

DOI <https://doi.org/10.32782/2220-8674-2025-15-1-11>

УДК 637.134.001.57

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

ORCID: 0000-0001-8510-7146

О. О. Червоткіна, асист.

ORCID: 0000-0002-6814-0566

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

ORCID: 0000-0002-4974-5201

В. Ф. Ялпачик, д-р техн. наук, проф.

ORCID: 0000-0002-0349-2448

Таврійський державний агротехнологічний університет імені Дмитра Моторного

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

ДОСЛІДЖЕННЯ ЕФЕКТИВНОСТІ ДИСПЕРГУВАННЯ МОЛОЧНОГО ЖИРУ В ГОМОГЕНІЗАТОРІ ПУЛЬСАЦІЙНОГО ТИПУ

Анотація. Ця робота присвячена дослідженню теми диспергування молочного жиру шляхом гомогенізації. Встановлено, що існуюче технологічне обладнання для гомогенізації має дуже високі показники енерговитрат на процес, що в умовах сьогодення є суттєвим недоліком. За підсумками дослідження встановлено, що найбільш перспективним обладнанням для досягнення високої якості готового продукту за низьких енерговитрат є пульсаційний гомогенізатор. Було здійснено аналіз ефективності диспергування молочного жиру в пульсаційному гомогенізаторі молока, що дало можливість виявити чинники та сили, які впливають на якість гомогенізації, а отже, регулювати цей технологічний процес у виробничих умовах. Експериментальні дослідження показали, що середній діаметр жирових кульок молока після гомогенізації в пульсаційному гомогенізаторі становить 0,8 мкм, що цілком відповідає вимогам сьогодення.

Ключові слова: диспергування, якість, пульсаційний гомогенізатор, молочний жир, ступінь гомогенізації, ефективність, енергоємність.

Постановка проблеми. Процес диспергування являє собою тонке подрібнення або рівномірного розподілення однієї речовини (дисперсної фази) в дисперсійному середовищі, яке її оточує, що, зі свого боку, дає змогу отримати однорідну дисперсійну систему (емульсію або суспензію). Широкого використання цей процес набув у хімічній, фармацевтичній, харчовій, косметологічній промисловості, а також у сільському господарстві [1, 2]. У харчовій промисловості процес диспергування використовують у виробництві соусів, майонезу, маргарину, шоколадних напоїв, фруктових пюре тощо. Однак найбільш широко цей процес застосовують у молочній промисловості для переробки молока й виробництва молочних продуктів, оскільки завдяки диспергуванню готовий продукт стає більш стабільним, однорідним, покращуються смакові якості продукту та засвоюваність молочного жиру. Для здійснення цього процесу на підприємствах молочної промисловості використовують технологічне обладнання – гомогенізатори. На сьогодні підприємствами широко використовуються апарати клапанного типу. Такі гомогенізатори дають можливість отримати високу якість готового продукту та досить прості у використанні. Проте вони мають інший, зворотний, бік – велику вартість обладнання, великі габаритні розміри і саме головне – високу енергоємність процесу, що в умовах сьогодення є суттєвим недоліком [3]. Саме це спонукає до дослідження процесу диспергування молочного жиру шляхом гомогенізації з метою знаходження нових, більш перспективних типів обладнання, яке дасть можливість отримати високу якість кінцевого продукту та матиме нижчі витрати енергії на процес у порівнянні з існуючими клапанними пристроями.

