

DOI <https://doi.org/10.32782/1994-4691-2025-1-75-10>

УДК 631.234:635.64+578

ДОСЛІДЖЕННЯ ВПЛИВУ ГРАДІЄНТУ ШВИДКОСТІ ПОТОКУ ЕМУЛЬСІЇ НА ЯКІСТЬ ДИСПЕРГУВАННЯ МОЛОКА В ІМПУЛЬСНОМУ ГОМОГЕНІЗАТОРІ

STUDY OF THE INFLUENCE OF EMULSION FLOW VELOCITY GRADIENT ON THE QUALITY OF MILK DISPERSION IN A PULSATION HOMOGENIZER

Н. О. Паляничка^{1*}, канд. техн. наук, доцент
К. О. Самойчук¹, д-р техн. наук, професор
В. Ф. Ялпачик¹, д-р техн. наук, професор
О. О. Ковальов¹, канд. техн. наук, ст. викладач
О. О. Червоткіна¹, асистент

ORCID: 0000-0001-8510-7146
ORCID: 0000-0002-3423-3510
ORCID: 0000-0002-0349-2448
ORCID: 0000-0002-4974-5201
ORCID: 0000-0002-6814-0566

¹ Таврійський державний агротехнологічний університет імені Дмитра Моторного

*e-mail: nadiia.palianychka@tsatu.edu.ua

Анотація. У статті розглянуто результати дослідження впливу градієнта швидкості потоку на ступінь диспергування молочної емульсії в імпульсному гомогенізаторі. Було проведено аналіз основних чинників, що визначають ефективність гомогенізації, і виявлено, що одним із ключових параметрів є градієнт швидкості потоку. Його значення обчислювали методом комп'ютерного моделювання з використанням програмного комплексу кінцево-елементного аналізу Ansys Workbench. Дослідження показали, що найвищий градієнт швидкості виникає на виході з другого поршня-ударника імпульсного гомогенізатора, досягаючи 2,2–5 м/с, що забезпечує необхідний рівень диспергування молочної емульсії. Таким чином, імпульсні гомогенізатори можуть ефективно застосовуватися в технологічних процесах виробництва питного молока.

Ключові слова: гомогенізація, градієнт швидкості потоку, Ansys Workbench, робоча камера, молоко.

Постановка проблеми.

Гомогенізація є одним із ключових технологічних процесів у молочній промисловості. Разом із розвитком технологій до компонентів, що підлягають гомогенізації, висуваються більш жорсткі вимоги щодо дисперсності кінцевого продукту. Основною технічною складністю при отриманні тонкодисперсних емульсій залишається обмеженість можливостей сучасних гомогенізаторів. Найпоширенішим типом обладнання, що застосовується на сучасних підприємствах, є клапанні гомогенізатори [1]. Вони забезпечують високу якість диспергування емульсій, проте характеризуються значними енергетичними витратами на процес, які перевищують 7 кВт/т. Тому розробка нових пристроїв і методів отримання тонкодисперсних емульсій із можливістю регулювання дисперсності та забезпеченням високої продуктивності є надзвичайно актуальною [2].

Аналіз останніх досліджень.

Дослідження механізмів подрібнення часток представлені в обмеженій кількості робіт, хоча у численних дослідженнях конкретних гомогенізаторів детально описується їх робота та принцип дії, що часто тлумачать як механізми подрібнення [3, 4]. Основні публікації, присвячені процесу гомогенізації, зосереджені на обґрунтуванні факторів,

які характеризують подрібнення в клапанних гомогенізаторах [5, 6]. Разом із тим аналіз даних показав, що такі гомогенізатори мають суттєві недоліки, зокрема великі габарити та масу, високу металосміність і значні енерговитрати. Інші типи гомогенізаторів не забезпечують потрібного ступеня дисперсності жирової фази. Було встановлено, що високий рівень гомогенізації молока можна досягти в імпульсному гомогенізаторі за умови створення градієнта швидкості потоку, що сприяє подрібненню жирових кульок [7].

