мінімізується утворення ізольованих або слабко перемішуваних

зон, характерних для традиційних типів робочих органів перемішування. Це відкриває перспективи для ефективного перемішування в'язких і в'язкопластичних середовищ без суттєвого зростання енергетичних витрат.

Поряд з удосконаленням конструкції робочих органів, перспективним напрямом є оптимізація допоміжних елементів апарата, зокрема перегородок. У цьому контексті заслуговують на увагу результати дослідження (Zhou та ін., 2022), присвячені застосуванню синусоїдальних перегородок.

На відміну від традиційних плоских перегородок, синусоїдальна геометрія формує складнішу структуру потоку, сприяючи генерації вторинних вихорів. Це, у свою чергу, інтенсифікує радіальне перемішування та покращує перенесення імпульсу між різними зонами апарата.

Крім того, така конфігурація дозволяє знизити гідродинамічний опір системи, що проявляється у зменшенні енергоспоживання при збереженні або навіть підвищенні ефективності перемішування. Це робить синусоїдальні перегородки доцільним елементом у конструкціях апаратів для роботи з в'язкими середовищами.

Важливо враховувати, що реальні харчові середовища, як правило, не є однофазними рідинами. У більшості випадків вони представлені газорідинними системами або суспензіями з твердою дисперсною фазою, що суттєво ускладнює гідродинаміку процесу перемішування.

Наявність дисперсних фаз змінює механізми перенесення імпульсу та масообміну, впливає на ефективну в'язкість середовища та характер розподілу швидкостей у робочому об'ємі. Це потребує врахування міжфазної взаємодії при виборі типу робочого органа перемішування та режимних параметрів її роботи.

З урахуванням багатофазної природи харчових середовищ, особливої уваги потребують конструктивні рішення, спрямовані на інтенсифікацію міжфазної взаємодії. У працях (Gu, 2025; Yin, 2014) запропоновано систему «імпелер — напрямна труба», в якій напрямна труба забезпечує локалізацію газового потоку та його багаторазове проходження через зону дії робочого органу перемішування. Таке забезпечення руху фаз сприяє суттєвому підвищенню коефіцієнта масопередачі та ефективності диспергування газу. Подібні рішення є особливо доцільними для ферментаційних процесів, де визначальним є інтенсивне насичення середовища киснем.

У свою чергу, для систем типу «рідина — тверде тіло» перспективним є застосування комбінованих перемішувальних пристроїв. Зокрема, у дослідженні (Ge та Zheng, 2024) з використанням CFD-DEM підходу детально проаналізовано роботу двошарового робочого органа перемішування. Встановлено механізми суспендування частинок і показано, що застосування подвійного робочого органа дозволяє підтримувати тверду фазу у зваженому стані за нижчих частот обертання порівняно з однорівневими конструкціями. Це не лише зменшує енергоспоживання, але й мінімізує механічне пошкодження чутливих частинок, зокрема компонентів харчових продуктів, таких як фруктові включення.

Логічним продовженням аналізу конструктивних рішень є розгляд сучасних підходів до їх проєктування, серед яких визначальну роль відіграє чисельне моделювання. Узагальнення літературних даних свідчить про еволюцію методів дослідження — від спрощених двовимірних досліджень до повноцінних тривимірних

CFD-симуляцій, здатних адекватно відтворювати складну структуру потоків в апаратах з пристроями перемішування.

При цьому, як показано в працях (Chtourou, 2014; Torotwa, 2018), ключовим аспектом є коректний вибір моделі турбулентності. Стандартні моделі добре описують повністю турбулентні режими, однак для перехідних і ламінарно-турбулентних течій, характерних для в'язких і в'язкопластичних середовищ, необхідне використання більш адаптованих підходів, що враховують специфіку реології та структури потоку.