Аналіз останніх досліджень. Досліджували процес гомогенізації молока з метою підвищення якості кінцевого продукту такі вчені, як: Drankhar P., Innings F., Glawdel T., Liu C.,

Håkansson, A., Promtov M.A., Барановський Н. В., Нужин Є. В., Фіалкова Є. О., Орешина М. М. [2, 4, 5, 6, 7]. Аналізуючи їх роботи, можна зробити висновок, що на цей час не існує чітко визначеної єдиної теорії диспергування шляхом гомогенізації [8, 9, 10]. Оскільки молочний жир має дуже мікроскопічний розмір і достатньо велику швидкість, не можна провести якісне спостереження за цим процесом [11,12]. Однак проведений аналіз дав змогу виділити досить перспективний тип обладнання, який під час дослідження показав гарні результати щодо якості готового продукту та використання енергії на процес, – це пульсаційний гомогенізатор. Було встановлено, що цей тип технологічного обладнання дозволяє отримати середній діаметр жирових кульок після гомогенізації менше за 1 мкм, як у клапанного гомогенізатора [13, 14], однак при цьому енерговитрати на процес становлять 0,82 Дж/кг [15], що значно менше, ніж у клапанного типу обладнання. Тому доцільним було продовжити дослідження пульсаційного гомогенізатора з метою подальшого визначення ефективності диспергування молочного жиру.

Формулювання мети статті (постановка завдання). Завданням цієї статті є вивчення механізму диспергування часток жиру молочного в обладнанні пульсаційного типу з метою встановлення ефективності використання цього типу гомогенізатора в молочній промисловості для переробки молока та виробництва молочних продуктів.

Основна частина. Проведені попередні теоретичні дослідження показали, що пульсаційний гомогенізатор повинен містити резервуари для транспортування молока безпосередньо в гомогенізатор і зберігання гомогенізованого продукту, нагнітальний насос для переміщення сировини, вентиль і робочу циліндричну прозору камеру пульсаційного гомогенізатора, у якій розташований ударний механізм із наскрізними отворами. Поршень має здійснювати зворотно-поступальні рухи за допомогою приводу, що має електродвигун із регульованою частотою обертання вала та кривошипний механізм із можливістю зміни радіуса кривошипа. З огляду на отримані дані було зроблено схему пульсаційного гомогенізатора, зображеного на рис. 1. Устаткування має резервуари для подання молочної сировини до гомогенізатора (1) та зберігання гомогенізованого продукту (7), насос для транспортування молока (2), клапан (3) та циліндричну камеру з прозорою стінкою для гомогенізації (4), що містить робочий пристрій ударного типу (5) із наскрізними щілинами. Ударний пристрій переміщається коливально за допомогою привода (8), що має електродвигун (10) з електронним регулятором швидкості обертання вала і кривошипний механізм (9), який дає змогу змінювати радіус кривошипа.

З метою реалізації експериментальних досліджень у сфері пульсаційної гомогенізації на базі кафедри обладнання переробних і харчових виробництв ім. проф. Ф. Ю. Ялпачика Таврійського державного агротехнологічного університету ім. Дмитра Моторного було спроектовано та виготовлено експериментальну установку, конструктивне виконання якої наведено на рис. 2 [16].

Робота пристрою відбувається таким чином: у резервуар (1) завантажували попередньо підігріте до потрібної температури незбиране молоко. За допомогою насоса (2) воно надходило до гомогенізаційної камери (4) через регульовальний вентиль (3), який контролює подачу молока. Під впливом зворотно-поступального руху поршня (5) відбувалося подрібнення жирових частинок у молоці. Після цього гомогенізований продукт спрямовувався до ємності (7).

Основними змінними параметрами пристрою є можливість регулювання інтенсивності руху ударного поршня (його частоти й амплітуди коливань). Ці параметри впливають на гідродинамічні показники в зоні диспергування (швидкість та тиск емульсії) і визначають якість гомогенізації.

Пульсаційний гомогенізатор дає змогу створити умови, у яких виникає значний знакозмінний (пульсуючий) градієнт швидкості проходження потоку продукту, а отже, можна отримати високу якість диспергування емульсії [16]. Зниження енерговитрат у такому типі гомогенізатора реалізується завдяки уникненню застійних зон та об'ємів емульсії з недостатньою дисипацією енергії [11, 17].

