



DOI: 10.32782/2078-0877-2024-24-1-3

УДК 637.134

С. В. Кюрчев¹, д-р техн. наук

ORCID: 0000-0001-6512-8118

К. О. Самойчук¹, д-р техн. наук

ORCID: 0000-0002-3423-3510

О. П. Ломейко¹, канд. техн. наук

ORCID: 0000-0001-7407-545X

¹ Таврійський державний агротехнологічний університет

імені Дмитра Моторного

e-mail: kyrylo.samoichuk@tsatu.edu.ua, тел.: +380978805485

ВИЗНАЧЕННЯ ПАРАМЕТРІВ СТРУМИННОГО ТА ПУЛЬСАЦІЙНОГО ГОМОГЕНІЗАТОРІВ МОЛОКА ПРИ ЇХ ПРОМИСЛОВОМУ ЗАСТОСУВАННІ

Анотація. Для впровадження розроблених енергоефективних струминного та пульсаційного гомогенізаторів необхідна розробка технології їх використання на виробництві. А для цього – основною перешкодою є відсутність даних з співставлення режимів клапанної (існуючої) гомогенізації з знов розробленими гомогенізаторами. Для розробки технології переробки молока при використанні цих двох гомогенізаторів, необхідно встановити залежність між режимами клапанної гомогенізації з основними параметрами нових гомогенізаторів. Отримані в результаті досліджень дані дають змогу визначити необхідні основні технологічні параметри, які визначають якість гомогенізації, для розроблених гомогенізаторів (пульсаційного та струминного) в залежності від даних, вказаних для клапанної гомогенізації. Таким чином будь-яка класична технологічна схема виробництва молочних продуктів може бути легко застосована для використання розроблених гомогенізаторів зі знизеними енерговитратами.

Ключові слова: гомогенізація, диспергування молока, струминний гомогенізатор, пульсаційний гомогенізатора, технологія.

Постановка проблеми. Одна з основних проблем харчової і переробної промисловості України полягає в недостатній техніко-технологічній ефективності виробництва продукції, яка представляє собою дрібнодисперсні емульсії (питне молоко, вершки, кисломолочні продукти та консерви, тощо) [1, 2]. Причина проблеми обумовлена низькою енергоефективністю технологічних процесів отримання стійких мікроемульсій [3]. Розробка теоретичних основ і пристроїв для реалізації процесів диспергування і гомогенізації емульсій дозволить знизити собівартість виробництва широкого спектра продукції, що призведе до підвищення конкурентноспроможності продукції, що виробляється в нашій країні та підвищення обсягів її виробництва, а отже і збільшення валового національного продукту України в цілому [4, 5].



Результати роботи необхідні для зниження споживання енергії на гомогенізацію дрібнодисперсних емульсій на 20–40%, зниження собівартості готової продукції (на 5–15%) та підвищення конкурентоспроможності вітчизняної промисловості та підвищення продовольчої безпеки України [6, 7].

Для нашої країни зниження собівартості готової продукції набуває особливої значущості при підписаних міжнародних договорах про відкриття азійських ринків для збуту продукції України. Отримані переваги підвищують ступінь відповідності продукції нашої країни міжнародним стандартам на 25–30% [8, 9].

Попередні зразки розробленої гомогенізуючої головки впроваджено на ТОВ МЖК «Південний» (м. Мелітополь), що підтверджено відповідним актом. При виробничих випробуваннях вдосконалена гомогенізуюча головка показала високу ефективність у порівнянні з гомогенізатором Alfa-Laval (Швеція).

Для впровадження розроблених ефективних струминного та пульсаційного гомогенізаторів необхідна розробка технології їх використання на виробництві. А для цього – основною перешкодою є відсутність даних з співставлення режимів клапанної (існуючої) гомогенізації з знов розробленими гомогенізаторами [10, 11].

