

DOI <https://doi.org/10.32782/2078-0877-2025-25-2-23>

УДК 637.134.001.57

Н. О. Паляничка, канд. техн. наук, доцент

ORCID: 0000-0001-8510-7146

О. О. Червоткіна, асистент

ORCID: 0000-0002-6814-0566

О. О. Ковальов, канд. техн. наук, ст. викладач

ORCID: 0000-0002-4974-5201

Таврійський державний агротехнологічний університет імені Дмитра Моторного

e-mail: nadiia.palanychka@tsatu.edu.ua

ДОСЛІДЖЕННЯ ВИКОРИСТАННЯ ЕНЕРГОЕФЕКТИВНОГО ОБЛАДНАННЯ ДЛЯ ДИСПЕРГУВАННЯ НА ПІДПРИЄМСТВІ З ВИРОБНИЦТВА МОЛОЧНОЇ ПРОДУКЦІЇ

Анотація. У статті розглянуто дослідження впровадження енергоощадного обладнання для процесу диспергування молока. Попередній аналіз засвідчив, що традиційне устаткування для гомогенізації характеризується високим енергоспоживанням, що є вагомим недоліком в умовах сучасного виробництва. Теоретичне обґрунтування дало змогу відокремити перспективний варіант – пульсаційний гомогенізатор. Його застосування забезпечує зниження енергозатрат за збереження якості готової продукції. У роботі визначено ключові конструктивні характеристики пульсаційного гомогенізатора та представлено зовнішній вигляд дослідного зразка. Також було здійснено попереднє тестування роботи цього пристрою в умовах виробничої лінії пастеризованого питного молока на молокопереробному підприємстві. Отримані результати підтверджують, що після обробки пульсаційним гомогенізатором молоко зберігає високі якісні показники, а енергоспоживання значно менше порівняно з клапанними моделями гомогенізаторів.

Ключові слова: гомогенізація, диспергування, молоко, пульсаційний гомогенізатор, експериментальний зразок, випробування, енергоощадність.

Постановка проблеми. Диспергуванням називають процес тонкого подрібнення твердих або рідких речовин у середовищі, що їх оточує, у результаті чого утворюється більш однорідна система, наприклад емульсія чи суспензія. Ця технологічна операція широко застосовується у фармацевтичній, хімічній, косметичній промисловості, в аграрному секторі, а також у харчовій та переробній галузях [1]. У межах переробної промисловості особливе значення диспергування має в процесах переробки молока. Завдяки подрібненню молочного жиру покращуються органолептичні властивості продукту, підвищується його стійкість до зберігання, а також засвоюваність жирів організмом. Для реалізації цієї операції використовують спеціалізоване обладнання – гомогенізатори. Найбільш поширеним серед них залишається клапанний гомогенізатор, який активно застосовується на сучасних підприємствах [2]. Популярність цього типу апаратів зумовлена їхньою технологічною простотою та здатністю забезпечити високоякісний результат. Водночас клапанні гомогенізатори мають низку суттєвих недоліків, зокрема: високе енергоспоживання, значні габарити, велика маса та висока вартість. Незважаючи на це, вони залишаються домінуючим рішенням у виробництві через відсутність ефективних альтернатив, здатних забезпечити належний рівень гомогенізації. У зв'язку із цим актуальним є завдання розроблення нових типів гомогенізуючого обладнання, що дадуть змогу досягти необхідного ступеня диспергування з істотно нижчими енергетичними витратами, а також аналіз ефективності їх застосування на молокопереробних підприємствах.

Аналіз останніх досліджень. Проблематику диспергування молочного жиру вивчали чимало дослідників, серед яких варто відзначити В.В. Вайткуса, Н.В. Барановського, В.Я. Грановського, Ю.Ф. Дітякіна, М.А. Promtov, М.Н. Ліпатова, Є.В. Нужина, Р. Drankhar, С. Liu, Y. Lu, С. Trägårdh

