

**DOI: 10.32782/2220-8674-2024-24-2-5**

УДК 637.134

О. О. Ковальов, к.т.н., ст. викл.,

ORCID: 0000-0002-4974-5201

К. О. Самойчук, д.т.н, проф.,

ORCID: 0000-0002-3423-3510

Н. О. Паляничка, к.т.н., доц.

ORCID: 0000-0001-8510-7146

*Таврійський державний агротехнологічний університет імені Дмитра Моторного*

e-mail: oleksandr\_kovalov@tsatu.edu.ua, тел.: +380963205531

## **ЗНИЖЕННЯ ЕНЕРГОВИТРАТ ДИСПЕРГУВАННЯ В ПУЛЬСАЦІЙНОМУ ГОМОГЕНІЗАТОРІ РІДКИХ ПРОДУКТІВ**

*Анотація.* В статті проаналізовано конструкції пульсаційних гомогенізаторів рідких продуктів. Результати аналізу дозволяють стверджувати, що для забезпечення якості продукту згідно вимог технологічної документації конструктивні особливості прототипу та аналогу передбачають багаторазову обробку продукту протягом однієї операції. Це призводить до підвищення енергетичних витрат диспергування та зниження продуктивності гомогенізаторів. Запропоновано корисну модель, в якій обґрунтовано доцільність використання 3...5 поршнів-ударників, замість одного. Доведено, що впровадження вдосконалення забезпечить зниження енергетичних витрат диспергування за рахунок підвищення інтенсивності впливу поршнів на продукт протягом одного циклу. Обґрунтовано, що за рахунок збільшення кількості поршнів-ударників можливо досягти підвищення продуктивності обладнання, що досягається за рахунок зниження кратності обробки емульсії в гомогенізаторі.

*Ключові слова:* пульсаційний, кратність обробки, поршень, амплітуда, шток, знежирене молоко, диспергування, вершки

*Постановка проблеми.* Питання енергетичної ефективності переробки продуктів харчування в молокопереробній галузі безпосередньо корелює з конкурентоздатністю продукції на внутрішньому та зовнішньому ринках України. Окрім високої якості, яка має забезпечуватись на кожному етапі переробки сировини, задля відповідності вимогам нормативної документації та міжнародних стандартів, важливо забезпечити мінімальні витрати енергії на кожному з етапів технологічного процесу. Однією з нормативних операцій, на виконання якої витрачається суттєвий відсоток витрат енергії в відсотковому відношенні до загальних енерговитрат технологічного процесу є диспергування молочного жиру (гомогенізація) [1]. Метою її проведення є 3-4 разове зменшення середнього діаметра жирових кульок, внаслідок чого забезпечується рівномірний розподіл дисперсної фази (вершків) в об'ємі молочної



плазми (дисперсійна фаза). Здійснення гомогенізації попереджає розшарування молочних продуктів та втрату цінного молочного жиру на стінках обладнання та тари, сприяє покращення смакових якостей та засвоюваності продукту [2].

До характерних особливостей процесу диспергування молочного жиру належать високі значення питомих витрат електроенергії, які для найбільш поширених в галузі клапанних гомогенізаторів складають більше 7 кВт·год/т переробленого продукту [1-4]. Цей тип диспергаторів забезпечує отримання продукту, середній діаметр жирових кульок в якому знаходиться на рівні вимог технологічної документації та складає 0,75-0,80 мкм. Численні спроби зниження надмірних витрат клапанних гомогенізаторів дозволили дослідникам висунути близько 10 гіпотез процесу. Між тим, жодна з них повною мірою не пояснює процеси, які відбуваються в області клапанної щілини. Протириччя в гіпотезах пояснюються як складністю проведення досліджень, що пов'язано з мікроскопічними розмірами часток дисперсної фази та швидкостями руху рідини, що перевищують 100 м/с, так і парадоксами гідродинаміки [2]. Конструкції, які були створені на базі відомих гіпотез або мають високі значення енергетичних витрат диспергування (мікрофлюїдизатори, клапанні), або не забезпечують відповідність продуктів вимогам нормативної документації (вакуумні, вібраційні, електрогідравлічні) [1,5].

*Аналіз останніх досліджень.* Дослідження наукових основ процесу диспергування дозволило вченим стверджувати, що підвищення енергоефективності диспергування можливе за реалізації одного з таких принципів, як:

- пошук оптимальної форми камери гомогенізації [6,7];
- вдосконалення конструкцій ромбічної, Т-подібного та П-подібного міні-міксерів [1,8];
- зміні гідродинамічних параметрів потоку, або застосуванням додаткових елементів, які мають забезпечувати інтенсифікацію процесу руйнування жирових кульок [9,10].

