

DOI <https://doi.org/10.32782/2078-0877-2025-25-3-20>

УДК 637.134.001.57

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

ORCID: 0000-0001-8510-7146

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

ORCID: 0000-0002-4974-5201

О. О. Червоткіна, асистент

ORCID: 0000-0002-6814-0566

О. П. Прокопенко, асистент

ORCID: 0009-0005-7304-923X

Таврійський державний агротехнологічний університет імені Дмитра Моторного

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

ТЕХНОЛОГІЧНІ АСПЕКТИ СТВОРЕННЯ ПУЛЬСАЦІЙНОГО ГОМОГЕНІЗАТОРА ДЛЯ ДИСПЕРГУВАННЯ МОЛОЧНОЇ СИРОВИНИ

Анотація. У роботі проаналізовано ключові технологічні особливості розроблення пульсаційного гомогенізатора, який застосовується у процесі диспергування молочної сировини. Гомогенізація, що забезпечує диспергування, є одним із провідних етапів технологічної лінії переробки молока та виготовлення молочної продукції. Саме якість виконання цього процесу визначає смакові властивості та споживчі характеристики кінцевого продукту. Разом із тим дослідження довели, що традиційні гомогенізатори відзначаються значними енерговитратами, що робить даний процес одним із найбільш енергоємних у виробництві. Для зниження цих витрат пропонується впровадження нового типу обладнання – пульсаційних гомогенізаторів, здатних забезпечити необхідну якість продукції за істотного зменшення споживання електроенергії. У статті наведено розрахунки основних режимів роботи та параметрів таких апаратів, а також визначено вимоги до їх конструкторських рішень.

Ключові слова: диспергування, конструкція, пульсаційний гомогенізатор, енерговитрати, технологічна лінія, параметри.

Постановка проблеми. Одним із найпоширеніших технологічних процесів є диспергування емульсій шляхом гомогенізації у спеціалізованому обладнанні. Цей метод знаходить застосування в аграрному секторі, харчовій, хімічній, переробній та низці інших галузей промисловості [1]. У харчовому виробництві гомогенізацію широко застосовують для виготовлення молока та молочних продуктів, сумішей для морозива, згущеного молока, майонезів, кетчупів, маргарину, яєчних меланжів, соків та різноманітних харчових товарів. Водночас найбільшого поширення цей процес набув саме у молочної індустрії [2]. Використання гомогенізації у виробництві питного молока дає змогу суттєво поліпшити його органолептичні характеристики, забезпечити кращу стабільність та в'язкість, уникнути осідання жиру на стінках апаратури та підвищити засвоюваність завдяки зменшенню розміру жирових глобул.

Попри виняткову значущість даного технологічного процесу він залишається одним із найбільш енерговитратних. Це пояснюється тим, що найбільш поширеним видом гомогенізаторів, які нині застосовуються у промисловості, є клапанні апарати. Вони здатні забезпечити високий рівень гомогенізації жирової фази молока, проте супроводжуються значним споживанням електроенергії. Головною технічною складністю під час отримання тонкодисперсних емульсій є обмежені можливості таких пристроїв. Саме тому розроблення нових методів та обладнання для формування тонкодисперсних емульсій, які дають змогу регулювати ступінь дисперсності за збереження високої продуктивності, набуває особливої актуальності.

Аналіз останніх досліджень. Останніми роками проблематика диспергування молочного жиру шляхом гомогенізації привернула значну увагу науковців, серед яких варто відзначити Є.В. Нужина, К.О. Самойчука, Г.В. Дейниченко, О.О. Ковальова, а також зарубіжних дослід-

ників: F. Innings, T. Glawdel, C. Liu, Y. Lu, C. Trägårdh та ін. [2–8]. При цьому більшість наукових праць орієнтовано на модернізацію вже існуючого обладнання з метою поліпшення якості гомогенізації та зменшення енерговитрат, тоді як дослідження, присвячені створенню принципово нових типів апаратів, залишаються порівняно малочисельними [7; 8]. Водночас навіть запропоновані інноваційні рішення здебільшого потребують подальшого доопрацювання для досягнення більш оптимальних показників ступеня диспергування та енергоефективності процесу.