[2–6]. Аналіз наукових джерел свідчить, що досі не сформовано єдиної загальноприйнятої теоретичної моделі процесу гомогенізації [1; 7]. Основними причинами цього є мікроскопічні розміри жирових глобул і висока швидкість їх переміщення, що суттєво ускладнює дослідницьке спостереження. До того ж значну частину наукових робіт присвячено вивченню гомогенізації у клапанних пристроях, які, як зазначалося раніше, мають високий рівень енергоспоживання [4; 5]. У ході огляду літератури було виявлено перспективний різновид обладнання – пульсаційний гомогенізатор, який здатний ефективно диспергувати жирову фазу до розмірів, що відповідають технологічним вимогам, при цьому витрачаючи значно менше енергії, ніж традиційний клапанний апарат [7; 8]. У зв'язку із цим подальше дослідження процесу було зосереджено саме на застосуванні пульсаційного типу гомогенізатора.

Формулювання мети статті. Метою статті є аналіз застосування пристрою для гомогенізації пульсаційного типу в технологічній лінії виробництва питного молока на підприємстві з переробки молока.

Основна частина. Проведений теоретичний огляд дав змогу з'ясувати, що для отримання кінцевого продукту з високим рівнем дисперсності за умов невеликих енергетичних витрат доцільним є використання пульсаційного пристрою для гомогенізації.

Попередній аналіз наявних теоретичних напрацювань засвідчив, що конструкція такого пристрою повинна включати технологічні ємності для подавання молока та накопичення гомогенізованого продукту, перепускні клапани, робочу камеру з ударним поршнем, а також привод і насос [9]. З огляду на результати аналізу, для подальших досліджень було змодельовано робочу камеру пульсаційного гомогенізатора у тривимірному середовищі автоматизованого проєктування SolidWorks. Відповідну схему наведено на рис. 1.

Для перевірки ефективності функціонування зазначеного типу технологічного обладнання, а також для здійснення експериментальних досліджень на молокопереробному підприємстві було розроблено та виготовлено дослідний зразок пульсаційного пристрою для гомогенізації [10].

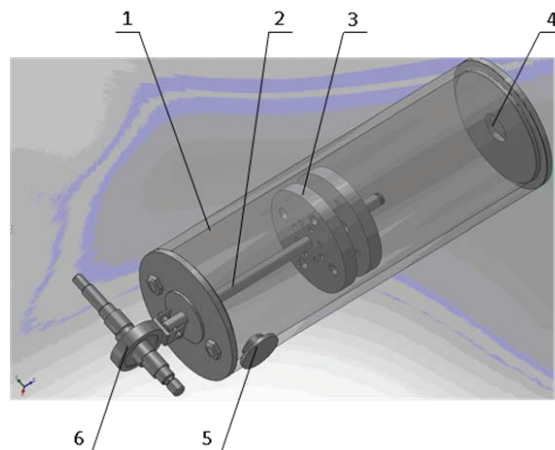


Рис. 1. Конструктивна модель робочої камери імпульсного пристрою для гомогенізації, створена у середовищі SolidWorks: 1 – корпус у вигляді циліндра; 2 – штоковий елемент; 3 – поршні ударного типу; 4 – вхідний патрубок для подачі молока; 5 – вихідний патрубок для забору гомогенізованого продукту; 6 – кривошипно-шатунний механізм

Підсумки розрахунку основних конструктивних характеристик дослідного зразка пульсаційного гомогенізатора для виготовлення дослідного зразку гомогенізатора представлено в табл. 1.

Таблиця 1

Розрахункові дані параметрів дослідного зразка пульсаційного гомогенізатора

Продуктивність пульсаційного гомогенізатора Q , кг/год	Максимальне значення тиску імпульсів, МПа	Довжина камери для гомогенізації, м	Діаметр камери для гомогені- зації, м	Потужність пульсаційного гомогенізатора, N , кВт
1800	1,5	0,5	0,3	2

Дані, що отримані, були використані для розроблення креслення загального виду випробувального зразка пульсаційного пристрою для гомогенізації [11].

Для подачі молочної сировини у випробувальному зразку використовували насос відцентровий марки ОНЦ 1,5/15К ДСТУ 7341:2013. Даний тип насосів достатньо універсальний та частіше за всіх інших використовується на підприємствах з переробки молока. Насос гарантує транспортування молочної сировини до 3500 л/год, частота обертання становить 3000 об/хв. Запас насосу на кавітацію становить 1,5%, а ККД – 38%.

