

УДК 637.134

DOI: 10.31388/2078-0877-2020-20-4-266-274

## АНАЛІЗ КОНСТРУКЦІЙ ГОМОГЕНІЗАТОРІВ МОЛОКА

Ковальов О. О., інженер

ORCID 0000-0002-4974-5201

*Таврійський державний агротехнологічний університет імені Дмитра Моторного*

e-mail: ophv@tsatu.edu.ua

*Постановка проблеми.* Гомогенізація являє собою технологічний процес, який виконується для більшості молочних продуктів. Його метою є зменшення середнього діаметра жирових кульок (СЖК) та забезпечення їх рівномірного розподілу в об'ємі молочної плазми. Однак, для отримання молочної емульсії, показники дисперсності якої знаходяться в межах технологічно обумовлених значень (0,8-1,2 мкм) питомі енерговитрати для найбільш розповсюджених в промисловості клапанних гомогенізаторів можуть сягати понад 8 кВт·год/т гомогенізованого молока [1]. Разом з цим слід відзначити, що енергетичні витрати на гомогенізацію складають значний відсоток в енергетичному балансі кожної з технологій переробки молочних продуктів. Отже для підвищення конкурентоспроможності виробників та зростання споживчого попиту необхідно при забезпеченні середнього діаметра жирових кульок після диспергування на рівні клапанних гомогенізаторів досягти суттєвого зниження енерговитрат процесу. Збільшення енергоефективності диспергування молочних емульсій ускладнюється відсутністю загальної теоретичної бази гомогенізації [2, 3]. Це пов'язано в першу чергу зі складністю проведення досліджень, оскільки робочі швидкості руху компонентів емульсії перевищують 100 м/с, а розмір часток жирової фази складає менше 1 мкм [2].

*Аналіз останніх досліджень.* Відомо близько 10 гіпотез гомогенізації, серед яких [1, 3]:

- руйнування під впливом дії повздовжнього градієнта швидкості потоку при вході у клапанну щілину (М. В. Барановського);
- руйнування під впливом поперечного градієнту швидкості потоку у клапанній щілині (Ребіндера і Вітгінга);
- руйнування за рахунок відцентрової сили при обертальному русі жирової кульки у градієнтному полі швидкостей (В. Д. Суркова);
- руйнування за рахунок кавітації;
- руйнування здуванням мікрочасток з поверхні жирової кульки (М. М. Орешіної);

- гіпотеза субкавітаційної гомогенізації (Є. А. Фіалкової);
- гіпотеза руйнування при створенні максимальної різниці швидкостей дисперсійної і дисперсної фаз (К. О. Самойчука).

На основі цих гіпотез було розроблено понад 25 пристроїв для диспергування, однак жоден з них не вирішує проблеми підвищення енергоефективності процесу.

*Формулювання цілей статті (постановка завдання).* Для розробки більш енергоефективних типів гомогенізаторів необхідно проаналізувати відомі пристрої для диспергування з точки зору енерговитрат і якості гомогенізації. Проведення аналізу відомих конструкцій дозволить обґрунтувати в ході подальших досліджень будову камери енергоефективного гомогенізатора. Отже метою статті є аналіз відомих конструкцій, які використовуються для гомогенізації молочних емульсій.

*Основна частина.* Клапанні гомогенізатори, незважаючи на їх розміри, високі енерговитрати та вібрацію при роботі, отримали найбільше розповсюдження в молокопереробній промисловості. Швидкість руху жирової кульки при їх використанні залежить від тиску гомогенізації. При цьому швидкість руху жирової кульки в нагнітаючій камері гомогенізуючої головки складає близько 9 м/с, а в клапанній щілині порядку 150-200 м/с. Незважаючи на наявність великої кількості клапанних гомогенізаторів, їх основні техніко-економічні та технологічні параметри коливаються у невеликих межах [4, 5]. Незважаючи на високе середнє значення (78%) коефіцієнту корисної дії клапанних гомогенізаторів можливості їхнього вдосконалення є практично вичерпаними. Зважаючи на це велика частина удосконалень клапанних гомогенізаторів орієнтована на зміну параметрів режиму диспергування. Додаткові міри та технологічні рішення можуть забезпечити лише до 20% енергозбереження при їх впровадженні у виробництво [1, 5].

До щілинних гомогенізаторів відносять клапанні, гвинтові, конструкції. В них руйнування відбувається за рахунок нагнітання продукту крізь щілину. Філерні гомогенізатори діють за принципом продавлювання продукту через спрофільовані отвори, розташовані на однаковій відстані з постійним або регульованим перерізом. Гідродинамічне руйнування жирової фази відбувається за рахунок інтенсивної турбулентності та виникнення кавітаційних ефектів [6]. Ефективність гомогенізації в таких пристроях складає 17%, а при більш тривалій обробці може сягати 20% [4].