Одним з можливих шляхів було названо дослідження та впровадження конструкцій, принцип дії яких засновано на створенні максимальної різниці швидкостей (або прискорень) між знежиреним молоком та вершками, як окремими фазами процесу диспергування [4]. До конструкцій такого типу належить пульсаційний гомогенізатор молока, в якому на молочну емульсію, що знаходиться в камері гомогенізації здійснюються інтенсивні впливи імпульсів, які виникають внаслідок зворотно-поступового руху робочих органів. Поршень-ударник, що закріплений на вертикальному штоці забезпечує зворотно-поступальний рух поршня вниз та вгору.



Знежирена фаза молока при руху поршню вниз або вгору має певну швидкість відносного руху, внаслідок чого вона захоплює жирові кульки, які рухаються в протилежному до руху знежиреного молока напрямку, що пояснюється дією сил інерції [11]. Такий механізм створює необхідні гідродинамічні передумови для руйнування часток жирової фази [12]. Проведені аналітичні дослідження, дані яких підтверджені пошуковими експериментами дозволяють стверджувати, що використання диспергатору імпульсного типу здатне забезпечити зменшення середнього діаметра жирових кульок до верхньої межі технологічно обумовлених значень (0,8 мкм) [10]. Питомі витрати енергії при дослідженнях лабораторного зразку гомогенізатора цього типу складають близько 1,5 кВт·год/т переробленого продукту [13]. Це свідчить про те, що при забезпеченні необхідної якості переробки молочної сировини, використання пульсаційних гомогенізаторів здатне забезпечити майже 6-кратне енергозбереження відносно конструкцій клапанного типу.

*Формулювання цілей статті (постановка завдання).* Метою даної статті є дослідження можливості подальшого зниження енергетичних витрат диспергування. Додатково досліджувалась можливість підвищення продуктивності пульсаційного гомогенізатора молока. Для досягнення поставленої мети вирішувались наступні задачі:

- проводився аналіз конструктивного рішення, принципу роботи, переваг та недоліків прототипу та аналогу;
- здійснювалось обґрунтування конструктивного рішення пульсаційного гомогенізатора молока, в якому за рахунок збільшення кількості поршнів-ударників скорочується кратність обробки продукту, що дозволить прогнозовано досягти зниження енергетичних витрат процесу та забезпечити підвищення продуктивності пульсаційного гомогенізатора молока.

*Основна частина.* В якості аналогу розглядалась конструкція пульсаційного гомогенізатора молока, яка використовується для переробки рідких продуктів, зокрема в молокопереробній галузі. Основу цього диспергатора складає циліндр, в якому встановлюється поршень-ударник, що здійснює зворотно-поступові рухи за рахунок імпульсів від штоку [14]. Конструктивні особливості поршня, передбачають наявність в ньому наскрізних отворів, які мають форму дифузорів та основа яких критичним перерізом розташовується на глибині, що дорівнює половині товщини поршня-ударника. В верхній та нижній частинах циліндр обладнаний патрубками підведення сировини та відведення гомогенізованої емульсії. Також конструкцію оснащено насосом, який забезпечує нагнітання продукту з пульсацією, частота яких співпадає з частотою коливань поршня-ударника [14].



Сировина для обробки за допомогою насосу з пульсацією крізь патрубок подачі під тиском подається до циліндру. Проходячи крізь наскрізні отвори, що виконані в поршні-ударнику, емульсія прямує до нижньої частини циліндру. При певних значеннях частот пульсації насосу та коливань поршня-ударнику, що обумовлене імпульсами від штоку виникають резонансні коливання рідини, що в свою чергу призводить до ковзання жирових кульок молока відносно молочної плазми, а відтак-до руйнування жирових кульок за рахунок створення максимальної різниці швидкостей фаз [14]. Готовий продукт у вигляді гомогенізованої емульсії відводиться крізь відповідний патрубок.

Результати аналітичних досліджень описаного диспергатора, підтверджені проведенням експериментальних досліджень, свідчать, що мінімально достатня для досягнення необхідної якості вихідного продукту кратність проходження продукту крізь наскрізні отвори в поршні-ударнику складає 12 разів [10,15]. Таким чином багатократна обробка продукту при здійсненні однієї операції технологічного процесу призводить до зниження продуктивності диспергатора, а використання одного поршня-ударника обумовлює підвищення енергетичних витрат диспергування [4,10].