Загальний вигляд випробувального зразка пульсаційного типу гомогенізатора приведено на рис. 2.

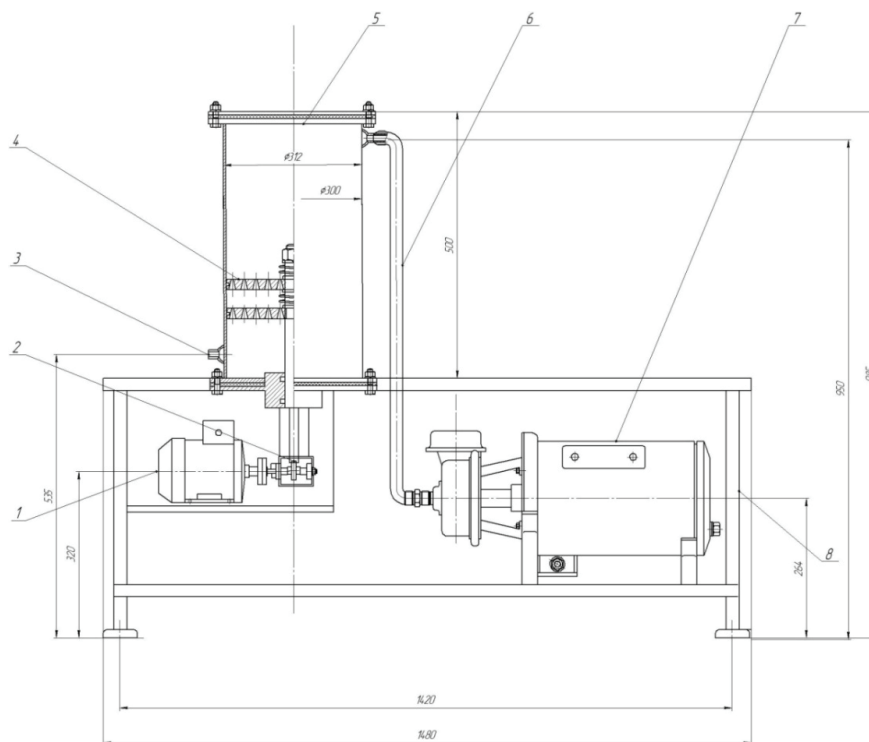


Рис. 2. Загальний вигляд випробувального зразка пульсаційного типу гомогенізатора:
1 – двигун електричний; 2 – механізм кривошипного типу; 3 – гомогенізаційна камера; 4 – шток із поршнями ударної дії; 5 – трубопровід для транспортування молока до камери; 6 – резервуар для вихідної сировини; 7 – нагнітальний насос; 8 – каркас зварної конструкції; 9 – резервуар для готової продукції

Процес виготовлення випробувального зразка пульсаційного типу гомогенізатора супроводжувався суворим дотриманням вимог щодо вибору матеріалів [11]. Елементи та вузли пристрою, які під час експлуатації контактують із продуктом (ємність, камера гомогенізатора, шток, ударний поршень, верхня та нижня кришки, патрубок), були виготовлені з високоякісної

харчової нержавіючої сталі. Такий матеріал запобігає процесам окиснення і не змінює органолептичних властивостей продукту. Трубопроводи виготовлялися зі спеціалізованого ПВХ, що допускається до використання у харчовій промисловості. Для перепускних вентилів вибрали леговану харчову корозійностійку сталь, латунь або мідь, які не піддаються окисненню та витримують робочі тиски, характерні для роботи установки.

Дослідні випробування пульсаційного типу гомогенізатора були виконані на базі приватного підприємства «Молокозавод-ОЛКОМ» у складі виробничої лінії з випуску пастеризованого питного молока [11].

Схематичне зображення процесу виготовлення питного молока із застосуванням пульсаційного типу гомогенізатора наведено на рис. 3. У даній модифікованій версії технологічна послідовність виробництва залишилася незмінною за винятком параметрів функціонування гомогенізуючого пристрою пульсаційного типу. Оптимальна температура молока для проведення гомогенізації у пільсаційному гомогенізаторі становить 65...70 °С. При цьому частота та амплітуда коливань ударних поршнів дорівнюють 55...59 Гц і 10...12 мм відповідно, за умови подачі молока в межах 1800...2000 кг/год.