Методологія дослідження.

Метою цієї роботи є визначення градієнта швидкості потоку молока під час імпульсної гомогенізації з використанням комп'ютерного моделювання на базі універсальної системи кінцево-елементного аналізу Ansys Workbench.

Руйнування жирових кульок в імпульсному гомогенізаторі відбувається завдяки градієнту швидкості. Оскільки точний розрахунок цього параметру є складним, було прийнято рішення визначити швидкість потоку молока та тиск, що виникає під час імпульсної гомогенізації, за допомогою комп'ютерного моделювання із застосуванням універсальної системи кінцево-елементного аналізу Ansys Workbench [9]. Програмне забезпечення включає модуль CFX, який дозволяє ефективно та надійно виконувати розрахунки, пов'язані з динамікою рідин і газів.

У імпульсному гомогенізаторі швидкість потоку молока насамперед визначається амплітудою та частотою коливань поршня-ударника. Лише встановлення залежності швидкості від параметрів імпульсного гомогенізатора дозволяє оцінити ефективність процесу гомогенізації.

Маючи достатнє уявлення про конструкцію робочої камери та попередньо розраховані геометричні параметри гомогенізатора, за допомогою тривимірної системи автоматизації проєктних робіт SolidWorks була створена робоча модель камери імпульсного гомогенізатора (рис. 1).

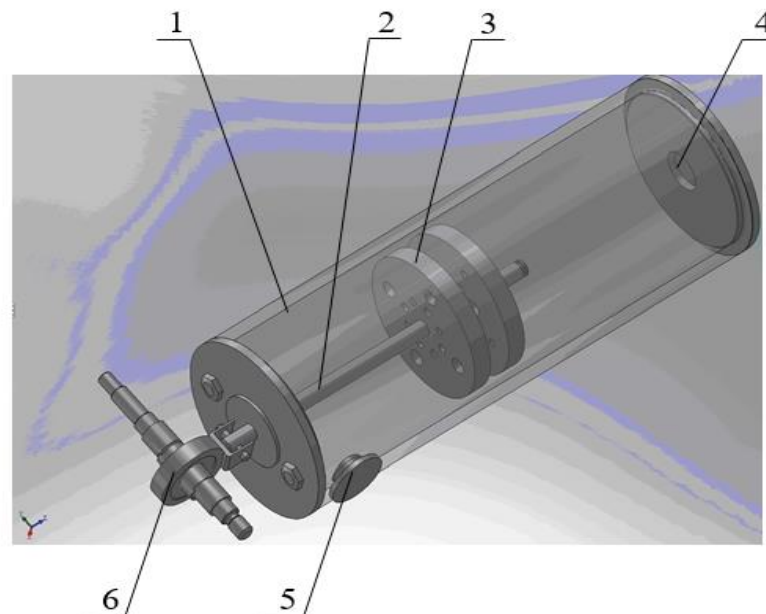


Рис. 1. Модель робочої камери імпульсного гомогенізатора, створена в SolidWorks:
 1 – циліндр; 2 – шток; 3 – поршні-ударники; 4 – підвідний патрубок; 5 – відвідний патрубок; 6 – кривошипний механізм

Після цього модель була безпосередньо інтегрована в модуль CFX на платформі Ansys Workbench. Для підвищення точності розрахунків динаміки рідин і газів застосовували останню версію системи генерації сітки Ansys Meshing.

На початковому етапі вирішення поставленої задачі для зручності розрахунку

область було розділено на дві частини: зону проходження молока через отвори поршня-ударника та зону руху молока в зазорі між поршнем-ударником і циліндром.

На першому етапі розрахунків було виконано стаціонарне моделювання методом фіксованого ротора (Frozen rotor). Це дозволило здійснити попередню оцінку розподілу тиску та швидкостей у робочому циліндрі. Крім того, результати показали, що оптимальною є частота коливання поршня-ударника 55 Гц. При меншій амплітуді швидкість потоку молока виявляється занадто низькою, що робить процес гомогенізації неефективним. Зі збільшенням частоти коливання швидкість потоку зростає лише незначно, тоді як потужність системи підвищується суттєво – приблизно у 1,5 раза. Тому для подальших розрахунків було прийнято використання частоти коливання поршня-ударника 55 Гц.

