

DOI <https://doi.org/10.32782/2078-0877-2025-25-2-25>

УДК 637.134

К. О. Самойчук¹, докт. техн. наук

ORCID: 0000-0002-3423-3510

Є. Р. Прісс¹, аспірант

ORCID: 0009-0000-4376-0198

¹ *Таврійський державний агротехнологічний університет імені Дмитра Моторного*

e-mail: kyrylo.samoichuk@tsatu.edu.ua

АНАЛІЗ КОНСТРУКЦІЙ РОТОРНИХ ДИСПЕРГАТОРІВ ДЛЯ СТВОРЕННЯ ГОМОГЕННИХ БІЛКОВИХ СТРУКТУР

Анотація. У галузевому машинобудуванні одними з важливих напрямів є розроблення та впровадження обладнання технологічних ліній виробництва кисломолочної продукції. Операція надання гомогенної структури після ферментації кисломолочних продуктів є ключовим процесом у виробництві перемішаного або питного кисломолочного продукту, такого, наприклад, як перемішаний або питний йогурт. Типові конструкції для здійснення такої операції є неефективними: мають низьку продуктивність та високі енерговитрати. Із метою підвищення енергоефективності та якості процесів виготовлення кисломолочних продуктів необхідно розробити ефективну конструкцію роторного диспергатора, який буде відповідати сучасним умовам концентратного виробництва, тобто за невеликих габаритів, маси, вартості та простоти обслуговування будуть мати низькі енерговитрати, високу продуктивність, універсальність та високу якість обробки.

Ключові слова: білкові структури, кисломолочні продукти, денатурація білків, диспергатор, роторно-пульсаційний апарат.

Постановка проблеми. У сучасній харчовій технології зростає інтерес до модифікації білкових структур задля покращення функціональних властивостей харчових систем. Однією з перспективних технологічних операцій є створення гомогенних білкових структур (білкових молекул) – контрольоване розтягування та деформація білків на молекулярному рівні. Цей підхід набув актуальності у виробництві кисломолочної продукції, де він застосовується для покращення текстурних, реологічних та органолептичних характеристик кінцевого продукту [1].

Операція надання гомогенної структури після ферментації кисломолочних продуктів є ключовим процесом у виробництві перемішаного або питного кисломолочного продукту, такого, наприклад, як перемішаний або питний йогурт. Ця операція зазвичай виконується за допомогою фільтрів чи клапанних (щілинних) пристроїв, які створюють інтенсивні механічні зусилля у вигляді зсувного, турбулентного та вібраційного навантаження [2]. Такі умови сприяють розгортанню нативної конформації білкових молекул, зокрема казеїнів та сироваткових білків, і дають змогу перетворювати їх на більш лінійні або орієнтовані структури. У результаті формується щільніша та стабільніша гелева матриця, що позитивно впливає на консистенцію, стабільність та вологозв'язувальну здатність кисломолочних продуктів

Тема даної роботи відноситься до способу виробництва перемішаного або питного кисломолочного продукту або свіжого сиру, що включає після стадії ферментації стадію розкладження білкових молекул. Цей етап виконується роторним диспергатором, що включає кільцеподібний ротор та кільцеподібний статор [3].

Сьогодні відомо багато різних конструкцій роторних диспергаторів-гомогенізаторів, які відрізняються робочими органами, наявністю чи відсутністю насосного ефекту, ступенем кавітаційних ефектів і т. д. Але не всі вони придатні для створення гомогенних білкових структур кисломолочних продуктів.

Аналіз останніх досліджень. Фізико-хімічна суть впливу на білкові структури полягає у частковому руйнуванні слабких міжмолекулярних взаємодій (водневих зв'язків, гідрофобних іонних взаємодій) за збереження ковалентного скелета поліпептиду [4]. Це дає змогу уникати повної денатурації білка, забезпечуючи високу функціональну активність після механічної обробки. Дослідження свідчать, що застосування роторно-пульсаційних апаратів для стретчингу білків сприяє підвищенню в'язкості на 20–35%, поліпшенню стабільності до сировиділення та формуванню більш однорідної текстури у йогуртах і кефірах (рис. 1) [5].