В якості прототипу вдосконалення розглянемо гомогенізатор для рідких продуктів, який складається з циліндру, в якому передбачені патрубки підведення сировини та відведення готової продукції та встановлено поршень-ударник, який здійснює зворотно-поступальні рухи в вертикальному напрямку за рахунок імпульсних рухів штока. Характерною особливістю поршня-ударника, є наявність в ньому наскрізних отворів, виконаних у вигляді дифузорів з кутом конусності  $45-55^\circ$  та основа яких розташовується критичним перерізом на глибині, що дорівнює половині товщини поршня-ударника [16].

Молочна сировина, що піддається гомогенізації надходить до верхньої порожнини циліндру крізь патрубок подачі. В подальшому, прямуючи крізь отвори дифузорів та зазор між циліндром і поршнем-ударником, жирова фаза емульсії зазнає впливу швидкісних струменів емульсії, що утворюються в місцях виходу з наскрізних отворів дифузорів у поршні-ударнику. Максимальна швидкість струменів, яка забезпечує підвищення якості диспергування жирової фази забезпечується при виконанні дифузорів з кутом конусності  $45-55^\circ$  [16].

До недоліків наведеного пристрою належить низька продуктивність, що пояснюється наявністю в конструкції лише одного поршня-ударника. Крім того, виходячи з вимог технологічної документації та міжнародних стандартів, задля забезпечення не тільки високої дисперсності, а й необхідної рівномірності складу, емульсія має пройти крізь отвори в поршні-ударнику, щонайменше 12 разів, що



обумовлює підвищення енергетичних витрат диспергування при впровадженні даної корисної моделі [10,13].

Пропоноване вдосконалення розглянутих вище конструкцій полягає у встановленні до циліндру додаткових поршнів-ударників, що прогнозовано призведе до зниження енергетичних витрат диспергування та дозволить підвищити продуктивність пульсаційного гомогенізатора рідких продуктів [17,18]. Для вирішення поставленого завдання в циліндр, що складається з циліндру з патрубками підведення та відведення молока та встановлений на штоці поршень-ударник, який має наскрізні отвори відповідно до запропонованої корисної моделі додатково обладнується поршнями-ударниками в кількості 3...5.

Встановлення додаткових поршнів-ударників забезпечує підвищення рівномірності впливу робочих поверхонь отворів дифузорів в поршні-ударнику на емульсію, що в свою чергу обумовлює підвищення продуктивності пульсаційного гомогенізатора за рахунок скорочення кількості циклів обробки продукту протягом однієї технологічної операції [19]. Отримання прогнозованого ефекту підвищення продуктивності підтверджує аналітична залежність для пульсаційного гомогенізатора (1) [10,20]

$$Q = \frac{\pi D^2 S n N}{2K}, \quad (1)$$

де Q- продуктивність гомогенізатора, м<sup>3</sup>/с;

D- діаметр поршня, м;

S- амплітуда коливань поршня, м;

n- частота коливання поршня с<sup>-1</sup>;

N– кількість поршнів, шт.;

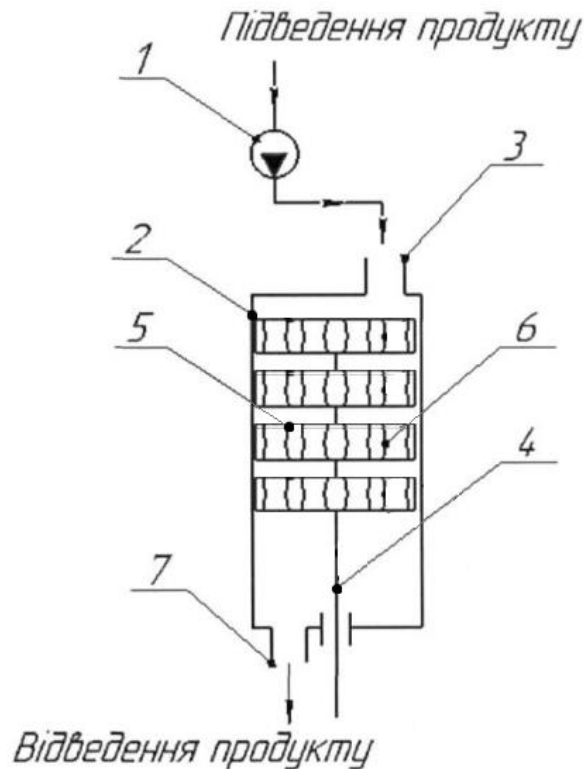
K-кратність обробки емульсії

Збільшення кількості поршнів-ударників призводить до підвищення потужності, що витрачається для роботи гомогенізатора. Результати проведених досліджень, наведені в [10] дозволяють стверджувати, що мінімальні значення енергетичних витрат диспергування досягаються при використанні конструкції, що містить 3...5 поршнів-ударників.