Аналіз останніх досліджень. Авторами [8-10] розроблена альтернативна теорія диспергування, яка, на відміну від існуючих, базується на визначенні прискорення потоку емульсії, яка може бути універсальною для усіх типів гомогенізаторів, які використовують принцип гідродинамічного диспергування. З точки зору потенціалу збільшення прискорення потоку виділено 2 групи перспективних гомогенізаторів: пульсаційний поршньовий і струминний гомогенізатор [12, 13].

Аналіз механізмів диспергування й гомогенізації емульсій (на прикладі молока – як природної дрібнодисперсної емульсії), дало підставу стверджувати, що визначальна роль в цьому процесі належить різниці швидкості між жировою кулькою та плазмою – швидкості ковзання жирової кульки [14]. Цей параметр пропорційний прискоренню потоку молочної емульсії, яке досить легко розрахувати для будь-якого типу гомогенізуючого пристрою, завдяки чому прискорення потоку може стати узагальнюючим ключовим фактором диспергування жирової фази молока [15]. Основна ідея проекту – розробка теорії диспергування дрібнодисперсної емульсії на прикладі молочного жиру на базі фактору прискорення потоку і підвищення ефективності гомогенізації за рахунок розробки пристроїв з високим показником прискорення потоку емульсії.

З точки зору потенціалу збільшення прискорення потоку виділено 2 групи перспективних диспергаторів [16].

Основною частиною установки для дослідження процесу диспергування молочної емульсії в струминному гомогенізаторі (рис. 1) є камера 4, в якій направляючими 5 формується швидкісний потік знежиреного молока, куди по каналу 11 подаються вершки [17, 18].

В установці для проведення експериментальних досліджень гомогенізації в пульсаційному гомогенізаторі (рис. 2) необроблене молоко накопичується в ємності 1, звідки насосом 2 подається у робочу камеру 4. Проходячи крізь отвори поршня 5, який здійснює синусоїдальні коливання за рахунок кривошипного механізму 9, молочна емульсія гомогенізується.

Додаткова інтенсифікація процесу гомогенізації в таких пристроях здійснюється за рахунок [19]:

– концентрація енергії, що підводиться, на жировій фазі емульсії - використання роздільної гомогенізації: попереднє розділення молока на вершки та знежирене молоко і обробка лише жирової фази та подачі жирової фази у швидкісний потік знежиреного молока, чим досягається зменшення об'єму емульсії, яка оброблюється, що призводить до пропорційного скорочення енерговитрат;

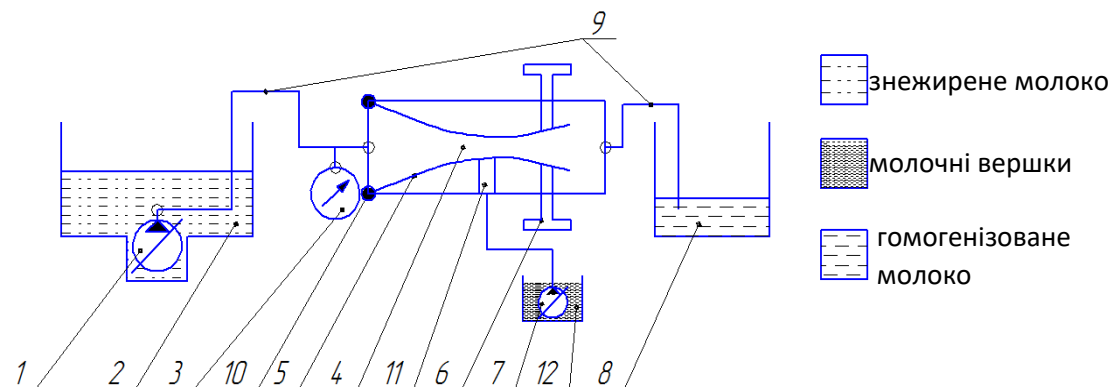


Рис. 1. Схема установки для дослідження процесу струминної гомогенізації: 1 – насос роторного типу; 2 – ємність для знежиреного молока; 3 – манометр; 4 – камера гомогенізації; 5 – направляючі; 6 – регульовальні тяги; 7 – насос подачі жирової фази; 8 – ємність для приймання готового продукту; 9 – трубопроводи; 10 – шарніри; 11 – канал подачі вершків; 12 – ємність для вершків.