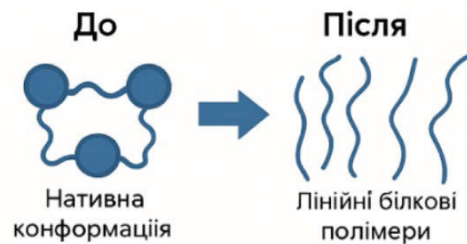


Рис. 1. Зміна білкових структур після обробки

Важливо відзначити, що технологія обробки білкових молекул дає змогу модифікувати властивості продукту без додавання стабілізаторів чи загусників, що відповідає сучасним вимогам до «чистої етикетки». Перспективи застосування цієї технології охоплюють також розроблення білкових основ для десертів, дієтичних продуктів та високобілкових напоїв.

Таким чином, обробка білків у роторно-пульсаційних апаратах є інноваційним і ефективним методом модифікації білкових структур, що відкриває нові можливості для підвищення якості кисломолочної продукції та розширення асортименту функціональних харчових виробів [6].

Найбільш розповсюдженим способом для операції перемішування після ферментації є безперервне перемішування ферментованої маси резервуарі під час операції передачі в охолоджувач [7]. Однак стандартне перемішування в ємності призводить до великої втрати в'язкості. Другий спосіб, а саме використання статичного фільтра, був найкращою альтернативою для підвищення гомогенності продукту, але розроблення нових інгредієнтів, деякі інновації у тектурі, складність існуючих ліній для більшого змішування різних продуктів та зміна цільової в'язкості вимагають нової, більш гнучкої системи для цієї операції [8]. З іншого боку, виробництво йогурту з перемішуванням із використанням статичного фільтра неможливе без заміни фільтра в процесі виробництва через утворення пробок [9].

Отже, найбільш ефективними пристроями для операцій впливу на білкові структури є роторні машини та апарати. Але широке розмаїття таких конструкцій ускладнює їх вибір для застосування у промисловому виробництві [10].

Формулювання мети дослідження. Основною метою статті є виконати аналіз існуючих конструкцій роторних машин і апаратів, які здатні найбільш ефективно виконувати операцію створення гомогенних білкових структур у технологічних лініях виробництва кисломолочних продуктів.

Основна частина. За останні 25–35 років запропоновано десятки патентних документів, спрямованих на вдосконалення конструкції роторних (роторно-пульсаційних) пристроїв (РП), причому не завжди наведені зміни призводять до підвищення ефективності процесу [11]. Проаналізуємо типові конструктивні рішення РП, які дають змогу підвищити ступінь диспергування та (або) зменшити питомі енерговитрати цього процесу [12].

Використовувати кінетичну енергію струменів, що вириваються з отворів 3 статори 2, на збудження вторинної (гідродинамічної) кавітації дає змогу розташування в робочій камері 1

роторного апарату [13] стрижнів 4 (рис. 2а). Вони турбулізують потік рідини, що разом із кавітацією інтенсифікує процеси диспергування.

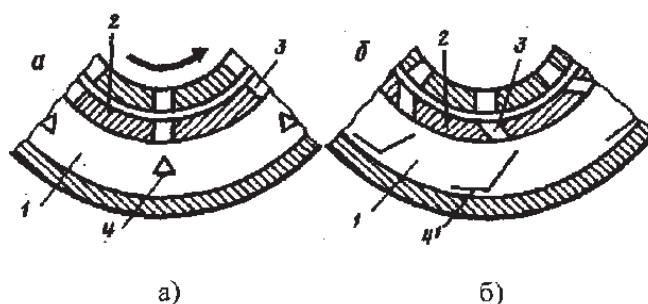


Рис. 2. Схеми розташування у робочій камері додаткових турбулізуючих елементів:
а) стрижнів; б) пружних елементів

Також у робочій камері 1 рекомендується розміщувати пружинні елементи 4, установлені навпроти вихідних отворів каналів 3 статора 2 під кутом, близьким до 90° по відношенню до витікаючого струменя (рис. 2б).