Запропонований пульсаційний гомогенізатор для рідких продуктів (рис.1) складається з насосу 1, що забезпечує подачу сировини, циліндру 2, патрубку підведення 3, штоку 4, поршнів-ударників 5 з наскрізними отворами 6 в формі дифузорів та патрубку відведення гомогенізованої емульсії 7.

При роботі пристрою насос 1 забезпечує подачу сировини через патрубків подачі 3 до верхньої частини циліндру 2. В подальшому емульсія через наскрізні отвори 6 у поршнях-ударниках 5 прямує до

нижньої порожнини циліндру. Зменшення середнього діаметру часток дисперсної фази відбувається в результаті коливань рідини, що обумовлюється імпульсним рухом штока 4, що здійснює зворотно-поступові переміщення в вертикальному напрямку. Гомогенізована емульсія відводиться крізь патрубок 7.



1–насос- для подачі сировини; 2–циліндр; 3–патрубок підведення сировини; 4–шток; 5–поршні-ударники; 6–наскрізні отвори; 7–патрубок відведення гомогенізованої емульсії

Рис. 1. Пульсаційний гомогенізатор для рідких продуктів

Молочні продукти, які переробляються з використанням пульсаційного гомогенізатора для рідких продуктів задовольняють вимогам споживачів, нормативних документів та міжнародних стандартів якості як за середнім діаметром жирових кульок так і за рівномірністю дисперсності продукту.

*Висновки.* Низька енергоефективність диспергування все ще залишається суттєвою проблемою для науковців та фахівців молокопереробної галузі. Тому з метою зниження енергетичних витрат процесу диспергування при одночасному забезпеченні високої якості за показниками середнього діаметра жирових кульок та рівномірності їх розподілу був проведений аналіз конструкцій пульсаційних гомогенізаторів для рідких продуктів.

Результати проведеного аналізу свідчать, що конструкції прототипу та аналогу характеризуються високими значеннями



енергетичних витрат, що пояснюється використанням одного поршня-ударника. Крім цього в розглянутих конструкціях досягається гомогенізація, як операція по зменшенню середнього діаметра жирових кульок, але для забезпечення рівномірності дисперсного складу продукту на рівні вимог нормативної документації та потенційних покупців, продукт має зазнавати багаторазового впливу в межах однієї операції технологічного процесу, що знижує продуктивність диспергаторів цього типу.

Запропоновано корисну модель, в якій рекомендовано встановити 3...5 поршнів-ударників. Рекомендована межа кількості поршнів обумовлена мінімізацією енергетичних витрат диспергування при отриманні продукту на рівні вимог технологічної документації. Збільшення кількості поршнів-ударників забезпечить підвищення продуктивності за рахунок зниження тривалості обробки продукту протягом однієї технологічної операції. Однак основним ефектом вдосконалення буде зниження енергетичних витрат на проведення диспергування, що пояснюється зниженням кратності обробки продукту, що досягається за рахунок більш інтенсивного впливу поршнів-ударників. Таким чином, впровадження запропонованого вдосконалення дозволить отримати продукт з високими показниками дисперсності та рівномірності розподілу за умови підвищення продуктивності та зниження енергетичних витрат диспергування.

#### *Список використаних джерел*

1. Huppertz T. Homogenization of Milk|Other Types of Homogenizer (High-Speed Mixing, Ultrasonics, Microfluidizers, Membrane Emulsification). Encyclopedia of Dairy Sciences, 2nd Edition, 2011. P. 761–764.
2. Innings F., Trägårdh C. Visualization of the drop deformation and break-up process in a high pressure homogenizer. *Chem. Eng. Technol.* 2005. Vol. 28. P. 882–891.
3. Ковальов О. О. Обґрунтування параметрів струминно-щілинного гомогенізатора молока з роздільною подачею вершків : автореф. дис. ... канд. техн. наук : 05.05.11 / ТДАТУ. Мелітополь, 2021. 20 с.
4. Самойчук К. О. Розвиток наукових основ гідродинамічного диспергування молочних емульсій: автореф. дис ... док. техн. наук: 05.18.12. Харків, 2018 . 44 с.
5. Liao Y. X., 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.
6. Нужин Е. В., Гладушняк А. К. Гомогенизация и гомогенизаторы: монография. Одесса: Печатный дом, 2007. 264 с.