Для моделювання нестационарного потоку молока розглядався амплітудний діапазон 12 мм, який було розділено на 6 кроків. У результаті нев'язка для більшості рівнянь не перевищувала 10^{-5} , що забезпечує достатню точність для оцінки динаміки течії [9].

У імпульсному гомогенізаторі подрібнення жирових кульок здійснюється за рахунок формування градієнта швидкості потоку молока. Отже, для оцінки ступеня гомогенізації спочатку необхідно визначити величину цього градієнта під час процесу гомогенізації.

Результати дослідження.

Для вирішення цієї задачі спочатку проводили розрахунок швидкості потоку молока на виході з першого та другого поршнів-ударників, у проміжках між поршнями та поза ними, залежно від координати x вздовж робочої камери, за допомогою програмного комплексу Ansys Workbench [8, 9].

Лінії потоків, що відображають розподіл швидкості молока вздовж координати x у довжині робочої камери, наведені на рис. 2.

На основі отриманих даних побудовано графік (рис. 3), що показує залежність швидкості потоку молока від координати вздовж робочої камери при частоті коливання $f = 55$ Гц та амплітуді $h = 10$ мм.

Рівняння, що апроксимують залежність швидкості потоку молока на виході з першого (v_1) та другого (v_2) поршнів-ударників, у проміжку між поршнями (v_3) і поза поршнями (v_4) від координати вздовж довжини камери x , мають наступну форму:

$$v_1 = 0,0005x^5 - 0,0162x^4 + 0,1953x^3 - 1,0104x^2 + 2,2607x - 1,3023; \quad (1)$$

$$v_2 = 0,0002x^5 - 0,0059x^4 + 0,0818x^3 - 0,4905x^2 + 1,4537x - 0,49; \quad (2)$$

$$v_3 = 0,0006x^5 - 0,0175x^4 + 0,1711x^3 - 0,642x^2 + 0,9575x + 0,01; \quad (3)$$

$$v_4 = 0,0241x^2 + 0,0631x - 0,9732. \quad (4)$$

Продиференціювавши рівняння (1), (2), (3) та (4), отримуємо відповідні вирази для градієнтів швидкості потоку на виході з першого $\frac{dv_1}{dx}$ і другого $\frac{dv_2}{dx}$ поршнів-ударників,

у проміжку між поршнями $\frac{dv_3}{dx}$ та поза поршнями $\frac{dv_4}{dx}$:

$$\frac{dv_1}{dx} = 0,0025x^4 - 0,0648x^3 + 0,5859x^2 - 2,0208x + 2,2607; \quad (5)$$

$$\frac{dv_2}{dx} = 0,001x^4 - 0,0236x^3 + 0,245x^2 - 0,981x + 1,4537; \quad (6)$$

$$\frac{dv_3}{dx} = 0,003x^4 - 0,07x^3 + 0,5133x^2 - 1,2852x + 0,9575; \quad (7)$$

$$\frac{dv_4}{dx} = 0,0482x + 0,0631. \quad (8)$$

Графічне відображення залежностей (5), (6), (7) та (8) наведено на рис. 4 при частоті коливань $f = 55$ Гц та амплітуді $h = 10$ мм.