Функції пружинних елементів полягають у такому. Витікаючий струмінь ударяється у пружинний елемент. При цьому потік рідини, взаємодіючи з відбитим струменем, створює у робочій камері додаткові вихрі, сприяючи тим самим кращому перемішуванню і диспергуванню компонентів середовища. Пружинний елемент, прагнучи зайняти початкове положення, створює у рідині механічні коливання, що додатково дроблять краплі оброблюваного продукту. Із метою інтенсифікації процесів емульгування був розроблений роторний апарат, у якому як додаткове джерело коливань використовували пластину, розміщену в каналі статора [14] (рис. 3).

Переваги такого розташування пластини полягають у тому, що все оброблюване середовище проходить через канали статора і піддається дії коливань, генерованих пружною пластиною, у невеликому обсязі, що призводить до збільшення щільності акустичної енергії. Для роботи цієї конструкції у резонансному режимі необхідно варіювання геометричними і режимними параметрами.

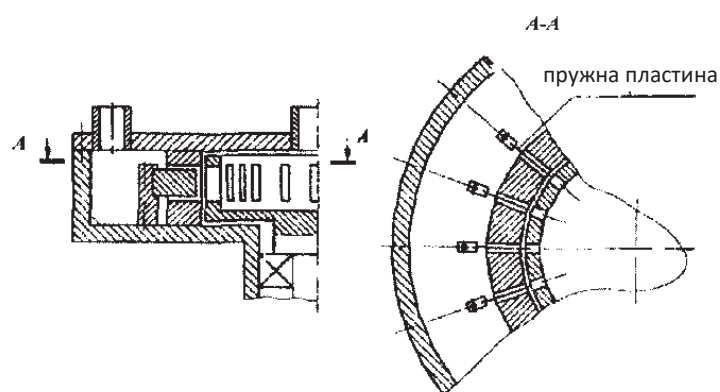


Рис. 3. Апарат із пружними пластинами

Одним зі способів підвищення диспергуючої здатності роторного апарату є модифікація порожнини ротора, наприклад виконання на внутрішній торцевій його поверхні голчастих елементів [14]. Оброблюване середовище, що подається за допомогою насоса

в порожнину 2 ротора, що обертається, 1, розбиваючись об вістря голок 3, піддається при цьому інтенсивнішому перемішуванню і диспергуванню (рис. 4). Іншою модифікацією порожнини ротора є виконання його внутрішньої поверхні зубчастої – у вигляді клиновидних лопаток [15].

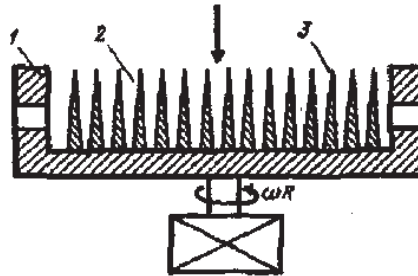


Рис. 4. Голчаті елементи на внутрішній торцевій поверхні ротора

Для зниження тривалості «холостого ходу» в РПА (за перекриття наскрізних каналів статора проміжками між отворами ротора) пропонується збільшити кількість рядів каналів ротора і статора [12]. Необхідно, щоб ряди каналів у роторі були зміщені один відносно одного. На думку авторів, це призводить до збільшення частоти генерованих пульсацій і до оптимального розподілу акустичного навантаження на оброблювану рідину в часі. На цьому припущенні розроблений високочастотний багаторядний апарат працює так (рис. 5). Рідка суміш подається під тиском у порожнину ротора, що обертається, 4, який знаходиться в корпусі 1. Далі по каналах 6 через проміжок 3 потік поступає в канал 7 статора 5 і спрямовується в робочу камеру 2. У результаті частота генерації імпульсів тиску в розглянутій конструкції значно вища, ніж у типовій.

Автори [15] пропонують у корпусі 1 розташовувати статор 5 усередині ротора 4 (рис. 6). Оброблювана рідина подається через вхідний патрубок 2 у робочу камеру і виводиться через вихідний патрубок 3 із внутрішньої порожнини статора. Принцип роботи апарату той самий – періодичний збіг каналів ротора 6 з каналами статора 7.