Молоко надходить у балансний танк 3, звідки за допомогою насоса 1 транспортується до пластинчастої охолоджувальної установки 4 для первинного охолодження. Потім охолоджене молоко тим же насосом 1 подається на процес нормалізації 5, який здійснюється безперервно в потоці. Отримана нормалізована суміш надходить у пластинчасту пастеризаційно-охолоджувальну установку 6, де проходить підігрів перед сепарацією та очищенням у сепараторі-молокоочиснику 7.

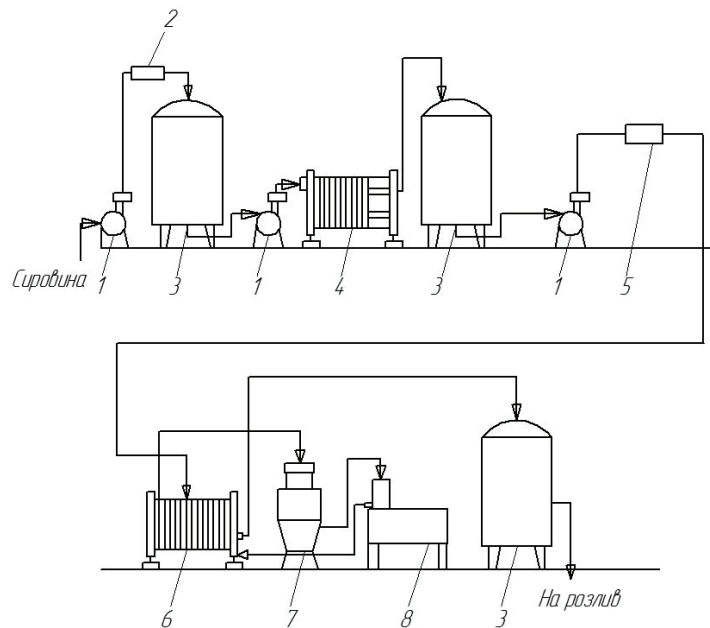
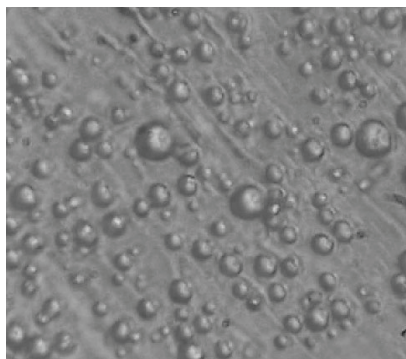


Рис. 3. Схематичне зображення технологічної лінії виробництва питного молока із застосуванням пульсаційного гомогенізатора: 1 – молочні насоси; 2 – пристрій для обліку об'єму молока; 3 – резервуари для балансування молока; 4 – пластинчастий охолоджувач; 5 – обладнання для нормалізації молока; 6 – пластинчастий апарат для пастеризації та охолодження; 7 – сепаратор для очищення молока; 8 – пульсаційний пристрій для гомогенізації

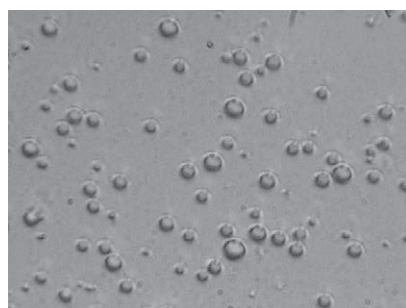
Після етапу очищення проводиться гомогенізація за допомогою пульсаційного гомогенізатора 8. Далі молоко знову подається в установку 6, де послідовно проходить пастеризацію та охолодження, після чого спрямовується на стадії розливу і фасування. За результатами випро-

бувань пульсаційного типу гомогенізатора зафіксовано значне зменшення споживаної потужності приводу – з 18,5 кВт до 2 кВт.