Вібратори застосовуються для обробки жирової фази молока та вершків та є різновидами ультразвукової обробки. При тиску обробки вібратора, значення якого дорівнюють  $40-50 \cdot 10^2$  кПа СЖК, не перевищує 2 мкм. При впливі на молоко ультразвукових хвиль

спостерігається бактерицидний ефект, однак обробка на вібраторі здатна інтенсифікувати розвиток молочнокислих бактерій [5, 7].

У відцентрових гомогенізаторах під дією кутової швидкості обертання ротора рідина під тиском проходить крізь сопла або щільові отвори [1]. Ефективність гомогенізації в даному типі гомогенізатора залежить від тиску під дією якого рідина виходить з сопел або щільових отворів ротора, що обертається та ударяється в пристосування для зниження швидкості продукта, при цьому ефективність диспергування складає приблизно 35% [1, 7].

Роторно-пульсаційні апарати забезпечують інтенсифікацію процесу перемішування за рахунок використання активних гідродинамічних режимів в широкому діапазоні частоти коливань, що поєднується з одночасним впливом на частки дисперсної фази (механічним, гідродинамічним, гідроакустичним) [8]. Роторно-пульсаційні установки (РПУ-0,3; РПУ-0,8; РПУ-1,5) забезпечують отримання високодисперсних емульсій та суспензій. Обладнання такого типу характеризується високою температурою обробки продукта (майже 100°C), ступенем гомогенізації (до 60%) та високими енергетичними витратами [1, 5].

Насоси-гомогенізатори серії НГД є пристроями роторно-пульсаційного типу, які поєднують властивості РПА та відцентрового насоса. В гідродинамічному режимі роботи насоса відбувається пульсаційні перетворення акустичного поля на кавітаційну енергію. Ефективність обробки продукту залежить від часу знаходження в акустичному полі та розклинюючої дії градієнту швидкості, який в залежить від швидкості ротора та напора насосу [4, 8].

Одним з рішень роздільної гомогенізації може бути застосування апаратів відцентрового типу-кларифікаторів [1, 5]. Дисперсність жирової фази в молоці, обробленому на такому апараті відповідає дисперсності жиру в молоці, обробленому на клапанному гомогенізаторі при тиску 5-8 МПа, а ефективність складає біля 40% .

Відоме авторське свідоцтво, в якому запобігається піноутворення [5, 8], відцентровий гомогенізатор Лук'янова.Н.Я, який має меншу металоємність, характеризується простотою конструкції та дозволяє досягти ступеню гомогенізації до 70% [1]. В цілому, відцентрові гомогенізатори характеризуються меншою металоємністю порівняно з клапанними, але вони дають недостатньо високий ступінь гомогенізації (55-60%) та мають високі витрати потужності [4].

Електрогідравлічна гомогенізація молока та вплив на молочні емульсії електрогідравлічного удару засновані на ефекті, який виникає в результаті створення надвисоких імпульсних тисків рідині (10000 МПа), що викликають виникнення ударних хвиль. Недоліком методу є те, що при обробці може відбуватись коалесценція часток дисперсної

фази. Ефект, який досягається при такій обробці є високим, руйнування жирових кульок в 4-5 разів (1,5 мкм). Короткочасний вплив не змінює технологічні властивості молока, але тривала дія ударних хвиль може змінювати смак продукту [9].

Ультразвуковий метод емульгування відноситься до ефективних способів диспергування, оскільки ступінь емульгування складає 95%. Метод забезпечує високий ступінь дисперсності (0,1-0,5 мкм) та стійкість емульсії при тривалому зберіганні. Металоємність та енергоємність такого гомогенізатору порівняно з гомогенізатором ОГМ такої ж продуктивності нижче в 5-7 разів [1, 8]. Недоліком використання ультразвуку є той факт, що впровадження акустичних технологій обумовлює необхідність коригування параметрів технологічних процесів. Недостатньо дослідженим є вплив ультразвуку на зміну фізико-хімічних властивостей молока та його компонентів. Відомо, що в молоці може з'явитись присмак топленого молока, значно зменшується в'язкість молока, що вказує на деструкцію білкових сполук [4].