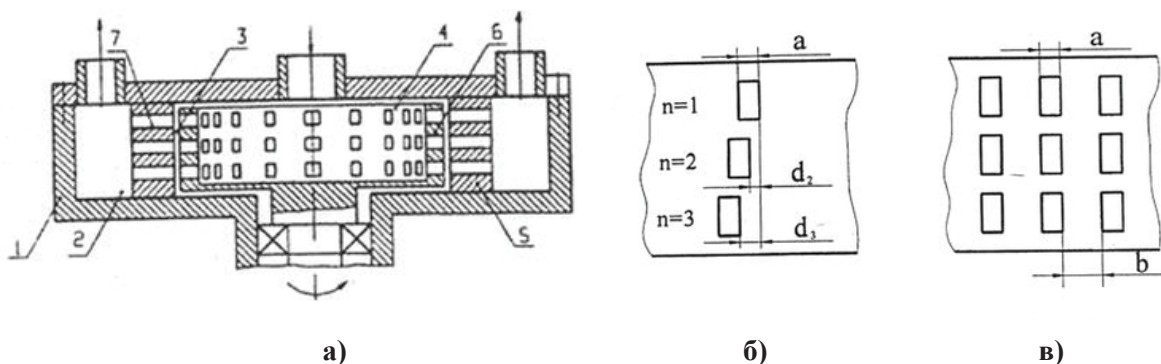
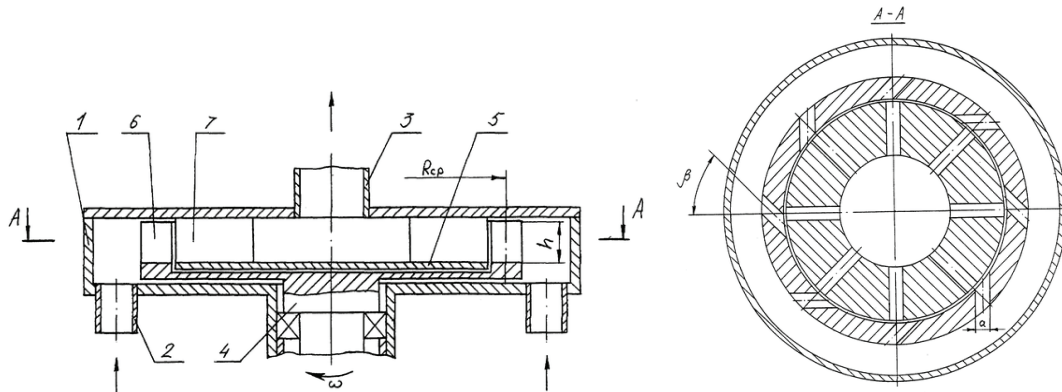


Рис. 5. Високочастотний багаторядний роторний імпульсний апарат кавітації: а) подовжній розріз; б) розгортка бічної поверхні ротора; в) розгортка бічної поверхні статора

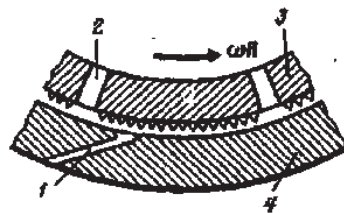
Оскільки канали статора спрямовані один назустріч одному (їх число має бути парним) і розташовані під кутом, у його порожнині в малому обсязі відбувається концентрація акустичних коливань, що сприяє інтенсифікації хіміко-технологічних процесів. Окрім того, в апараті можливе виникнення явища стоячої хвилі.

**Рис. 6. Апарат із внутрішнім статором**

Роторно-пульсаційний акустичний апарат для збільшення потужності акустичного випромінювання пропонують автори [16]. Він містить виконані на диску ротора пази, кількість яких рівна або кратна кількості пружних лопаток, що сполучають ротор із матчиною. Це призводить до того, що в місцях з'єднання ротора з матчиною жорсткість диска зменшиться, а амплітуда його коливань за дії пульсуючих тисків і швидкості потоку оброблюваної рідини збільшиться. Додаткові коливання, що виникають, інтенсифікують процеси диспергування емульсії.