Таким чином, для струминного гомогенізатора основним параметром, який визначає ступінь диспергування та енерговитрати процесу є швидкість потоку знежиреного молока. А для пульсаційного – частота і амплітуда коливання поршня.

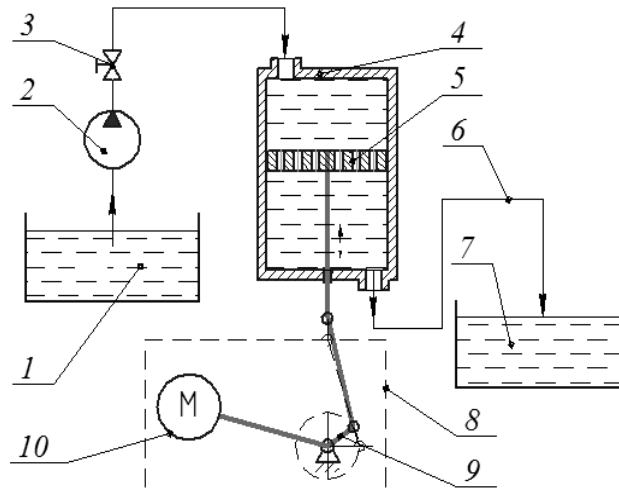


Рис. 2. Схема установки для дослідження процесу ППГ:

1, 7 – технологічні ємності відповідно для подачі та збирання молока; 2 – насос; 3 – вентиль; 4 – робоча камера гомогенізатора; 5 – поршень; 6 – трубопроводи; 8 – привід руху робочого органу; 9 – кривошипний механізм з регулятором амплітуди; 10 – електродвигун з електричним регулятором частоти обертання валу.

Для розробки технології переробки молока при використанні цих двох гомогенізаторів, необхідно встановити залежність між режимами клапанної гомогенізації (які прописані в існуючих технологічних схемах виробництва молочних продуктів) з основними параметрами нових гомогенізаторів.

Формулювання мети статті (постановка завдання). Мета даної статті – визначити параметри струминного та пульсаційного гомогенізаторів молока при їх промисловому застосуванні замість клапанних гомогенізаторів.

Для досягнення поставленої мети необхідно:

- визначити відповідність між тиском клапанної гомогенізації та швидкістю подачі знежиреного молока в струминному гомогенізаторі;
- визначити відповідність між тиском клапанної гомогенізації та частотою та амплітудою коливання поршня в пульсаційному гомогенізаторі;
- визначити відповідність між питомими енерговитратами клапанної гомогенізації та струминної та пульсаційної гомогенізації;

Основна частина. Найбільш популярними та найбільш дослідженими гомогенізаторами є клапанні. Для цього типу гомогенізаторів отримані теоретичні та емпіричні залежності, які пов'язують їх якісні та конструктивно-технологічні параметри [20, 21].

Барановським запропонована формула для визначення середнього діаметра жирових кульок після гомогенізації d , м, в



залежності від надлишкового тиску гомогенізації Δp , Па при температурі 60°C та перепаду тиску в межах $3 \dots 20$ МПа [22]

$$d = \frac{3,8 \cdot 10^{-3}}{\sqrt{\Delta p}}. \quad (1)$$

При двоступінчастій клапанній гомогенізації розмір жирових кульок зменшується додатково на 20%. Але при цьому необхідно враховувати тиск на другій ступені гомогенізації.

Таким чином для клапанних гомогенізаторів визначальним параметром якості диспергування є тиск, який регулюється для встановлення необхідною для заданої технологічної схеми виробництва певного виду продукту. Тому в типових технологічних схемах виробництва молочної продукції вказується температура та тиск гомогенізації, розрахований для клапанних машин.