Подальший розвиток чисельних методів пов'язаний з їх інтеграцією з оптимізаційними підходами. Зокрема, у дослідженні (Xu та ін., 2025) продемонстровано ефективність поєднання CFD з методологією поверхні відгуку (RSM). Шляхом варіювання геометричних параметрів лопаті (кут нахилу, ширина, кривизна) визначено конфігурації, що забезпечують максимальну інтенсивність змішування при мінімальних енергетичних витратах. Це підтверджує, що навіть незначні зміни геометрії робочого органа можуть суттєво впливати на гідродинаміку процесу.

Особливу цінність CFD-моделювання має для аналізу складних багатовальних систем, таких як коаксіальні та планетарні робочі органи перемішування (Ohmura, 2018; Xie, 2019; Xu, 2025). Чисельні дослідження дозволяють візуалізувати взаємодію полів швидкостей, сформованих незалежними приводами, що практично недоступно для експериментального вивчення в непрозорих середовищах. Зокрема, встановлено, що планетарний рух забезпечує покриття робочими органами всього об'єму апарата в часі, що практично усуває застійні зони та підвищує рівномірність перемішування.

Розглянуті результати чисельного моделювання та аналізу гідродинаміки безпосередньо підводять до оцінювання теплових процесів, оскільки ефективність перемішування тісно пов'язана з інтенсивністю тепло- і масообміну. Фактично, структура потоку визначає товщину пограничних шарів і, відповідно, швидкість перенесення тепла та речовини.

Так, у дослідженні (Лементар та ін., 2004), присвяченому впливу швидкості перемішування на процес кристалізації фруктози, встановлено, що інтенсифікація перемішування не лише прискорює масоперенос до поверхні кристалів, але й забезпечує формування більш однорідного гранулометричного складу. Це дозволяє запобігти агломерації частинок і покращити якість кінцевого продукту.

Аналогічні закономірності виявлено і для теплових процесів. У праці (Черевко та ін., 2019), де досліджено теплообмін при уварюванні овочевих соків, показано, що коефіцієнт теплопередачі від стінки до рідини лімітується товщиною гідродинамічного пограничного шару. Використання робочих органів перемішування, здатних ефективно турбулізувати пристінкову зону, дозволяє зменшити цей шар, інтенсифікувати випаровування вологи та знизити необхідний температурний напір, що є критичним для збереження термолабільних компонентів, зокрема вітамінів.

Для апаратів із вбудованими теплообмінними елементами, зокрема вертикальними трубними пучками, дослідження (Ohmura, 2018; Xie, 2019; Xu, 2025) показують, що організація осьової циркуляції суттєво покращує умови омивання поверхні теплообміну порівняно з радіальними турбінними робочими органами перемішування. Це забезпечує більш рівномірний розподіл температури та підвищує загальну ефективність процесу.

Отримання таких результатів стало можливим завдяки комплексному поєднанню чисельних та експериментальних методів, що нині є стандартом у проєктуванні перемішувального обладнання (Chtourou, 2014; Rivera, 2009; Wang, 2020). Зокрема, застосовуються методи скінченних об'ємів (FVM) та скінченних елементів (FEM) для дискретизації робочого об'єму та розв'язання рівнянь руху. Для адекватного опису турбулентності використовуються розвинені моделі, здатні відтворювати структуру потоку поблизу лопатей і стінок апарата. У задачах багатофазних систем широко застосовуються підходи Ейлера-Лагранжа та CFD-DEM для аналізу поведінки дисперсних частинок.

Експериментальна верифікація базується на вимірюванні крутного моменту на валу пристрою перемішування для визначення споживаної потужності, а також на використанні сучасних методів візуалізації потоків. Зокрема, PIV-анемометрія дозволяє отримувати детальні карти полів швидкостей і турбулентних характеристик, тоді як метод PLIF застосовується для дослідження процесів змішування на мікрорівні та визначення часу досягнення гомогенності.

Узагальнення розглянутих гідродинамічних і тепломасообмінних закономірностей свідчить, що жоден окремий тип робочого органа перемішування не забезпечує комплексного вирішення задачі перемішування в'язких харчових середовищ. Зокрема, якірні робочі органи ефективні для інтенсифікації теплообміну в пристінковій зоні, проте малоефективні в центральній частині апарата. Водночас пропелерні та турбінні робочі органи забезпечують активне перемішування в об'ємі, але не здатні усунути застійні явища біля стінок. Це обґрунтовує доцільність застосування комбінованих пристроїв перемішування.