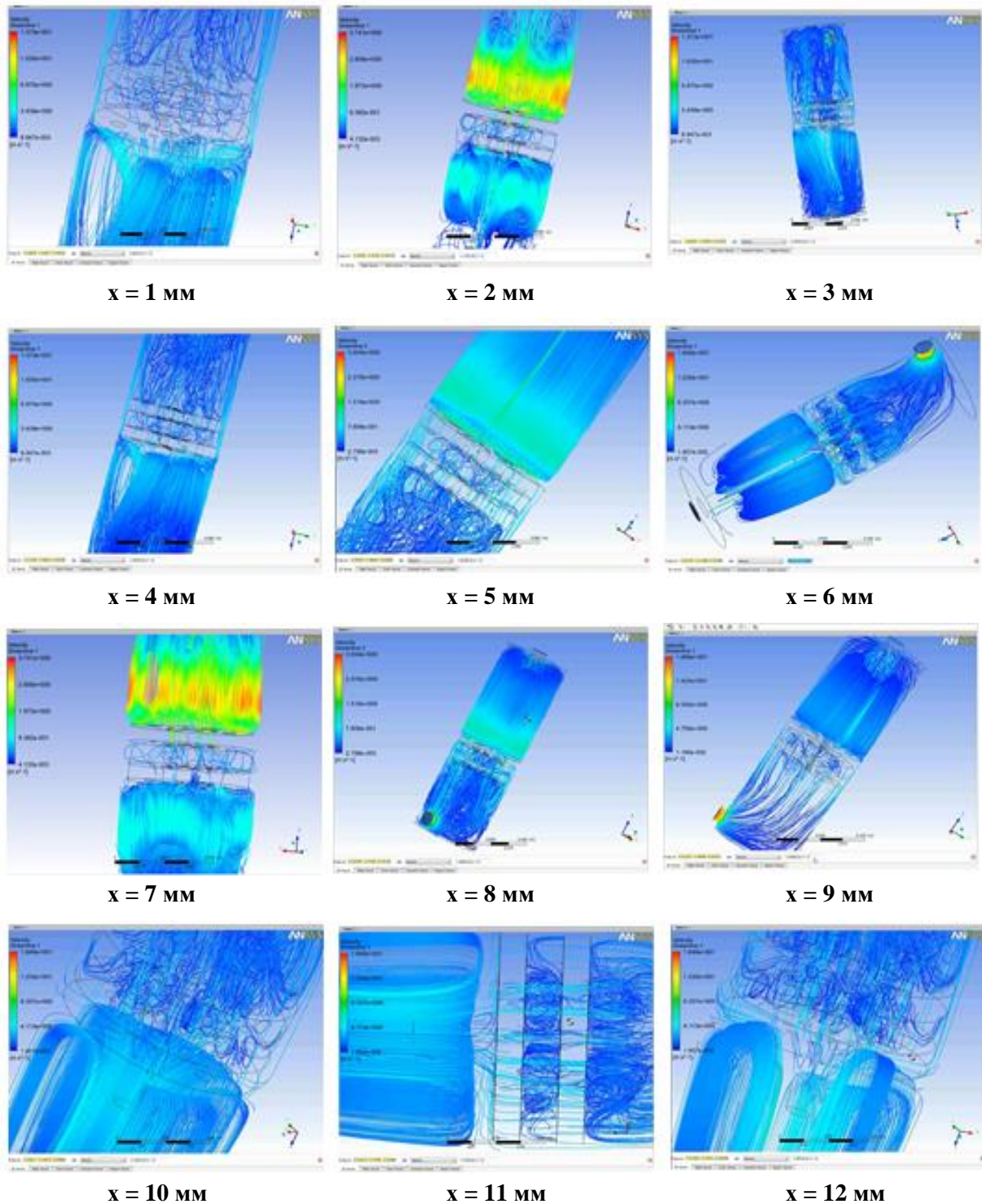


Рис. 2. Тривимірні графіки ліній потоків, що відображають розподіл швидкості молока на виході з другого поршня-ударника залежно від координати x уздовж робочої камери імпульсного гомогенізатора, побудовані в Ansys Workbench