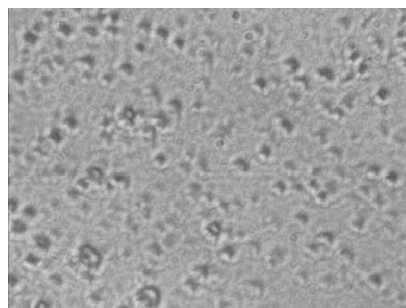
На рис. 4 представлено мікрофотографії зразків молочної сировини після гомогенізації в пульсаційному гомогенізаторі, проведеної у порівнянні з клапанним типом гомогенізатора.



а)



б)



в)

Рис. 4. Мікрофотографії зразків молока (збільшення $\times 400$): а) молоко без обробки; б) після гомогенізації клапанним методом за перепадом тиску $\Delta p=16$ МПа; в) після пульсаційної гомогенізації при тиску $p=1,5$ МПа

Перед гомогенізацією молоко мало такі характеристики: середній діаметр жирових кульок становив 2,48 мкм, дисперсія – 1,66, а коефіцієнт варіації (показник розсіювання ознаки відносно середнього значення) – 67%. Після проведення гомогенізації клапанним та пульсаційним способами ці показники змінилися: середній діаметр жирових кульок становив відповідно 0,98 мкм і 0,80 мкм, дисперсія – 0,50 та 0,46, коефіцієнт варіації – 51% і 56%.

Результати експериментів довели, що за застосування пульсаційного типу гомогенізатора середній розмір жирових кульок зменшився на 19% порівняно з клапанним типом. Одночасно із цим спостерігалось зниження дисперсії, що підтверджує ефективність вибраних параметрів

і режимів роботи пульсаційного гомогенізатора для забезпечення стабільності жирової фази після гомогенізації.

Пастеризоване молоко, виготовлене із застосуванням пульсаційного типу гомогенізатора, було передано на експертне дослідження до випробувальної лабораторії харчової продукції, продовольчої сировини та будівельних матеріалів Запорізької філії випробувального центру «ЗАПОРІЖЖЯСТАНДАРТМЕТРОЛОГІЯ». За результатами експертизи встановлено, що питне пастеризоване молоко після пульсаційної гомогенізації відповідає вимогам стандарту ДСТУ 2661-94, затвердженого Наказом Держстандарту України № 79 від 02.08.1999.

Висновки. Сьогодні найбільш поширеним видом обладнання, що застосовується для процесу гомогенізації, є установки з високим енергоспоживанням. У зв'язку із цим особливо актуальним залишається питання розроблення та дослідження енергоощадного технологічного обладнання, здатного забезпечити високу якість продукції за зниження енерговитрат. Згідно з попередніми дослідженнями, перспективним рішенням є використання пульсаційного типу гомогенізатора. Було здійснено теоретичне обґрунтування основних конструктивних параметрів дослідного зразка цього обладнання, у результаті чого визначено, що його продуктивність досягає 1800 кг/год, максимальний тиск становить 1,5 МПа, а встановлена потужність – 2 кВт. Розроблено технічне креслення дослідного зразка пульсаційного типу гомогенізатора, а також визначено базові вимоги до матеріалів для її виготовлення. У подальшому планується виконання експериментальних досліджень, спрямованих на оптимізацію параметрів і режимів функціонування установки з метою досягнення найвищого рівня гомогенізації за мінімальних витрат енергії на різних видах молочної продукції.