З урахуванням проведеного аналізу літературних джерел доцільно запропонувати конструкцію комбінованого пристрою перемішування, що орієнтований на інтенсифікацію теплових і масообмінних процесів (пастеризація, уварювання, кристалізація тощо) у в'язких середовищах. Конструкція (рис. 5) поєднує якірний робочий орган перемішування з внутрішньоосьовим — трилопатевим пропелером, розміщеним на єдиному валу.

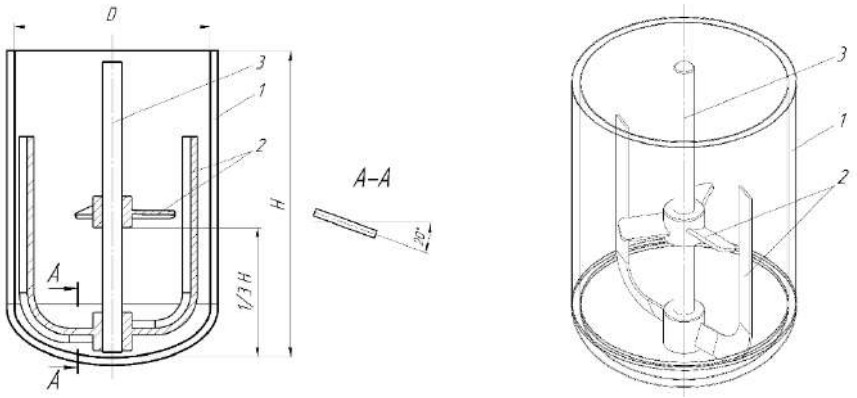


Рис. 5. Комбінований пристрій перемішування: 1 — апарат (ємкість); 2 — комбінований робочий орган; 3 — вал

Особливістю якірної частини є використання похилих горизонтальних перемичок (кут нахилу близько 20°), що дозволяє генерувати додаткову осьову складову швидкості від дна апарата та порушувати структури квазітвердого обертання. Пропелер, розташований на висоті приблизно $h = 0{,}25 \ldots 0{,}3H$ (де H — висота апарата) від дна апарата, формує висхідний потік, який забезпечує ефективне перемішування в центральній зоні та оновлення поверхні випаровування, що є критичним для вакуум-уварювання.

Ключовою перевагою запропонованої конструкції є зниження термічного опору пристінкового шару. Якірний елемент забезпечує постійне зрізання перегрітих шарів рідини зі стінки, тоді як осьовий потік від пропелера транспортує їх у центральну зону, сприяючи вирівнюванню температурного поля.

Така комбінована конструкція дозволить уникнути формування стабільних застійних зон навіть у середовищах з вираженою межею плинності (наприклад, томатні концентрати). Це досягається завдяки безперервному «підживленню» зони дії якірного робочого органу перемішування потоком із центральної частини апарата.

Висновки

Проведений аналіз показав, що ефективність перемішування в харчових середовищах визначається їх реологічними властивостями, а застосування окремих типів робочих органів перемішування має обмежену ефективність. Найбільш обґрунтованим рішенням є використання комбінованих конструкцій пристроїв перемішування, які забезпечують одночасно інтенсивне об’ємне перемішування та ефективний теплообмін у пристінковій зоні.

Встановлено, що методи CFD-моделювання є ключовим інструментом проєктування, що дозволяють оптимізувати геометрію та режими роботи пристроїв перемішування.

Подальші дослідження будуть спрямовані на пошук та розроблення ефективних конструктивних рішень пристроїв перемішування в апаратах з урахуванням вимог реологічних властивостей харчових продуктів.