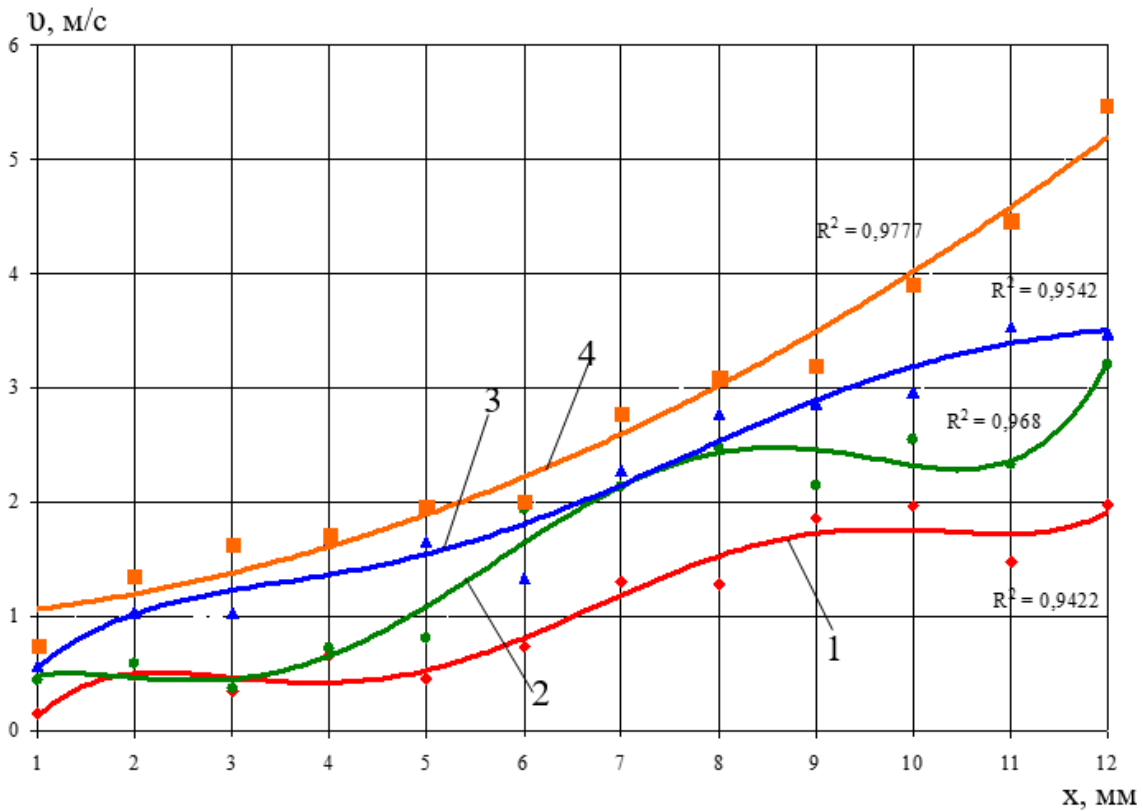


Рис. 3. Графік залежності швидкості потоку молока вздовж довжини робочої камери: 1 – на виході з першого поршня-ударника; 2 – у проміжку між поршнями; 3 – на виході з другого поршня; 4 – поза поршнями