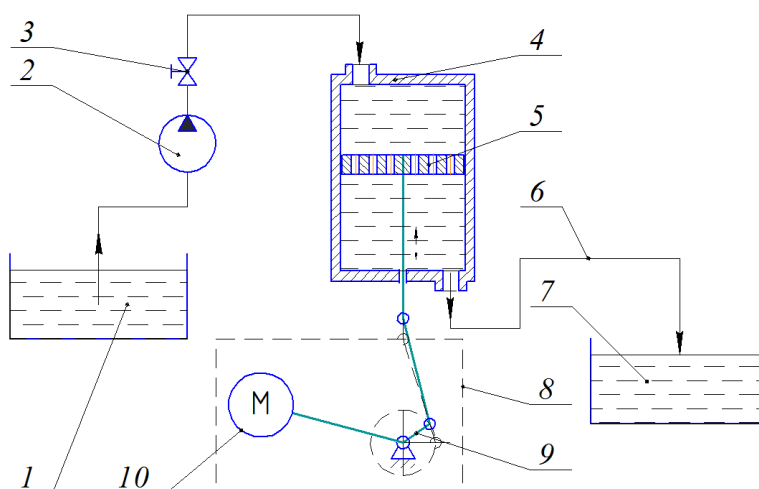


Рис. 1. Схема лабораторної установки, призначеної для дослідження роботи пульсаційного гомогенізатора: 1, 7 – резервуари для подавання та збирання молока відповідно; 2 – насосний агрегат; 3 – запірний вентиль; 4 – камера, у якій відбувається процес гомогенізації; 5 – поршневий механізм; 6 – система трубопроводів; 8 – привід, що забезпечує рух основного робочого елемента; 9 – кривошипний вузол із механізмом регулювання амплітуди; 10 – електродвигун з електричним регулятором частоти обертання вала