Фінансування досліджень

Дослідження виконано в межах наукової тематики кафедри технологічного обладнання та комп’ютерних технологій проєктування Національного університету харчових технологій. Зовнішнє фінансування від державних, комерційних чи міжнародних організацій не залучалося. Спонсори не впливали на дизайн дослідження, збір і аналіз даних, інтерпретацію результатів, підготовку рукопису та рішення щодо його публікації.

Етичні аспекти

Дослідження не передбачало участі людей і не було пов’язане з використанням біологічних матеріалів людського походження чи лабораторних тварин. Тому, відповідно до політики журналу, схвалення локального комітету з етики не вимагалося.

Конфлікт інтересів

Автори заявляють про відсутність конфлікту інтересів.

Внесок авторів

Концептуалізація — Б. П. Денисюк, Р. Л. Якобчук; методологія — Б.П. Денисюк, Р. Л. Якобчук; дослідження — Б. П. Денисюк; формальний аналіз — Б. П. Денисюк, Р. Л. Якобчук; написання — оригінальна чернетка — Б. П. Денисюк; написання — рецензування та редагування — Р. Л. Якобчук, Б. П. Денисюк.

Література

Закоморний, Д. М., Поводзинський, В. М. & Шибецький, В. Ю. (2015). Класифікація та аналіз роботи ферментерів з механічними перемішуючими пристроями в аеробних процесах біотехнології. *ScienceRise*, 5(2), 24—32. https://doi.org/10.15587/2313-8416.2015.42614.

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. https://dspace.nuft.edu.ua/handle/123456789/4620.

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*, 1(29), 75—85. https://doi.org/10.31866/2616-7468.2.2.2019.188206.

Alraddadi, I., Yang, D., Katbar, N., Benhanifia, K., Rahmani, L., Mebarki, B., Ameur, H., Jamshed, W., Eid, M., Hussain, S. & El Din, S. (2023). Effect of curved anchor impellers on power consumption and hydrodynamic parameters of yield stress fluids (Bingham-Papanastasiou model) in stirred tanks. *Reviews On Advanced Materials Science*, 62(1), 20230156. https://doi.org/10.1515/rams-2023-0156.

Ameur, H. (2018). Modifications in the Rushton turbine for mixing viscoplastic fluids. *Journal of Food Engineering*, 223, 117—125. https://doi.org/10.1016/j.jfoodeng.2018.04.005.

Ameur, H., Youcef, K. & Djamel, S. (2016). CFD Simulations of Mixing Characteristics of Radial Impellers in Cylindrical Reactors. *ChemistrySelect*, 1(10), 2548—2551. https://doi.org/10.1002/slct.201600579.

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.

Brahim, M., Benhanifia, K., Jamshed, W., Al-Farhany, K., Redouane, F., Eid, M. R., Hussain, S. M., Akram, M. & Kamel, A. (2022). Computational Analysis of Viscoplastic Nanofluid Blending by a Newly Modified Anchorage Impeller within a Stirred Container. *Symmetry*, 14(11), 2279. https://doi.org/10.3390/sym14112279.

Chtourou, W., Ammar, M., Driss, Z., Abid, M. S. (2014). CFD prediction of the turbulent flow generated in stirred square tank by a Rushton turbine. *Energy and Power Engineering*, 6(5), 95—110. http://dx.doi.org/10.4236/epe.2014.65010.

Foukrach, M., Bouzit, M., Ameur, H., Kamla, Y. (2020). Effect of Agitator's Types on the Hydrodynamic Flow in an Agitated Tank. *Chinese Journal of Mechanical Engineering*, 33(37). https://doi.org/10.1186/s10033-020-00454-2.

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.

Gu, D., Yang, H., Li, Ch., Peng, T., Zhang, J., Gong, H. (2025). Study on the chaotic mixing characteristics in an endogenous tree cut impeller stirred tank reactor. *Physics of Fluids*, 37(11), 113607. https://doi.org/10.1063/5.0304657.

Hussein, D., Khudhur, D. (2020). Effect of dual impeller type on flow behavior in fully baffled mixing tank. *AIP Conference Proceedings*, 2213, 020300. https://doi.org/10.1063/5.0000149.