7. Tartar L. The General Theory of Homogenization. *Lecture Notes*. 2009. P. 470.
8. Dhankhar P. Homogenization fundamentals. *IOSR Journal of Engineering*. 2014. Vol. 4(5). P. 1-8.
9. Vladislavjevic G., Al Nuumani R., Nabavi S. Microfluidic production of multiple emulsions. *Micromachines*. 2017. Vol. 8. P. 75.
10. Самойчук К. О., Левченко Л. В., Циб В. Г. Обґрунтування параметрів отворів поршня пульсаційного гомогенізатора молока. *Праці ТДАТУ*. 2018. Вип. 18, т. 1. С. 274–280.
11. Walstra P., Wouters J. T. M. and Geurts T. J. Homogenization. In: *Dairy Science and Technology*. Second Edn. Taylor & Francis Group, LLC. Boca Raton London New York. 2006. 279 p.
12. Ward K., Fan Z. H. Mixing in Microfluidic Devices and Enhancement Methods. *J. Micromech. Microeng.* 2015. Vol. 25(9). P. 94001–94017.
13. Дейниченко Г. В., Самойчук К. О., Левченко Л. В. Вплив кратності обробки молочної емульсії в пульсаційному гомогенізаторі. *Прогресивні техніка та технології харчових виробництв ресторанного господарства і торгівлі*. 2016. Вип.2 (24) С. 226–233.
14. Пульсаційний гомогенізатор для рідких продуктів: пат. № 129459 Україна; МПК<sup>7</sup> В 01 F 5/06. №u201806124; заявл. 01.06.2018; опубл. 25,10,2018. Бюл. №20.
15. Nakansson A., Fuchs L., Innings F., Revstedt J., Trdgardh C., Bergenstehl 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>.
16. Valencia Flores D., Hernandez 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](https://doi.org/10.1111/1750_3841.12029).
17. Гомогенізатор для рідких продуктів: пат. № 121278 Україна; МПК В01F 5/06, В01F 7/00. № u201706676; заявл. 27.06.2017; опубл. 27.11.2017, бюл. № 22.
18. 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>.
19. Samoichuk K., Kovalyov A., Fuchadzhy N., Hutsol T., Jurczyk M., Pajak T., Banaś M., Bezalychna O., Shevtsova A. Energy Costs Reduction for Dispersion Using a Jet-Slot Type Milk Homogenizer. *Energies*. 2023. Vol. 16. P. 2211.





20. Jiang B., Shi Y., Lin G., Kong D., Du J. Nanoemulsion prepared by homogenizer : The CFD model research. *Journal of Food Engineering*. 2019. Vol. 241. P. 105–115.

21. Morales J., Watts A., McConville J. Mechanical particle-size reduction techniques. *AAPS Adv. Pharm. Sci. Ser.* 2016. Vol. 22. P. 165–213.

*Стаття надійшла до редакції 30.09.2024 р.*

**A. Kovalyov, K. Samoichuk, N. Palianychka**  
**Dmytro Motorny Tavria State Agrotechnological University**

### **REDUCED ENERGY VITRATE DISPERSION IN PULSATION HOMOGENISER OF RARE PRODUCTS**

#### *Summary*

The high share of energy costs in the balance of the cost of food processing in Ukraine forces scientists to look for ways to increase the energy efficiency of processing enterprises, in particular, the milk processing industry. Dispersion is one of the technologically mandatory, but at the same time, the most energy-consuming operations of the technological process. The percentage share of energy consumption for carrying out this operation alone is 25-40% in the total energy balance of processing dairy products.

The results of prospective studies indicate that it is possible to achieve a 6-fold reduction in energy costs for dispersion by developing and implementing structures that ensure the intensification of the impact on the product. One example of such a design is a group of pulsating homogenizers for processing liquid products. When they work, the product passes from the upper to the lower cavity of the cylinder, in which a piston-impactor is installed on the rod, due to which the reciprocating movement of the piston and the effect on the product of the jets formed in the area of the through holes of the piston are ensured. The article analyzes the designs of the analogue and prototype of the useful model. The obtained results allow us to state that the design features of the considered useful models cause high values of energy costs when a product is affected by one impactor piston and cause a decrease in productivity due to a large number of product processing cycles in one technological operation.

The proposed design solves the problems of high dispersion energy costs and low productivity by installing additional impact pistons, the number of which should be within 3...5. The proposed improvement will ensure the intensification of the effect of the working bodies of the homogenizer on the product, which will lead to a decrease in the energy costs of the dispersion process and ensure the production of a product with a uniform dispersion composition. Productivity will be increased by reducing the frequency of product processing in the homogenizer.

**Key words:** pulsating, multiplicity of processing, piston, amplitude, stem, milk, dispersion, cream.