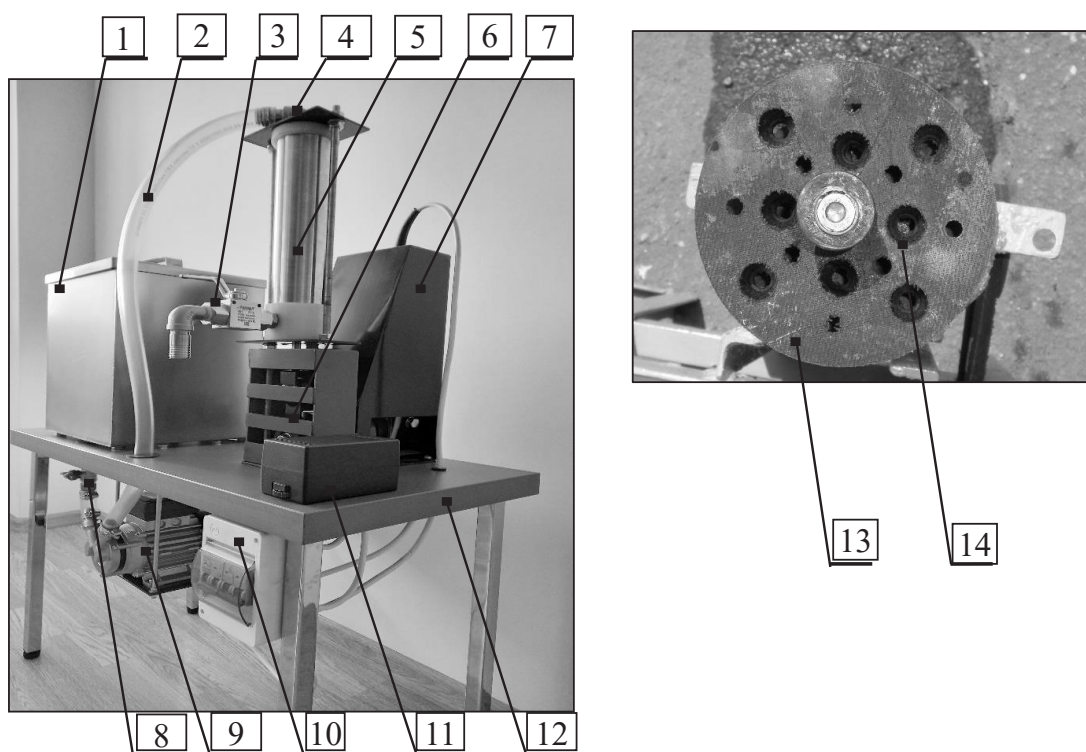


Рис. 2. Схема лабораторної установки для дослідження пульсаційного гомогенізатора: 1, 7 – резервуари, призначені для подавання та збору молока відповідно; 2 – насосний агрегат; 3 – запірний вентиль; 4 – камера, у якій відбувається процес гомогенізації; 5 – поршневий елемент; 6 – система трубопроводів; 8 – механізм, що забезпечує рух робочої частини; 9 – кривошипний вузол з можливістю регулювання амплітуди коливань; 10 – електричний двигун, обладнаний регулятором частоти обертання вала

Дослідження ефективності роботи пульсаційного гомогенізатора проводилось на прикладі молока (жирові кульки – дисперсна фаза емульсії, а молочна плазма – дисперсійна), але може бути використано для будь-яких інших дрібнодисперсних емульсій.

Для дослідження та розрахунку швидкості проходження потоку молока в пульсаційному гомогенізаторі використовували комп'ютерне моделювання з програмним забезпеченням для комп'ютерного аналізу гідродинамічних процесів Ansys Workbench [18] та його модуля CFX, який дає можливість проводити ефективні та надійні розрахунки з динаміки рідини та газу.

Під час розрахунку були визначені профілі розподілу тиску, швидкостей і ліній струму вздовж робочої камери з урахуванням змін параметрів, що впливають на процес пульсаційної гомогенізації (рис. 3).

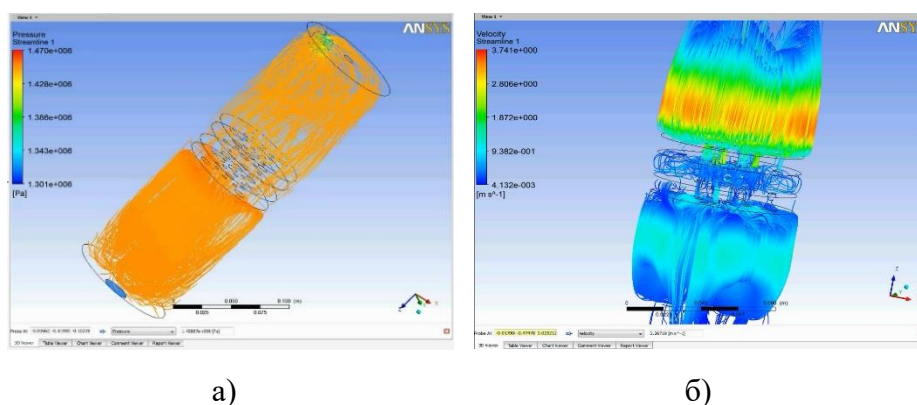


Рис. 3. Об'ємні 3-Д графіки, побудовані в Ansys Workbench:
а) розподіл тиску; б) розподіл швидкостей у внутрішньому об'ємі камери

Аналітичні обчислення засвідчили, що для досягнення високого рівня гомогенізації ($N_m = 4...5$) у пульсаційному гомогенізаторі потрібно забезпечити певні параметри роботи: амплітуда руху поршня-ударника має становити 10–12 мм, частота коливань – у межах 55–65 Гц, а витрата молока повинна бути на рівні 1800–2000 кг/год.

Для перевірки отриманих аналітичних даних було проведено експериментальні дослідження процесу пульсаційної гомогенізації для визначення ступеня диспергування молочного жиру. Отримані дані порівнювали з даними гомогенізації в клапанному гомогенізаторі [17].