Для визначення потужності, що споживається клапанним гомогенізатором скористаємося даними [23].

Розраховані залежності для тиску клапанної гомогенізації та середнього діаметру жирових кульок і потужності, що споживається подані в таблиці 1.

Для струминного гомогенізатора основним параметром, який визначає ступінь диспергування молочного жиру (середній діаметр жирових кульок) є швидкість потоку знежиреного молока.

Таблиця 1

Залежність між тиском клапанної гомогенізації та якістю гомогенізації і його питомими енерговитратами

Тиск гомогенізації, МПа	8	9	10	12	14	16	18	20	22
Середній діаметр жирових кульок, мкм	1,35	1,3	1,2	1,1	1	0,95	0,9	0,85	0,8
Питомі енерговитрати, кВт·год/т	3,2	3,5	4	4,8	5,6	6,4	7,2	8	8,2

Для струминного гомогенізатора основні залежності, які пов'язують його параметри (питомі енерговитрати, середній діаметр жирових кульок та швидкість потоку знежиреного молока) подані в публікаціях [24]:

За результатами розрахунку визначені дані відповідності між тиском клапанної гомогенізації та питомими енерговитратами струминного гомогенізатора молока (таблиця 2).



Таблиця 2

Відповідність між тиском клапанної гомогенізації та якістю гомогенізації і швидкістю потоку струминного гомогенізатора та його питомими енерговитратами

Тиск гомогенізації, МПа	8	9	10	12	14	16	18	20	22
Середній діаметр жирових кульок, мкм	1,35	1,3	1,2	1,1	1	0,95	0,9	0,85	0,8
Швидкість потоку струминного гомогенізатора, м/с	29,6	31,1	33,3	36,4	40	42,1	44,4	47,1	50,0
Питомі енерговитрати, кВт·год/т	0,44	0,46	0,49	0,54	0,60	0,62	0,65	0,70	0,74

Для пульсаційного гомогенізатора основним параметром, який визначає ступінь диспергування молочного жиру (середній діаметр жирових кульок) є амплітуда коливання поршня.

Для пульсаційного гомогенізатора основні залежності, які пов'язують його параметри (питомі енерговитрати, середній діаметр жирових кульок та амплітуду коливання поршня) надані в публікаціях [25]:

За результатами розрахунку визначені відповідності між тиском клапанної гомогенізації та питомими енерговитратами пульсаційного гомогенізатора молока (таблиця 3).

Таблиця 3

Відповідність між тиском клапанної гомогенізації та якістю гомогенізації і амплітудою коливання поршня пульсаційного гомогенізатора та його питомими енерговитратами*

Тиск гомогенізації, МПа	8	9	10	12	14	16	18	20	22
Середній діаметр жирових кульок, мкм	1,35	1,3	1,2	1,1	1	0,95	0,9	0,85	0,8
Амплітуда коливання поршня пульсаційного гомогенізатора, с ⁻¹	5,9	6,5	7,4	8,8	10,7	11,8	13,2	14,8	16,7
Питомі енерговитрати, кВт·год/т	0,34		0,43	0,52	0,63	0,7	0,77	0,87	0,98

* – при продуктивності технологічної лінії 2,5 т/год.



Отримані дані (таблиці 4.1-4.3) дають змогу визначити необхідні основні технологічні параметри, які визначають якість гомогенізації, для розроблених гомогенізаторів (пульсаційного та струминного) в залежності від даних, вказаних для клапанної гомогенізації. Таким чином будь-яка класична технологічна схема виробництва молочних продуктів може бути легко застосована для використання розроблених гомогенізаторів зі зниженими енерговитратами.

Висновки. Проведені розрахунки для визначення дисперсності молочної емульсії для пульсаційного та струминного гомогенізаторів.