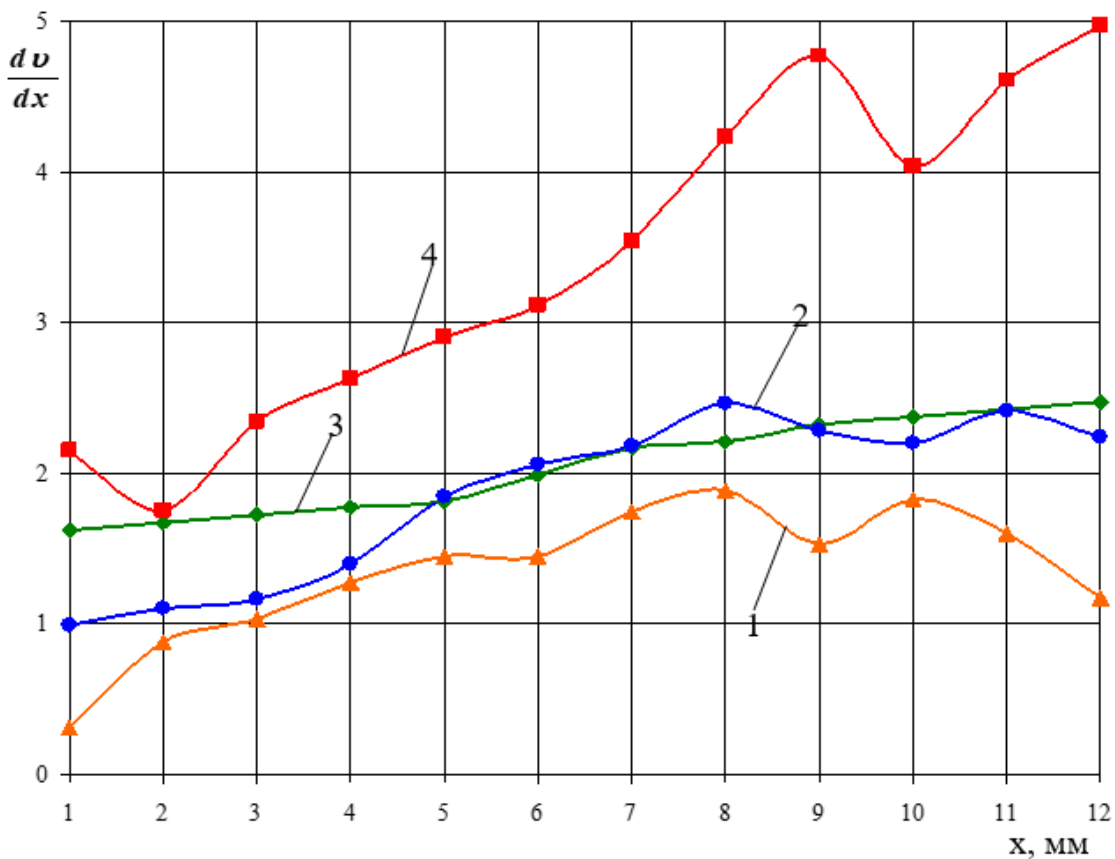


Рис. 4. Графік залежності градієнтів швидкості вздовж довжини робочої камери імпульсного гомогенізатора: 1 – на виході з першого поршня-ударника; 2 – у проміжку між поршнями; 3 – поза поршнями; 4 – на виході з другого поршня-ударника

Отже, з графіка видно, що максимальний градієнт швидкості (2,2–5 м/с) спостерігається на виході з конічних отворів другого поршня-ударника. Можна логічно припустити, що саме в цій зоні досягається найвищий ступінь гомогенізації.

Висновки.

Сучасною актуальною проблемою залишається дослідження технологічного обладнання для гомогенізації дрібнодисперсних емульсій з метою визначення найбільш ефективних апаратів, здатних забезпечити високу якість готової емульсії при мінімальних енерговитратах. Аналіз показав, що перспективним методом отримання продукту високої якості є імпульсна гомогенізація. Дослідження встановило, що ефективність гомогенізації в імпульсному гомогенізаторі безпосередньо визначається градієнтом швидкості потоку молочної емульсії, який формується у робочій камері апарата. Для розрахунку цього градієнта застосовували комп'ютерне моделювання у програмі Ansys Workbench. Розрахунки показали, що максимальний градієнт швидкості потоку молока (2,2–5 м/с) виникає на виході з конічних отворів другого поршня-ударника, що створює умови для найбільш якісної гомогенізації у порівнянні з існуючими гомогенізаторами. Отже, застосування імпульсного гомогенізатора є доцільним для диспергування молочної емульсії в технологічних лініях виробництва питного молока.