Для аналізу отриманих результатів експерименту було застосовано номограмний підхід, що дає можливість одночасно оцінити вплив усіх незалежних змінних факторів на параметри оптимізації, які входять до рівняння регресії. Це дає змогу зрозуміти, як саме ці фактори впливають на фактичний хід технологічного процесу [18, 19].

З використанням програмного забезпечення Mathcad було створено номограму (рис. 4), яка слугувала інструментом для аналізу та підбору оптимальних значень факторів для забезпечення ступеня диспергування молочного жиру в пульсаційному гомогенізаторі на рівні не менше ніж 4.

На основі проведених досліджень визначено, що для ефективної роботи пульсаційного гомогенізатора з продуктивністю подачі молока 1800–2000 кг/год та досягнення ступеня гомогенізації на рівні 5 потрібно дотримуватися таких технологічних умов: амплітуда коливань повинна бути в межах 10–13 мм, а частота – від 53 до 62 Гц.

Різниця між теоретичними й експериментальними результатами в межах усього діапазону параметрів не перевищує 11 %, що свідчить про достовірність і відповідність отриманих даних.

Експериментальним шляхом також було визначено питому енергоємність процесу гомогенізації молока в пульсаційному гомогенізаторі, результати якого приведено на номограмі, рис. 5.

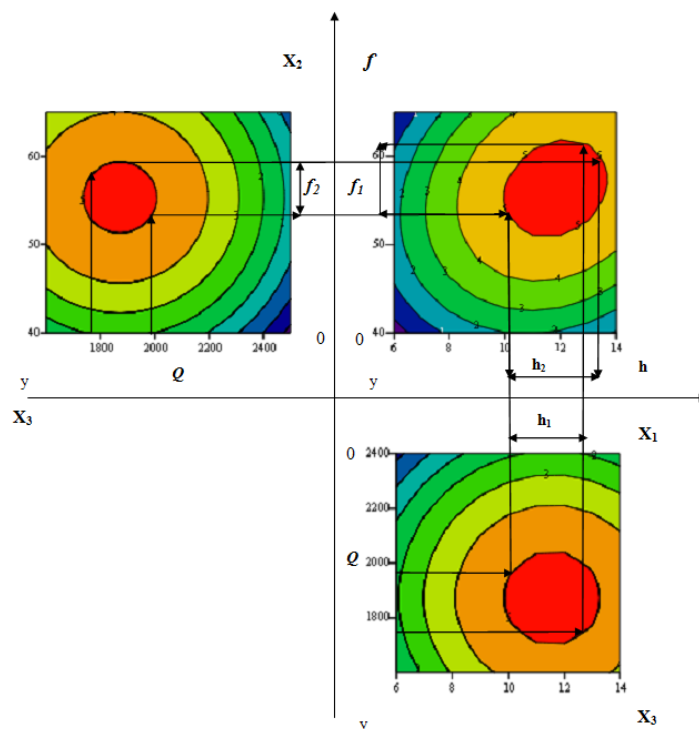


Рис. 4. Номограма для оцінки та встановлення оптимальних режимів факторів, що забезпечують ступінь гомогенізації молока в пульсаційному гомогенізаторі не менше ніж 4

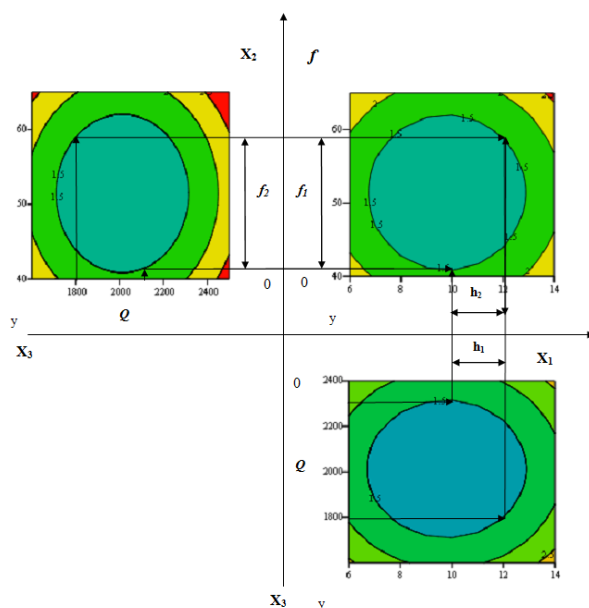


Рис. 5. Графічне представлення (номограма) для визначення оптимальних значень параметрів, що сприяють зниженню енерговитрат під час пульсаційної гомогенізації