Розроблені таблиці для перерахунку режимів роботи пульсаційного та струминного гомогенізаторів для приведення їх значень до класичної-клапанної гомогенізації, які дають змогу визначити необхідні режими роботи розроблених гомогенізаторів для будь якого виду молочної продукції.

Встановлено ступінь зниження питомих енерговитрат для розроблених гомогенізаторів в залежності від необхідної якості гомогенізації (середнього розміру жирових кульок молочної емульсії).

Список використаних джерел

1. Кюрчев С. В., Самойчук К. О., Ялпачик В. Ф. Розробка експериментального зразка пульсаційного гомогенізатора молока. *Праці Таврійського державного агротехнологічного університету*. 2023. Вип. 23, т. 1. С. 15–25.

2. Ковальов О. О., Самойчук К. О., Фучаджи Н. О. Методологія дослідження параметрів струминних гомогенізаторів молока. *Праці Таврійського державного агротехнологічного університету*. 2023. Вип. 13, т. 1. С. 1–15. <https://doi.org/10.31388/2220-8674-2023-1-15>.

3. Rayner M., Dejmek P. Engineering Aspects of Emulsification and Homogenization in the Food Industry. CRC Press, Taylor & Francis Group, 2015. 322 p. <https://doi.org/10.1201/b18436>.

4. 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.

5. Протитечійно-струминна гомогенізація молока: монографія / Г. В. Дейниченко, К. О. Самойчук, С. В. Кюрчев [та ін.]. Мелітополь: Видавничий будинок ММД, 2017. 188 с.

6. Нужин Е. В., Гладушняк А. К. Гомогенизация и гомогенизаторы: монографія. Одесса: Печатный дом, 2007. 264 с.

7. Самойчук К. О., Бойко В. С., Олексієнко В. О., Петриченко С. В., Тарасенко В. Г., Паляничка Н. О., Верхоланцева В. О., Ковальов О. О., Задосна Н. О. Основи розрахунку та конструювання обладнання



переробних і харчових виробництв: підручник / К. О. Самойчук, В. С. Бойко, В. О. Олексієнко [та ін.]. Київ: ПрофКнига, 2020. 428 с.

8. Самойчук К. О., Ковальов О. О. Експериментальні дослідження струминного гомогенізатора з роздільним подаванням жирової фази. *Обладнання та технології харчових виробництв*. 2012. Вип. 28. С. 42–46.

9. Самойчук К. О., Ковальов О. О. Розробка лабораторного зразка струминного гомогенізатору з роздільною подачею вершків. *Праці Таврійського державного агротехнологічного університету*. 2011. Вип. 11, т. 6. С. 77–83.

10. Самойчук К. О., Ковальов О. О., Султанова В. О. Якість та енергетична ефективність процесу струминної гомогенізації молока з роздільною подачею вершків. *Праці Таврійського державного агротехнологічного університету*. 2015. Вип. 15, т. 1. С. 240–248.

11. Монтаж експлуатація і ремонт машин та обладнання переробних підприємств. Навчальний посібник: практикум / В. Ф. Ялпачик, О. П. Ломейко, В. Г. Циб [та ін.]. Мелітополь: Видавничий будинок ММД, 2014. 235 с.

12. Розрахунки обладнання харчових виробництв: навч. посібник / В. Ф. Ялпачик, С. Ф. Буденко, Ф. Ю. Ялпачик [та ін.]. Мелітополь: Видавничий будинок ММД, 2014. 264 с.

13. 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. Vol. 226. e115838. <https://doi.org/10.1016/j.ces.2020.115838>.

14. Morales J., Watts A., McConville J. Mechanical particle-size reduction techniques. *AAPS Adv. Pharm. Sci.* 2016. Vol. 22. P. 165–213. https://doi.org/10.1007/978-3-319-42609-9_4.

15. Технологічне обладнання для переробки продукції тваринництва: лабораторний практикум / В. Ф. Ялпачик, Н. П. Загорко, Н. О. Паляничка [та ін.]. Мелітополь: Видавничий будинок Мелітопольської міської друкарні, 2017. 274.