За результатами проведеного аналізу встановлено, що найбільш перспективним різновидом гомогенізатора є пульсаційний, оскільки він забезпечує високий рівень диспергування емульсій за відносно низьких енерговитрат. У зв'язку із цим подальші дослідження було зосереджено на визначенні конструктивних особливостей розроблення саме цього типу апаратів.

Формулювання мети статті (постановка завдання). Метою представленої дослідження є узагальнення ключових технологічних аспектів розроблення пульсаційного гомогенізатора для диспергування молочної сировини з подальшою перспективою його впровадження у виробничі лінії переробки молока.

Основна частина. Ключовим технологічним параметром під час випробувань пульсаційного гомогенізатора виступає показник ступеня гомогенізації. Серед промислових зразків обладнання найвищі значення цього показника забезпечують клапанні гомогенізатори: $H_m = 5$. Такий рівень обробки молока вважається достатнім для технологічних процесів виробництва молочних продуктів із застосуванням гомогенізації. У зв'язку із цим зазначене значення було прийнято як розрахункову величину [9].

Робочі режими пульсаційного гомогенізатора, що використовуються для практичних розрахунків, установлюються відповідно до рівняння [10]:

$$0,88 + 0,694h + 0,602f - 0,588Q + 0,2h \cdot f + 0,426h^2 - 0,663f^2 - 0,459Q^2 = 0. \quad (1)$$

Розрахунок діаметра робочої камери гомогенізатора здійснюється за формулою:

$$D = \frac{Q}{\pi \cdot \delta \cdot v_\delta \cdot \varepsilon_1 \cdot \varphi_1}, \quad (2)$$

де Q – продуктивність пульсаційного гомогенізатора, кг/год;

δ – відстань (зазор) між поверхнею циліндра та поршнем, м;

v_δ – швидкість переміщення продукту, що піддається гомогенізації, у проміжку між циліндром і поршнем, м/с;

ε_1, φ_1 – коефіцієнти звуження та швидкості, характерні для плоскої щілини.

Довжину робочої камери пульсаційного гомогенізатора визначають за формулою:

$$L = 4 \frac{Q}{\pi \cdot D^2 \cdot f}, \quad (3)$$

де f – частота коливання робочого поршня, Гц.

Одним із визначальних чинників, що впливають на ступінь диспергування, виступає геометрична конфігурація отворів робочого поршня. Результати досліджень засвідчили, що найбільш ефективною є конічна форма отворів із кутом конусності 45° , яка забезпечує максимальну швидкість потоку та високу продуктивність процесу. Діаметр отворів робочого поршня обмежується як величиною діаметра самого поршня, так і технологічними можливостями виготовлення конусних отворів мінімального діаметра.

Розрахунок діаметра робочих поршнів здійснюється за формулою:

$$d_{\text{пор}} = D - 2\delta. \quad (4)$$



За умови мінімально допустимого діаметра отворів у промислових машинах (2–3 мм) розмір жирових глобул зменшується приблизно на три порядки. Подальше скорочення діаметра отворів не чинить істотного впливу на ступінь подрібнення. У конструкції пульсаційного гомогенізатора діаметр отворів та ширина зазору між робочими поршнями і камерою становлять 2 мм. Відповідно, оптимальні розміри отворів робочих поршнів визначаються як: $d_{\text{вихд}} = 0,008$ м; $d_{\text{вих}} = 0,002$ м. Кількість отворів при цьому повинна бути максимально можливою з урахуванням вимог до міцності робочого органу гомогенізатора.

Товщину робочих поршнів пульсаційного гомогенізатора обчислюють за такою залежністю:

$$S_{\text{пор}} = 2 \dots 6 \cdot d_{\text{отв}}, \quad (5)$$

де $d_{\text{отв}}$ – діаметр отворів робочих поршнів, м.