На основі проведеного аналізу встановлено, що під час роботи пульсаційного гомогенізатора з витратою молока в межах 1800–2250 кг/год, амплітудою руху поршня-ударника 10–12 мм та частотою коливань 43–59 Гц енергоспоживання в процесі гомогенізації становить 1,5 кВт, а питомі енерговитрати – 0,83 Дж/кг.

Після поєднання оптимальних значень із двох номограм зроблено висновок, що для досягнення найвищого ступеня гомогенізації ($H_m = 5$) за мінімальних питомих енерговитрат ($E_{\text{пит}} = 0,83$ Дж/кг), слід забезпечити такі умови: амплітуда руху поршня-ударника – від 10 до 12 мм, частота – у діапазоні 55–59 Гц, а витрата молока – у межах 1800–2000 кг/год.

Розбіжність між теоретичними розрахунками та результатами експериментальних досліджень не перевищує 9 % по всьому діапазону зміни параметрів, що свідчить про достовірність і точність отриманих даних.

На рис. 6 представлено диференційні розподілення діаметрів часток жиру, отриманих унаслідок диспергування в пульсаційному гомогенізаторі та відповідно клапанному гомогенізаторі.

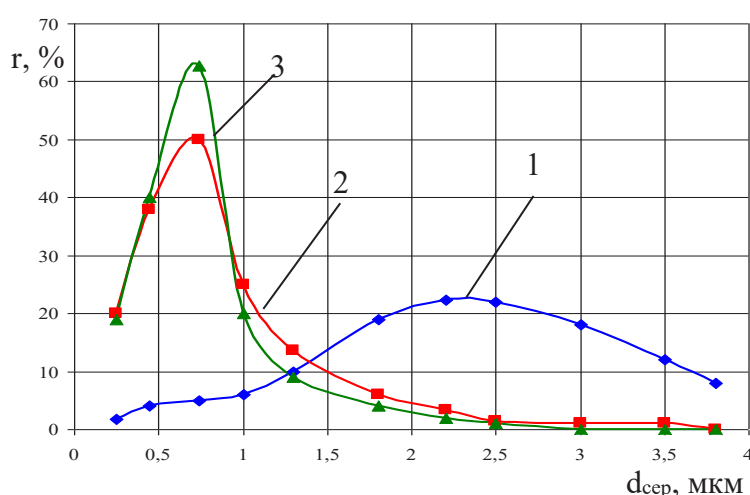


Рис. 6. Диференціальний розподіл діаметрів часток жиру за розмірами: 1 – необроблене молоко; 2 – дисперговане в клапанному гомогенізаторі, з тиском 16 МПа та температурою 65 °С; 3 – дисперговане в пульсаційному гомогенізаторі, з тиском 1,5 МПа та температурою 65 °С

Результати показують, що діаметр часток жиру молочної емульсії менше за використання пульсаційної гомогенізації ($d_{av} = 0,98$ мкм проти 0,80 мкм.). Тобто якість гомогенізації у дослідному гомогенізаторі стала вище на 19 % порівняно з результатами досліджень, зазначених у роботі [19]. При цьому рівномірність фракційного складу після обробки в дослідному гомогенізаторі не менше, ніж в еталонного – клапанного гомогенізатора.