Список використаних джерел

1. Wilbey R. A. Homogenization of Milk: Principles and Mechanism of Homogenization, Effects and Assessment of Efficiency: Valve Homogenizers. *Encyclopedia of Dairy Sciences*, 2011. 750–754 <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-374407-4.00223-5>.
2. Паляничка Н.О. Використання енергоефективного обладнання для диспергування емульсій. *Праці ТДАТУ*, 2020. Вип. 20. Т. 1. С. 26–34.
3. Drankhar P. Homogenization fundamentals. *IOSR Journal of Engineering*, 2014. 4 (5). 1–8. URL: [www.iosrjen.org/Papers/vol4_issue5%20\(part-4\)/A04540108.pdf](http://www.iosrjen.org/Papers/vol4_issue5%20(part-4)/A04540108.pdf).
4. Liu C., Li M., Liang C., Wang W. Measurement and analysis of bimodal drop size distribution in a rotor-stator homogenizer. *Chemical Engineering Science*, 2013. 102. 622–631. <https://doi.org/10.1016/j.ces.2013.08.030>
5. Samoichuk, K., Kovalyov, A., Fuchadzhy, N., Bezalychna, O., Shevtsova, A. Energy Costs Reduction for Dispersion Using a Jet-Slot Type Milk Homogenizer. *Energies*, 2023. 16(5). 2211. <https://doi.org/10.3390/en16052211>
6. Дейниченко Г.В., Самойчук К.О., Івженко А.О., Левченко Л.В. Аналіз конструкцій гомогенізаторів молочної промисловості. *Праці ТДАТУ*, 2016. Вип.16. Т.1. С. 9–15.
7. Паляничка Н.О. Модель подрібнення жирової фази молока при імпульсній гомогенізації. *Праці ТДАТУ*, 2014. Вип. 14, Т.1. С. 24–29.
8. Dagar N., Sharma R., Rinawa L. M., Gupta S., Chaudhary V., Gupta P. Design and analysis of piston using aluminum alloy and composites in Solidworks and Ansys. *Materials Today: Proceedings*, 2022. 67 (5). 784–791. <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2022.07.318>.
9. Hokeš F., Kala J., Hušek M., Král P. Parameter Identification for a Multivariable Nonlinear Constitutive Model inside ANSYS Workbench. *Procedia Engineering*, 2016. 161. 892–897. <https://doi.org/10.1016/j.proeng.2016.08.743>.

Стаття надійшла до редакції 15.05.2025

Стаття прийнята 21.05.2025

Статтю опубліковано 20.06.2025



STUDY OF THE INFLUENCE OF EMULSION FLOW VELOCITY GRADIENT ON THE QUALITY OF MILK DISPERSION IN A PULSATION HOMOGENIZER

N. Palianychka, K. Samoichuk, V. Yalpachyk, A. Kovalov, O. Chervotkina
Dmytro Motornyi Tavria State Agrotechnological University

Summary

The article examines the results of a study on the influence of the velocity gradient of the flow on the degree of dispersion of milk emulsion in a pulsation homogenizer. Homogenization is one of the key technological processes in the dairy industry. With the development of technologies, stricter requirements are imposed on the dispersity of the final product for the components subject to homogenization. The main technical challenge in obtaining finely dispersed emulsions remains the limited capabilities of modern homogenizers. The most common type of equipment used in modern enterprises is the valve homogenizer. They provide high-quality dispersion of emulsions, but are characterized by significant energy consumption during the process, exceeding 7 kW/t. Therefore, the development of new devices and methods for obtaining finely dispersed emulsions with the possibility of adjusting dispersity and ensuring high productivity is extremely relevant. Analysis has shown that a promising method for obtaining a high-quality product is pulsation homogenization. The study established that the efficiency of homogenization in a pulsation homogenizer is directly determined by the velocity gradient of the milk emulsion flow, which is formed in the working chamber of the apparatus. The values of the velocity gradient of the milk emulsion flow were determined by computer modeling using the finite element analysis software package Ansys Workbench. The calculations showed that the maximum velocity gradient of the milk flow (2.2–5 m/s) occurs at the outlet of the conical openings of the second piston-impactor, which creates conditions for the most efficient homogenization compared to existing homogenizers. Therefore, the use of a pulsation homogenizer is appropriate for dispersing milk emulsion in technological lines of drinking milk production.

Keywords. homogenization, flow velocity gradient, Ansys Workbench, working chamber, milk.