Продуктивність пульсаційного гомогенізатора розраховується відповідно до формули:

$$Q = Q_{\delta} + Q_k, \quad (6)$$

де Q_{δ} – надходження молока крізь зазор між камерою та робочим поршнем;

Q_k – пропускання молока через конічні отвори робочого поршня.

$$Q_{\delta} = \pi \cdot D \cdot \delta \cdot v \cdot \varepsilon_1 \cdot \varphi_1, \quad (7)$$

де D – діаметр камери, м;

δ – проміжок (зазор) між камерою та робочим поршнем, м;

v – швидкість переміщення продукту, що гомогенізується, у зазорі між камерою та робочим поршнем, м/с;

ε_1, φ_1 – коефіцієнти звуження та швидкості, характерні для плоскої щілини.

$$Q_k = \varepsilon_2 \cdot \varphi_2 \cdot n \cdot \frac{\pi d_{\text{отв}}^2}{4} \sqrt{\frac{2}{\rho_c} \cdot \Delta p}, \quad (8)$$

де ε_2, φ_2 – коефіцієнти звуження та швидкості, що характеризують отвори у робочому поршні;

n – кількість отворів у робочому поршні;

$d_{\text{отв}}$ – діаметр отворів, м;

Δp – перепад тиску до та після робочого поршня, Па.

$$Q_{\delta} = 3,14 \cdot 0,3 \cdot 0,02 \cdot 0,125 \cdot 1 \cdot 0,71 = 619 \text{ кг/год};$$

$$Q_k = 0,875 \cdot 0,983 \cdot 16 \cdot \frac{3,14 \cdot 0,004^2}{4} \cdot \sqrt{\frac{2}{1029} \cdot 2} = 1183 \text{ кг/год};$$

$$Q = 619 + 1183 = 1802 \text{ кг/год}.$$

Таким чином, мінімальна продуктивність пульсаційного гомогенізатора становить приблизно 1800 кг/год. Для забезпечення вищої якості процесу та підвищення продуктивності сумарна площа отворів у робочому поршні повинна бути максимально можливою:

$$n \frac{\pi d_{\text{отв}}^2}{4} \rightarrow \max. \quad (9)$$

Гранична кількість та діаметр отворів обмежуються міцнісними характеристиками матеріалу робочого поршня.

Потужність гомогенізатора розраховується за формулою:

$$N = \frac{c \cdot \rho_M \cdot v^3 \cdot S}{2 \cdot \eta_n \cdot \eta_e}, \quad (10)$$

де c – коефіцієнт опору для круглої пластини, $c = 1,1 \dots 1,15$;



S – площа робочого поршня, м^2 ;

v – швидкість переміщення робочого поршня (подача), м/с ;

η_n – коефіцієнт корисної дії насоса;

η_e – коефіцієнт корисної дії електродвигуна.

Теоретичний розрахунок основних конструктивних параметрів гомогенізатора здійснювався на основі залежностей (1–10), значення яких наведено в табл. 1.

Таблиця 1

Розрахункові значення параметрів пульсаційного гомогенізатора

Продуктивність пульсаційного гомогенізатора Q , кг/год	Граничне значення імпульсного тиску, МПа	Довжина камери пульсаційного гомогені- затора, м	Діаметр камери пульсаційного гомогені- затора, м	Потужність гомогенізатора, N , кВт
1800	1,5	0,5	0,3	2

До основних вимог безпеки, що висуваються до конструкцій машин і механізмів, належать забезпечення захисту життя та здоров'я працівників під час монтажу, налагодження, експлуатації й очищення обладнання, а також гарантування його надійності та зручності у використанні.