Висновки. Процес диспергування шляхом гомогенізації на цей час є доволі поширеним, його використовують у багатьох галузях промисловості, зокрема в харчовій і переробній. У технологічній лінії переробки молока та виробництва молочної продукції процес гомогенізації є одним із найважливіших, оскільки диспергування впливає на смакові й сенсорні характеристики готової продукції. Поширення на підприємствах харчової промисловості набули клапанні типи гомогенізаторів, однак в умовах сьогодення їх використання є неефективним та вартісним, оскільки такі гомогенізатори використовують дуже багато електроенергії. Проведені аналітичні дослідження дали можливість встановити перспективний тип гомогенізатора – пульсаційний, завдяки якому можна суттєво знизити витрати електроенергії на процес гомогенізації, при цьому не втрачаючи якість готового продукту. Було проведено дослідження, яке допомогло встановити й розрахувати основні показники процесу диспергування в пульсаційному гомогенізаторі. Результати експериментальних досліджень засвідчили, що для досягнення максимальної гомогенізації на рівні $H_m = 5$ за мінімальних питомих затрат електроенергії $E_{\text{пит}} = 0,83$ Дж/кг потрібно дотримуватися таких параметрів: амплітуда руху ударного

поршня має становити 10–12 мм, частота коливань – у межах 55–59 Гц, а подача молока через пульсаційний гомогенізатор – 1800–2000 кг/год. Це, зі свого боку, свідчить про ефективність використання пульсаційного гомогенізатора в лініях переробки молочної продукції.

Також було встановлено, що середній діаметр жирових кульок молока становить 0,80 мкм. При цьому рівномірність фракційного складу після обробки в дослідному гомогенізаторі не менше, ніж в еталонного – клапанного гомогенізатора.

Отже, проведені дослідження доводять, що дослідний пульсаційний гомогенізатор за параметром якості гомогенізації не поступається еталонному – клапанному гомогенізатору. Таким чином, цей гомогенізатор є перспективним для заміни клапанних гомогенізаторів і потребує подальших поглиблених досліджень з метою визначення енерговитрат та впровадження його у виробництво.

Список використаних джерел

1. Huppertz T. Homogenization of Milk | Other Types of Homogenizer (High-Speed Mixing, Ultrasonics, Microfluidizers, Membrane Emulsification). *Encyclopedia of Dairy Sciences* (Second Edition). 2011. P. 761–764.
2. Drankhar P. Homogenization fundamentals. *IOSR Journal of Engineering*. 2014. Vol. 4. Iss. 5. 8 p. URL: [www.iosrjen.org/Papers/vol4_issue5%20\(part-4\)/A04540108.pdf](http://www.iosrjen.org/Papers/vol4_issue5%20(part-4)/A04540108.pdf).
3. Samoichuk K., Kovalyov A., Fuchadzh N., Bezalychna O., Shevtsova A. Energy Costs Reduction for Dispersion Using a Jet-Slot Type Milk Homogenizer. *Energies*. 2023. Vol. 16 (5). P. 2211. <https://doi.org/10.3390/en16052211>.
4. 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.
5. 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.
6. Ahmad T. Homogenization-Centrifugation. In: *Dairy Plant Engineering and Management*. 10th chapter. 8th Edn. Kitab Mahal, Allahabad, India, 2012. P. 237–247.
7. 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.
8. Innings F., Trägårdh C. Visualization of the Drop Deformation and Break-Up Process in a High Pressure Homogenizer. *Chemical Engineering & Technology*. August, 2015. Volume 28. Issue 8. Pages 882–891. <https://onlinelibrary.wiley.com/doi/10.1002/ceat.200500080>.
9. Дейниченко Г. В., Самойчук К. О., Івженко А. О., Левченко Л. В. Аналіз конструкцій гомогенізаторів молочної промисловості. *Праці Таврійського державного агротехнологічного університету : зб. наук. праць*. Мелітополь : ТДАТУ, 2016. Вип. 16. Т. 1. С. 9–15.
10. 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*. 2015. Vol. 23 (4). P. 828–835. <https://doi.org/10.1016/j.jfda.2015.04.004>.
11. Postelmans A., Aernouts B., Jordens J., Van Gerven T., Saeys W. Milk homogenization monitoring: Fat globule size estimation from scattering spectra of milk. *Innovative Food Science & Emerging Technologies*. 2020. Vol. 60. P. 102311. <https://doi.org/10.1016/j.ifset.2020.102311>.
12. Ashokkumar M., Rink R., Shestakov S. Hydrodynamic cavitation – an alternative to ultrasonic food processing. *Technical Acoustics*. 2011. Vol. 9. P. 156–166.
13. Brivibaa K., Gräfc V., Walzc E., Guamisd B., P. Butz P. Ultra high pressure homogenization of almond milk: Physico-chemical and physiological effects. *Food Chemistry*. 2016. Vol. 192. P. 82–89.
14. Rayner Marilyn, Dejmek Petr. *Engineering Aspects of Emulsification and Homogenization in the Food Industry*: CRCpress Taylor Ftancis group London, 2015. 322 p.
15. Самойчук К. О. Розвиток наукових основ гідродинамічного диспергування молочних емульсій : автореф. дис. на здобуття ступеня д-ра техн. наук: 05.18.12 Харківський держ. ун-т харч. та торгівлі. Харків, 2018. 44 с.