Інститутом технічної теплофізики НАН України на основі методу дискретно-імпульсного введення енергії запропонований новий метод гомогенізації та обладнання для його здійснення: вакуумні гомогенізатори ВГ-5, В-5М та ВГ-10 [5, 10]. Проведені дослідження показали, що ВГ-5 характеризується нижчою, порівняно з А1-ОГМ ефективністю гомогенізації, дещо більшим середнім діаметром часток 1,7 мкм проти 1,2 мкм, а широта їх розподілу прирівняна до клапанної. Але при цьому ВГ-5 характеризується в 2,3 рази меншою енергоємністю та в 3 рази меншою металоємністю. Вакуумна гомогенізація дозволяє уникнути недоліків клапанних машин у відношенні забезпечення стабільності продукту. При цьому можливе досягнення наступних ефектів: зниження кислотності, підвищення термостійкості, дегазація, дезодорація та часткове пригнічування мікрофлори [10].

Сопловий агрегат марки ОГВ, розроблений Грановським, згідно проведених досліджень має більший ефект гомогенізації ніж клапанний при більш низькому тиску, та відповідно енерговитратах. При тиску до 10 МПа його ефективність складає не нижче 70%, а СЖК дорівнює 1,2 мкм. Робоча частина гомогенізатору складається з двох камер в кожній з яких часткам надається спочатку обертального руху, потім поступального. Руйнування відбувається при проходженні продукту крізь калібровані отвори при нагнітанні з однієї камери в іншу [4, 8].

У вихровому гомогенізаторі вихори поділяються на два потоки: основний, який знаходиться у центрі та являється визначальним в процесі гомогенізації та пристінний, що виключає вихід

необробленого продукту. Шляхом регулювання відстані в кільцевій щілині встановлюються оптимальні режими роботи пристрою [10]. Дослідники процесу стверджують, що даний спосіб забезпечує високу ефективність руйнування жирових кульок при використанні вихрового ефекта Ранка-Хільша. Однак енерговитрати метода є ще надто високими: при потужності 19 кВт та тиску гомогенізації 12,5 МПа СЖК складає 1,05 мкм [1, 5].

Перспективним шляхом інтенсифікації диспергування та гомогенізації є створення конструкцій, які збільшують турбулізацію та завихрення потоків за зниження енергоємності та металоємності. Гомогенізація відбувається за рахунок енергії струменю, частково кавітації, створення інтенсивних турбулентних пульсацій та реалізації принципу створення максимальної різниці швидкостей дисперсійної та дисперсної фаз [11]. Про актуальність наряду розвитку струминного диспергування емульсій свідчить значна кількість принципово різних конструкцій струминних гомогенізаторів молока, розроблених останнім часом. До них відносять: протитечіно-струминні, ударно-струминні, кавітаційні гідродинамічні, струминні з роздільним подаванням жирової фази, міні-міксери і мікрофлюїдизатори [12]. Молочну емульсію з найбільш дрібним СЖК (0,1 мкм та менше) можливо отримати при використанні мікрофлюїдизаторів. Але такі пристрої характеризуються невисокою продуктивністю та високими питомими енерговитратами, значення яких перевершує показники клапанних гомогенізаторів. Враховуючи це мікрофлюїдизатори не отримали широкого впровадження на молокозаводах [12].

Протитечіно-струменевий гомогенізатор складається з енергетичного вузлу та форсунок, куди нагнітається молоко [13]. Протитечіно-струминний гомогенізатор молока забезпечує СЖК на рівні 0,75-0,85 мкм, та має питомі енерговитрати на рівні 1,2-1,5 кВт·год/т. Поряд з цим, він характеризується таким суттєвим недоліком, як істотне піноутворення, що відбувається внаслідок дестабілізації білкової фази, яка відбувається при зіткненні потоків. Такі ж проблеми має ударно-струминний диспергатор, в якому гомогенізація молочної емульсії відбувається при зіткненні струменя молока з твердими поверхнями різної форми. Такий тип гомогенізатора відрізняється меншою енергоефективністю, ніж протитечіно-струминний, що обумовило припинення його подальших досліджень [7, 13].

Відомі результати досліджень, які свідчать, що досягти зниження енерговитрат можливо за рахунок використання міні-міксерів П-подібної або Т-подібної форми. У них до потоку вершків, які рухаються по центральному каналу зі швидкістю вище 100 м/с по

каналах, розташованих перпендикулярно до напрямку руху знежиреного молока, подається дисперсійне середовище. Такі конструкції характеризуються помірними витратами енергії (1,5-1,7 кВт•год/т), а СЖК після гомогенізації в них складає 1,0-1,1 мкм [1, 14]. В мікроміксерях не досягається ефективна дія потоку вершків на струмінь знежиреного молока, а оптимізація форми внутрішніх каналів міні-міксерів, практично не вирішує цієї проблеми [14].

Пристрій для проведення струминної гомогенізації молока з роздільною подачею вершків складається з камери гомогенізації, утворюючі якої формують місце найбільшого звуження, у якому до знежиреного молока, що рухається з високою швидкістю, подаються вершки, кількість яких розраховується з рівняння матеріального балансу [15]. Але гомогенізатори цього типу відрізняються прискореною облітерацією каналів, діаметром 0,6-0,8 мм, які виготовляються такого малого діаметра для забезпечення СЖК на рівні клапанних диспергаторів [3, 15].