Для збільшення ефективності технологічних процесів у РПА ротор і статор виконують з отворами або прорізами різних форм: прямокутні, квадратні, круглі, трикутні. Для збільшення міри турбулізації і пульсаційної швидкості потоку автори [16] пропонують таке:

1) Виконувати канали ротора 3 і статора 4 із поперечним перерізом Г-подібної форми і на зовнішню поверхню ротора нанести насічки (рис. 7). У процесі проходження оброблюваного середовища через канали статора 1 та ротора 2 такої форми за їх поєднання різко змінюються площа прохідного перерізу, швидкість течії рідини і амплітуда генерованих коливань і пульсацій, що, зрештою, сприяє розвитку турбулентного режиму роботи роторного апарату.

**Рис. 7. Г-подібні канали ротора з насічками**

2) Виконати нарізки на стінках каналів ротора і статора в протилежних напрямках [17]. Під час попадання в канал ротора оброблюване середовище закручується по спіралі, потім (за поєднання каналів) вона потрапляє у канал статора і закручується в протилежному напрямку. У результаті цього відбувається додаткова турбулентна обробка перемішуваних компонентів суміші, що диспергується.

3) Виконати кожний отвір статора у вигляді конфузора, а отвір ротора – у вигляді каналу, вісь якого паралельна одній зі сторін конфузора [17] (рис. 8).

Оскільки в процесі обертання ротора 3 його канал 4 паралельний до найближчої сторони каналу 2 статора 1, то середовище, що рухається в робочу камеру, відчуває відносно малий гідравлічний опір. Оскільки оброблювана рідина, що знаходиться в каналах ротора, бере

участь одночасно і в радіальному, і в окружному русі, то вектор її повної швидкості не перпендикулярний дотичній до циліндричної поверхні. Тому виконання каналу ротора, за якого його вісь співпадає з напрямком вектору повної швидкості середовища, є оптимальним. Таким чином, на початковій стадії проходження через канали рідина розганяється до значної швидкості. Потім потік натрапляє на не паралельний осі каналу ротора бік конфузторного каналу 2, у зв'язку з чим швидкість його течії падає і збільшується міра турбулізації.

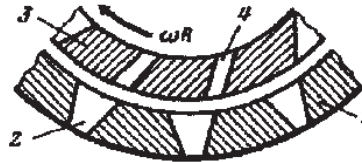


Рис. 8. Канали статора у вигляді конфузора

4) В апараті з конфузтор-дифузторними каналами ротора 3 і статора 4 рекомендують з'єднати вхід і вихід кожного з них пружними мембранами 5 (рис. 9).

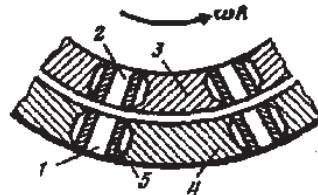


Рис. 9. Канали ротора та статора з пружними мембранами

На основі вище розглянутих конструктивних і технологічних особливостей апаратів можна зробити такі висновки:

- практично всі конструктивні елементи проєктуються для підвищення амплітуди пульсацій тиску, зсувних напруг, розвитку турбулентності і кавітації;
- в існуючих конструкціях резонаторів у вигляді голок, мембран та інших пружних елементів неможливо створювати режими, де б частота вібрацій і пульсацій регулювалася незалежно від частоти обертання ротора; такі можливості присутні тільки у останніх двох конструкціях; відзначено, що частота вібрації ротора повинна бути кратна частоті перекриття отворів;
- не проведені дослідження якості диспергування та ґрунтовні теоретичні дослідження пристроїв зі збудниками механічних коливань.

Ефективним методом підвищення ефективності роторний-пульсаційних апаратів є накладення механічних коливань на оброблюване середовище для виникнення резонансних явищ. Співставлення двох способів введення енергії в рідину: у роторному-пульсаційному апараті і за накладання механічних коливань показує, що дисипація буде відбуватися в усьому обсязі з однаковою інтенсивністю. При цьому вдасться усунути застійні зони з низьким градієнтом швидкості, значно підвищити швидкість ковзання жирової кульки та позбавитися недоліків у дисперсному складі оброблюваного продукту.