Jairamdas, K., Bhalerao, A., Machado, M. & Kresta, S. (2019). Blend Time Measurement in the Confined Impeller Stirred Tank. *Chemical Engineering & Technology*, 42(8), 1594—1601. https://doi.org/10.1002/ceat.201800752.

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.

Kamla, Y., Houari, A., Ilies, A. & Belalia, A. (2021). Data on the hydrodynamics and power consumption induced by modified anchor impellers in cylindrical tanks. *Data in Brief*, 39, 107669. https://doi.org/10.1016/j.dib.2021.107669.

Kazemzadeh, A., Ein-Mozaffari, F., Lohi, A. & Pakzad, L. (2017). Intensification of mixing of shear-thinning fluids possessing yield stress with the coaxial mixers composed of two different central impellers and an anchor. *Chemical Engineering and Processing: Process Intensification*, 111, 101—114. https://doi.org/10.1016/j.cep.2016.10.019.

Krasnolutskyi, P. P. (2023). Justification of the design and technological parameters of the methane tank stirrer. *International Science Journal of Engineering & Agriculture*, 2(3), 26—37. https://doi.org/10.46299/j.isjea.20230203.04.

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. https://li01.tci-thaijo.org/index.php/rmutsvrj/article/view/249003.

Mia, Md. Palas. (2025). Computational and experimental study on the mixing performance of different impellers in stirred vessel. https://doi.org/10.13140/RG.2.2.23093.18406.

Ohmura, N., Masuda, H. & Wang, S. (2018). Intensification of Mixing Processes with Complex Fluids. *Journal of Chemical Engineering of Japan*, 51(2), 129—135. https://doi.org/10.1252/jcej.17we149.

Ramsay, J., Simmons, M., Ingram, A. & Stitt, E. (2016). Mixing Of Newtonian and Viscoelastic Fluids Using "Butterfly" Impellers. *Chemical Engineering Science*, 139, 125—141. https://doi.org/10.1016/j.ces.2015.09.026.

Rivera, C., Heniche, M., Takenaka, K. & Tanguy, P. (2009). Finite element modelling of the laminar and transition flow of the superblend dual shaft coaxial mixer on parallel computers. *Chemical Engineering Science*, 64(21), 4442—4456. https://doi.org/10.1016/j.ces.2009.07.022.

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*, 42(3), 1081—1092. https://doi.org/10.18280/ijht.420335.

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.

Wang, L., Zhou, Y. & Chen, Z. (2020). Investigation of Heat Transfer Efficiency of Improved Intermig Impellers in a Stirred Tank Equipped with Vertical Tubes. *International Journal of Chemical Reactor Engineering*, 18(3), 20190196. https://doi.org/10.1515/ijcre-2019-0196.

Xie, L., Wang, Q., Luo, X. & Zheng-hong, L. (2019). CFD simulation of the particle dispersion behavior and mass transfer-reaction kinetics in non-newton fluid with high viscosity. *International Journal of Chemical Reactor Engineering*, 17(7), 20180293. https://doi.org/10.1515/ijcre-2018-0293.

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.

Yin, D., Kar, K. & Piras, L. (2014). An impeller-draft tube agitation system for gas-liquid mixing in a stirred-tank reactor. *AIChE Annual Meeting*. https://www.researchgate.net/publication/267346937_An_Impeller-Draft_Tube_Agitation_System_for_Gas-Liquid_Mixing_in_a_Stirred-Tank_Reactor.

Zhang, J., Li, X., He, R. & Jian, L. (2015). Study on double-shaft mixing paddle undergoing planetary motion in the laminar flow mixing system. *Advances in Mechanical Engineering*, 7(7), 1687814015592603. https://doi.org/10.1177/1687814015592603.

Zhou, S., Yang, Q., Lu, L., Xia, D., Zhang, W. & Yan, H. (2022). CFD analysis of sine baffles on flow mixing and power consumption in stirred tank. *Applied Sciences*, 12(11), 5743. https://doi.org/10.3390/app12115743.