16. 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 другої міжнар. наук.– практ. конф.*, 5–7 вер. 2017 р. Харків : ХДУХТ, 2017. С. 42–43.

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

18. Гвоздєв О. В., Самойчук К. О., Паляничка Н. О. Комп'ютерне моделювання імпульсного гомогенізатора молока з використанням програмного забезпечення Ansys Workbench. *Обладнання та технології харчових виробництв : зб. наук. праць*. Донецький національний університет економіки і торгівлі імені Михайла Туган-Барановського. Донецьк : ДонНУЕТ ім. М. Туган-Барановського, 2012. Вип. 28. С. 294–299.

19. Паляничка Н. О. Використання енергоефективного обладнання для диспергування емульсій. *Праці Таврійського державного агротехнологічного університету*. Мелітополь : ТДАТУ, 2020. Вип. 20, т. 1. С. 26–34. DOI: 10.31388/2078-0877-20-1-26-34.

Стаття надійшла до редакції 23.03.2025 р.

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

RESEARCH ON THE EFFICIENCY OF MILK FAT DISPERSION IN A PULSATION-TYPE HOMOGENIZER

Summary

This work is devoted to the study of the topic of milk fat dispersion by homogenization. The process of dispersion by homogenization is currently quite widespread, it is widely used in many industries, including food and processing. In the technological line of milk processing and dairy product production, the homogenization process is one of the most important, since dispersion affects the taste and sensory characteristics of the finished product. Valve-type homogenizers have become widespread in food industry enterprises, however, in today's conditions, their use is very inefficient and costly, since such homogenizers use a lot of electricity. The conducted analytical studies allowed us to establish a promising type of homogenizer – pulsating, which allows us to significantly reduce electricity consumption for the homogenization process, without losing the quality of the finished product.

A study of the efficiency of milk fat dispersion in a pulsating milk homogenizer was conducted, which allowed us to establish the factors and forces that affect the quality of homogenization, which will subsequently allow us to regulate this technological process in production conditions. The conducted experimental studies showed that to obtain the maximum degree of homogenization $H_m = 5$ with minimal specific energy consumption $E_{pit} = 0.83$ J/kg, it is necessary to create the following conditions: the amplitude of the piston-hammer oscillations is 10...12 mm, the oscillation frequency is 55...59 Hz and the milk supply in the pulsating homogenizer is 1800...2000 kg/h, which in turn indicates the efficiency of using the pulsating homogenizer in dairy processing lines.

It was also established that the average diameter of milk fat globules is 0.80 μm . At the same time, the uniformity of the fractional composition after processing in the experimental homogenizer is no less than that of the reference valve homogenizer, which fully meets today's requirements.

Keywords: dispersion, quality, pulsating homogenizer, milk fat, degree of homogenization, efficiency, energy consumption.