Таким чином, найбільший потенціал для використання в технологічних схемах виробництва кисломолочної продукції конструкції роторних апаратів мають роторні апарати з вібруючим ротором. Вони мають широкий діапазон регулювань та впливу на білкові структури, низькі енерговитрати завдяки рівномірній дисипації енергії по обсягу середовища, що обробляється, та високу продуктивність.

Висновки. Проведено аналіз застосування потенційно найбільш ефективних конструкцій роторних машин і апаратів, придатних для обробки білкових структур кисломолочних продуктів. З'ясовано, що переважна більшість конструкцій має суттєві недоліки, зокрема неможливість окремого регулювання частоти вторинних (накладених) пульсацій та вібрацій, завдяки чому суттєво знижуються інтенсивність резонансних явищ та інтенсивність обробки.

Найбільший потенціал для використання в технологічних схемах виробництва кисломолочної продукції конструкції роторних апаратів мають роторні апарати з вібруючим ротором. Вони мають широкий діапазон регулювань та впливу на білкові структури, низькі енерговитрати завдяки рівномірній дисипації енергії по обсягу середовища, що обробляється, та високу продуктивність.

Список використаних джерел

1. M. Rayner P. Dejmek Engineering Aspects of Emulsification and Homogenization in the Food Industry; CRC Press, Taylor & Francis Group 322. 2015. ISBN 9781466580435 doi: 10.1201/b18436.
2. Håkansson, A., Fuchs, L., Innings, F., Revstedt, J., Trägårdh, C., Bergenståhl, B. Velocity measurements of turbulent two-phase flow in a high-pressure homogenizer model. *Chem. Eng. Commun.* 2013, 200, 93–114. <https://doi.org/10.1080/00986445.2012.691921>
3. Dhankhar P. Homogenization fundamentals. *IOSR J. Eng.* 2014, 4, 1–8. <https://doi.org/10.9790/3021-04540108>
4. Huppertz T. Homogenization of Milk Other Types of Homogenizer (High-Speed Mixing, Ultrasonics, Microfluidizers, Membrane Emulsification). In *Encyclopedia of Dairy Sciences*, 2nd ed.; Academic Press: Cambridge, MA, USA, 2011, 761–764. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-374407-4.00226-0>
5. Samoichuk K., Yalpachyk V., Kholobtseva I., Dmytrevskyi D., Chervonyi V. Design Improvement of the Rotary-Pulsation Device by Resonance Phenomena. In: Ivanov, V., Pavlenko, I., Edl, M., Machado, J., Xu, J. (eds) *Advances in Design, Simulation and Manufacturing VII. DSMIE 2024. Lecture Notes in Mechanical Engineering*. Springer, Cham. 2024. pp 74–83.
6. Yong, A., Islam, M., Hasan, N. The Effect of pH and High-Pressure Homogenization on Droplet Size. *Sigma J. Eng. Nat. Sci.* 2017, 35, 1–22. <https://doi.org/10.26776/IJEMM.02.04.2017.05>
7. Valencia-Flores D., Hernández-Herrero M., Guamis B., Ferragut V. Comparing the Effects of Ultra-High-Pressure Homogenization and Conventional Thermal Treatments on the Microbiological, Phys, and Chem Quality of Almond Beverages. *J. Food Sci.* 2013, 78, 199–205. <https://doi.org/10.1111/1750.3841.12029>
8. Дейниченко Г.В., Самойчук К.О., Івженко А.О., Левченко Л.В. Аналіз конструкцій гомогенізаторів молочної промисловості. *Праці Таврійського державного агротехнологічного університету*. 2016. Вип. 16. Т. 1. С. 9–15.
9. Основи розрахунку та конструювання обладнання переробних і харчових виробництв : підручник / К.О. Самойчук та ін. Київ : Проф. книга, 2020. 428 с.
10. Wang X. Wang Y., Li F., Li L., Ge X., Zhang S., Qiu T. Scale-up of microreactor: Effects of hydrodynamic diameter on liquid–liquid flow and mass transfer. *Chem. Eng. Sci.* 226, 115838 (2020) doi: 10.1016/j.ces.2020.115838
11. J. Morales A. Watts J. McConville, Mechanical particle-size reduction techniques. *AAPS Adv. Pharm. Sci.* 22, 2016. 165–213. doi: 10.1007/978-3-319-42609-9_4
12. Технологічне обладнання для переробки продукції тваринництва: лабораторний практикум / В.Ф. Ялпачик та ін. Мелітополь : Видавничий будинок Мелітопольської міської друкарні, 2017. 274.
13. Acharyaa S., Mishrab V.; Patelc J. Enhancing the mixing process of two miscible fluids: A review. *AIP Conference Proceedings* 2021, 2341, 030025 <https://doi.org/10.1063/5.0051818>
14. Ciron C. Gee V. Kelly A. Auty M.. Comparison of the effects of high-pressure microfluidization and conventional homogenization of milk on particle size, water retention and texture of non-fat and low-fat yoghurts. *Int. Dairy J.* 2010, 20, 314–320. <https://doi.org/10.1016/j.idairyj.2009.11.018>
15. Wang X., Wang Y., Li F., Li, L., Ge X., Zhang S., Qiu, T. Scale-up of microreactor: Effects of hydrodynamic diameter on liquid–liquid flow and mass transfer. *Chem. Eng. Sci.* 2020, 226, 115838. <https://doi.org/10.1016/j.ces.2020.115838>