Під час виготовлення пульсаційного гомогенізатора молока до матеріалів і комплектуючих висуваються такі технічні вимоги [4; 10]:

- елементи та вузли установки, що безпосередньо контактують із молоком та молочними продуктами (ємність, шток, поршень, верхня і нижня кришки, патрубок), повинні виготовлятися з високоякісної харчової нержавіючої сталі (наприклад, X18H9T, X18H10T та ін.);
- деталі й кріпильні елементи, які не мають контакту з продуктом (рама, кривошип, шпилька, опора, корпус підшипника, муфта, вал, ніжка), виготовляються з вуглецевої конструкційної сталі загального призначення (Ст. 3, Ст. 5, сталь 20, сталь 30 тощо);
- насос, що застосовується у пульсаційному гомогенізаторі, повинен бути спеціально призначений для перекачування молочних продуктів, мати проточну частину з харчової бронзи та забезпечувати необхідний тиск рідини;
- привід УШМ в установці використовується загального призначення з номінальною потужністю 2,4 кВт;
- скляні елементи (циліндр) виготовляються зі скла підвищеної міцності;
- гнучкий трубопровід має бути виконаний із ПВХ, придатного для харчових продуктів;
- трубопроводи та гідравлічні елементи високого тиску (вентилі, запірні арматура) виготовляються з легованої корозійностійкої харчової сталі, латуні або міді.

Таким чином, за результатами проведеного аналізу визначено, що пульсаційний гомогенізатор молока характеризується такими параметрами: продуктивність – 1800 кг/год, максимальний тиск – 1,5 МПа, довжина робочої камери – 0,5 м, діаметр робочої камери – 0,3 м за встановленої потужності 2 кВт.

У разі потреби параметри гомогенізатора можуть бути скориговані на основі наведених розрахунків, що дає змогу отримати установку з необхідними вихідними характеристиками залежно від потужності конкретного промислового підприємства.

Висновки. Процес диспергування шляхом гомогенізації належить до найбільш значущих технологічних операцій у виробничій лінії переробки молока та виготовлення молочних продуктів. Від рівня якості його виконання залежать смакові та сенсорні характеристики кінцевої продукції, а також мінімізуються втрати жиру, що можуть виникати внаслідок його осідання на стінках тари. Сучасне обладнання, яке широко застосовується на підприємствах, забезпечує високий рівень гомогенізації, проте відрізняється значними енергетичними витратами. В умовах сьогодення це

є істотним недоліком, що потребує усунення. Попередні дослідження дали змогу виділити новий перспективний тип обладнання – пульсаційний гомогенізатор. У роботі наведено результати розрахунків основних параметрів і режимів його функціонування та визначено вимоги до конструктивного виконання. Проведений аналіз показав, що пульсаційний гомогенізатор молока характеризується такими параметрами: продуктивність – 1800 кг/год, максимальний тиск – 1,5 МПа, довжина робочої камери – 0,5 м, діаметр робочої камери – 0,3 м за встановленої потужності 2 кВт. За потреби зазначені параметри можуть бути відкориговані на основі проведених розрахунків, що дає змогу адаптувати установку до потужності конкретного виробничого підприємства.

У подальшому планується виконання експериментальних досліджень у виробничих умовах для визначення доцільності застосування пульсаційного гомогенізатора у технологічній лінії виготовлення йогуртів.