16. Dhankhar P. Homogenization fundamentals. *IOSR J. Eng.* 2014. Vol. 4. P. 1–8. <https://doi.org/10.9790/3021-04540108>

17. Huppertz T. Homogenization of Milk Other Types of Homogenizer (High-Speed Mixing, Ultrasonics, Microfluidizers, Membrane Emulsification). *Encyclopedia of Dairy Sciences*. 2nd ed. Academic Press: Cambridge, MA, USA, 2011. P. 761–764. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-374407-4.00226-0>

18. Acharyaa S., Mishrab V., Patelc J. Enhancing the mixing process of two miscible fluids: A review. *AIP Conference Proceedings*. 2021. Vol. 2341. e030025. <https://doi.org/10.1063/5.0051818>.



19. 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. Vol. 20. P. 314–320. <https://doi.org/10.1016/j.idairyj.2009.11.018>.

20. 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. Vol. 200. P. 93–114. <https://doi.org/10.1080/00986445.2012.691921>.

21. Yong A., Islam M., Hasan N. The Effect of pH and High-Pressure Homogenization on Droplet Size. *Sigma J. Eng. Nat. Sci.* 2017. Vol. 35. P. 1–22. <https://doi.org/10.26776/IJEMM.02.04.2017.05>.

22. 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. Vol. 226. e115838. <https://doi.org/10.1016/j.ces.2020.115838>.

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

24. 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.* 2020. Vol. 60. e102311. <https://doi.org/10.1016/j.ifset.2020.102311>.

25. 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. Vol. 78. P. 199–205. https://doi.org/10.1111/1750_3841.12029.

Дослідження виконано в рамках науково-технічної роботи "Розроблення технології переробки молочних продуктів з використанням нових типів гомогенізаторів", яка фінансувалась МОН за договором № ДЗ/132 - 2022.

Стаття надійшла до редакції 02.02.2024 р.



S. Kiurchev¹, K. Samoichuk¹, O. Lomeiko¹

¹Dmytro Motornyi Tavria State Agrotechnological University

DETERMINATION OF THE PARAMETERS OF FLOW AND PULSATION MILK HOMOGENIZERS IN THEIR INDUSTRIAL APPLICATION

Summary

One of the main problems of the food and processing industry of Ukraine is the insufficient technical and technological efficiency of the production of products, which are finely dispersed emulsions. For the implementation of the developed effective jet and pulsation homogenizers, it is necessary to develop the technology of their use in production. And for this, the main obstacle is the lack of data on the comparison of valve (existing) homogenization modes with newly developed homogenizers. For a jet homogenizer, the main parameter that determines the degree of dispersion and energy consumption of the process is the flow rate of skimmed milk. And for pulsating - the frequency and amplitude of piston oscillation. To develop a milk processing technology when using these two homogenizers, it is necessary to establish the relationship between valve homogenization modes (which are prescribed in the existing technological schemes for the production of dairy products) with the main parameters of the new homogenizers. The purpose of this article is to determine the parameters of jet and pulsating milk homogenizers when they are used industrially instead of valve homogenizers. To achieve the set goal: the correspondence between the pressure of the valve homogenization and the speed of supply of skimmed milk in the jet homogenizer is determined; the correspondence between valve homogenization pressure and the frequency and amplitude of piston oscillation in the pulsating homogenizer is determined; the correspondence between the specific energy consumption of valve homogenization and jet and pulsation homogenization is determined. The data obtained as a result of research make it possible to determine the necessary basic technological parameters that determine the quality of homogenization for the developed homogenizers (pulsation and jet), depending on the data specified for valve homogenization. Thus, any classic technological scheme of dairy production can be easily applied to use the developed homogenizers with reduced energy consumption.

Keywords: homogenization, milk dispersion, jet homogenizer, pulsating homogenizer, technology.