16. Liao Y., Lucas D.A. Literature review of theoretical models for drop and bubble breakup in turbulent dispersions. *Chem. Eng. Sci.* 64. 2009. 3389–3406 doi: 10.1016/J.CES.2009.04.026

17. Postelmans A., Aernouts B., Jordens J., Van Gerven T., Saeys W. Milk homogenization monitoring: Fat globule size estimation from scattering spectra of milk. *Innov. Food Sci. Emerg. Technol.* 60, 102311, 2020. doi: 10.1016/j.ifset.2020.102311

Стаття надійшла до редакції 08.05.2025

K. Samoichuk¹, Y. Priss¹

¹ *Dmytro Motornyi Tavria State Agrotechnological University*

ANALYSIS OF ROTARY DISPERSOR DESIGNS FOR CREATING HOMOGENEOUS PROTEIN STRUCTURES

Summary

In the industrial engineering industry, one of the important directions is the development and implementation of equipment for technological lines for the production of fermented milk products. After all, this branch of milk processing and dairy production is strategic for ensuring the food security of Ukraine. The operation of providing a homogeneous structure after fermentation of fermented milk products is a key process in the production of a mixed or drinking fermented milk product, such as mixed or drinking yogurt. This operation is usually performed using filters or valve (slot) devices. However, such designs are inefficient: they have low productivity and high energy consumption. In order to increase the energy efficiency and quality of the processes for the production of fermented milk products, it is necessary to develop an effective design of a rotary disperser that will meet modern conditions of competitive production, that is, with small dimensions, weight, cost and ease of maintenance, they will have low energy consumption, high productivity, versatility (a wide range of adjustments for processing various fermented milk products) and high processing quality.

An effective method of increasing the efficiency of rotary-pulsation devices is the imposition of mechanical vibrations on the processed medium to cause resonance phenomena. A comparison of two methods of introducing energy into the liquid: in a rotary-pulsation device and when imposing mechanical vibrations shows that dissipation will occur throughout the volume with the same intensity. In this case, it will be possible to eliminate stagnant zones with a low velocity gradient, significantly increase the sliding speed of the fat globule and get rid of shortcomings in the dispersed composition of the processed product.

Thus, the greatest potential for use in technological schemes for the production of fermented milk products is the design of rotary devices with a vibrating rotor. They have a wide range of adjustments and influence on protein structures, low energy consumption due to uniform dissipation of energy over the volume of the processed medium and high productivity.

Keywords: protein structures, fermented milk products, protein denaturation, disperser, rotary-pulsation machine.