Список використаних джерел

1. Samoichuk K., Zhuravel D., Viunyk O., Milko D., Bondar A., Sukhenko Y., Sukhenko V., Adamchuk L., Denisenko S. Research on milk homogenization in the stream homogenizer with separate cream feeding. *Potravinarstvo Slovak Journal of Food Sciences*. Nitra, Slovakia 2020. Vol. 14. P. 142–148.
2. Håkansson A., Innings F., Trägårdh C., Bergenståhl B. A high-pressure homogenization emulsification model–Improved emulsifier transport and hydrodynamic coupling. *Chemical Engineering Science* 91. 2013. P. 44–53. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ces.2013.01.011>.
3. Guo X., Chen M., Li Y., Liu C. Modification of food macromolecules using dynamic high-pressure microfluidization: A review. *Trends in Food Science & Technology* 100. 2020. 223–234. DOI: <https://doi.org/10.1103/PhysRevE.86.026308>.
4. Glawdel T., Ren C.L. III. Dynamic surfactant effects. *Physical Review E* 86. 2012. 026308. DOI: <https://doi.org/10.1103/PhysRevE.86.026308>.
5. Lu Y., Mao L., Hou Z., Miao S., Gao Y. Development of Emulsion Gels for the Delivery of Functional Food Ingredients: From Structure to Functionality. *Food Engineering Reviews* 11. 2019. 245–258. DOI: 10.3389/fnut.2022.890188.
6. 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. *Chemical Engineering Communications* 200(1). (2013). 93–114. DOI: 10.1080/00986445.2012.691921.
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. Ковальов О.О., Левченко Л.В., Самойчук К.О. Енергетичні витрати перспективних конструкцій гомогенізаторів молока. *Наукові здобутки у вирішенні актуальних проблем виробництва та переробки сировини, стандартизації і безпеки продовольства* : збірник праць за підсумками VII міжнар. наук.-практ. конф., 27–28 квітня 2017 р. Київ : НУБІП, 2017. С. 315–316.
9. Дейниченко Г.В., Самойчук К.О., Левченко Л.В. Аналітичні дослідження енерговитрат пульсаційного гомогенізатора молока. *Прогресивні техніка та технології харчових виробництв ресторанного господарства і торгівлі*. 2016. Вип. 1(23). С. 170–181.
10. Palianychka N., Samoichuk K., Verkholtantseva V., Sova N., Kholobtseva I. Quality Improvement of Emulsions Dispersion in the Pulsation Homogenizer Using Computer Simulation. *Lecture Notes in Mechanical Engineering*, Odesa. 735–745.
11. Паляничка Н.О. Визначення основних параметрів і режимів роботи промислового зразка імпульсного гомогенізатора молока. *Праці Таврійського державного агротехнологічного університету*. 2015. Вип. 15. Т. 1. С. 187–191.

Стаття надійшла до редакції 25.09.2025

Стаття прийнята 09.10.2025

Статтю опубліковано 25.11.2025





N. Palianychka, A. Kovalov, O. Chervotkina, O. Prokopenko

Dmytro Motornyi Tavria State Agrotechnological University

TECHNOLOGICAL ASPECTS OF CREATING A PULSE HOMOGENIZER FOR DISPERSING MILK RAW MATERIAL

Summary

One of the most common technological processes is the dispersion of emulsions by homogenization in specialized equipment. This method is used in the agricultural sector, food, chemical, processing and a number of other industries. In food production, homogenization is widely used for the production of milk and dairy products, ice cream mixes, condensed milk, mayonnaise, ketchup, margarine, egg melanges, juices and various food products. At the same time, this process has become most widespread in the dairy industry. The use of homogenization in the production of drinking milk allows you to significantly improve its organoleptic characteristics, ensure better stability and viscosity, avoid fat deposition on the walls of the equipment and increase digestibility by reducing the size of fat globules. Modern equipment, which is widely used in enterprises, provides a high level of homogenization, but is characterized by significant energy costs. The main technical difficulty in obtaining fine emulsions is the limited capabilities of such devices. That is why the development of new methods and equipment for the formation of fine emulsions, which allow you to adjust the degree of dispersion while maintaining high productivity, is becoming particularly relevant. Previous studies have allowed us to identify a new promising type of equipment – a pulsating homogenizer. The paper presents the results of calculations of the main parameters and modes of its operation and defines the requirements for its design. The analysis showed that the pulsating milk homogenizer is characterized by the following parameters: productivity – 1800 kg/h, maximum pressure – 1.5 MPa, working chamber length – 0.5 m, working chamber diameter – 0.3 m at an installed power of 2 kW. If necessary, these parameters can be adjusted based on the calculations, which allows you to adapt the installation to the capacity of a specific production enterprise.

Keywords: dispersion, design, pulsating homogenizer, energy consumption, technological line, parameters, product, quality, energy consumption, dairy products.