Список використаних джерел

1. Samoichuk K., Kovalyov A., Fuchadzhy N., Bezalychna O., Shevtsova A.: Energy Costs Reduction for Dispersion Using a Jet-Slot Type Milk Homogenizer. *Energies* 16(5), 2211 (2023). <https://doi.org/10.3390/en16052211>
2. Drankhar P. Homogenization fundamentals. *IOSR Journal of Engineering*. 2014. Vol. 4, Iss. 5. 8p. URL: [www.iosrjen.org/Papers/vol4_issue5%20\(part-4\)/A0454_0108.pdf](http://www.iosrjen.org/Papers/vol4_issue5%20(part-4)/A0454_0108.pdf)
3. Wilbey R.A. Homogenization of Milk: Principles and Mechanism of Homogenization, Effects and Assessment of Efficiency: Valve Homogenizers. *Encyclopedia of Dairy Sciences (Second Edition)*. 2011. P. 750–754.
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. Vol. 102. P. 622–631.
5. Håkansson A. Fuchs L. Innings F. Revstedt J. Trägårdh C. & Bergenståhl B. 2011. Turbulent Velocity Fields Measurements of Two Phase Flow in a High Pressure Homogenizer Scale Model. Submitted to journal. 2016. P. 320–342.
6. Innings F., Trägårdh C. Visualization of the Drop Deformation and Break-Up Process in a High Pressure Homogenizer. *Chemical Engineering & Technology*. Volume 28, Issue 8, August, 2015. Pages 882–891. <https://onlinelibrary.wiley.com/doi/10.1002/ceat.200500080>
7. 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.
8. Peng J., Dong W., Li L., Xu J., Jin D., Xia X., Liu Y. Effect of high-pressure homogenization preparation on mean globule size and large-diameter tail of oil-in-water injectable emulsions. *Journal of Food and Drug Analysis*. 23, 4, 828–835 (2015). <https://doi.org/10.1016/j.jfda.2015.04.004>
9. Дейниченко Г.В., Самойчук К.О., Левченко Л.В. Теоретичні дослідження пульсаційної гомогенізації молока. *Інноваційні аспекти розвитку обладнання харчової і готельної індустрії в умовах сучасності : матеріали II Міжнар. наук.-практ. конф., 5–7 вересня 2017 р. Харків : ХДУХТ, 2017. С. 42–43.*



10. Deynichenko G., Samoichuk K., Yudina T., Levchenko L., Palianychka N., Verkholtantseva V., Dmytrevskiy D., Chervonyi V. Parameter optimization of milk pulsation homogenizer. *Journal of Hygienic Engineering and Design*, 2018. Vol. 24. P. 63–67.

11. Самойчук К.О., Кюрчев С.В., Паляничка Н.О., Верхоланцева В.О. Упровадження високоефективного обладнання для диспергування емульсій у технологічну лінію переробки молока. *Науковий вісник Таврійського державного агротехнологічного університету*. 2022. Вип. 12. Т. 2. С. 7–14.

Стаття надійшла до редакції 25.04.2025

N. Palianychka, O. Chervotkina, A. Kovalov

Dmytro Motornyi Tavria State Agrotechnological University

RESEARCH INTO THE USE OF ENERGY-EFFICIENT EQUIPMENT FOR DISPERSION AT A DAIRY PRODUCTION ENTERPRISE

Summary

The article discusses the study of the implementation of energy-saving equipment for the milk dispersion process. Preliminary analysis has shown that traditional homogenization equipment is characterized by high energy consumption, which is a significant drawback in modern production conditions. Despite this, they remain the dominant solution in production due to the lack of effective alternatives that can provide the proper level of homogenization. In this regard, the task of developing new types of homogenizing equipment that will allow achieving the required degree of dispersion with significantly lower energy costs, as well as analyzing the effectiveness of their use at dairy processing plants, is relevant. During the literature review, a promising type of equipment was identified – a pulsating homogenizer, which is able to effectively disperse the fat phase to sizes that meet technological requirements, while consuming significantly less energy than a traditional valve apparatus. The paper identifies the key design characteristics of the pulsating homogenizer and presents the appearance of the prototype. Experimental tests of a pulsating homogenizer were conducted as part of a production line for the production of pasteurized drinking milk at a dairy processing plant. The results obtained proved that when using a pulsating homogenizer, the average size of fat globules decreased by 19% compared to the valve type. At the same time, a decrease in dispersion was observed, which confirms the effectiveness of the selected parameters and operating modes of the pulsating homogenizer to ensure the stability of the fat phase after homogenization. Pasteurized milk produced using a pulsating homogenizer was transferred for expert examination to the food testing laboratory. According to the results of the examination, it was established that pasteurized drinking milk after pulsating homogenization meets the requirements of the DSTU 2661-94 standard.

Keywords: homogenization, dispersion, milk, pulsating homogenizer, experimental sample, testing, energy saving.