Таким чином жодна з конструкцій для диспергування жирової фази не може забезпечити підвищення енергоефективності процесу. Це пов'язано або з високими значеннями питомих енерговитрат, або з високими показниками СЖК після гомогенізації. Нові типи струминних гомогенізаторів вирішують проблему підвищення енергоефективності. Однак кожен з них має недоліки, наявність яких обумовлює відсутність широкого впровадження цих пристроїв. Усунути проблеми струминних гомогенізаторів при одночасному підвищенні енергоефективності процесу дозволить розробка струминно-щілинного гомогенізатора молока.

*Висновки.* Всі наведені конструкції, окрім клапанних гомогенізаторів не знайшли широкого використання для переробки молочних продуктів. Це пов'язано або з їх високими енерговитратами, як у випадку з мікрофлюїдизаторами та вихровими диспергаторами або з високими значеннями середнього діаметра жирових кульок (відцентрові, електрогідравлічні, вібраційні). Деякі з нових конструкцій (протитечійно-струминний та струминний гомогенізатор молока з роздільною подачею вершків) дозволяють забезпечити зменшення середнього діаметра жирових кульок до 0,75-1,1 мкм при питомих енергетичних витратах відповідно 1,1-1,5 та 0,8-0,9 кВт•год/т. Але незважаючи на високу енергоефективність, такі конструкції мають недоліки, які проявляються у вигляді піноутворення для протитечійно-струминного та швидкої облітерації каналів для подавання вершків для струминного гомогенізатора молока з роздільною подачею вершків. Згідно результатів аналізу для забезпечення високої енергоефективності при одночасному усуненні

вказаних недоліків пропонується розробити конструкцію та провести дослідження струминно-щілинного гомогенізатора молока.

**Список використаних джерел:**

1. Walstra P. Homogenization. *Dairy Science and Technology*. London; New York, 2006. P. 279.
2. Фиалкова Е. А. Гомогенизация. Новый взгляд: монография–справочник. Санкт-Петербург: ГИОРД, 2006. 392 с.
3. Самойчук К. О. Розвиток наукових основ гідродинамічного диспергування молочних емульсій: автореферат дис. ... д-ра техн. наук: 05.18.12. Харків, 2018. 44 с.
4. Бредихин С. А. Технология и техника переработки молока. Москва: Колос, 2003. 400 с.
5. Мухин А. А., Кузьмин Ю. Н., Гисин И. Б. Гомогенизаторы для молочной промышленности. Москва: Пищевая промышленность, 1976. 66 с.
6. Dairy technology: Principles of Milk Properties and Processes / P. Walstra et al. Part II: Processes. New York: Marcel Dekker, Inc., 1999. 246 p.
7. Research into milk homogenization in the pulsation machine with a vibrating rotor / K. Samoichuk et al. *Eastern-European journal of enterprise technologies*. 2016. № 6/11 (84). P. 16–21. DOI: <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2016.86974>.
8. Bylund G. Homogenizers. *Dairy Processing Handbook*. Lund, Sweden, 2003. P. 115–122.
9. Scale-up of microreactor: Effects of hydrodynamic diameter on liquid–liquid flow and mass transfer / X. Wang et al. *Chemical Engineering Science*. 2020. Vol. 226 (115838). DOI: 10.1016/j.ces.2020.115838.
10. Нужин Е. В., Гладушняк А. К. Гомогенизация и гомогенизаторы: монография. Одесса: Печатный дом, 2007. 263 с.
11. Samoichuk K., Zahorko N., Oleksienko V., Petrychenko S. Generalization of Factors of Milk Homogenization. *Modern Development Paths of Agricultural Production. Trends and Innovations: Conference proceedings*. Springer, 2019. P. 192–198.
12. 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. DOI: 10.1016/B978-0-12-374407-4.00226-0.
13. Самойчук К. О. Обґрунтування параметрів та режимів роботи протитечійно-струменевого диспергатора молока: автореф дис. ... канд. техн. наук : 05.18.12. Донецьк, 2008, 20 с.

14. Самойчук К. О., Ковальов О. О., Дейниченко Г. В. Конструкції струминних диспергаторів жирової фази молока. *Праці Таврійського державного агротехнологічного університету*. Мелітополь, 2016. Вип. 16, т. 1. С. 219–228.

## АНАЛІЗ КОНСТРУКЦІЙ ГОМОГЕНІЗАТОРІВ МОЛОКА

Ковальов О. О.

### *Анотація*

Однією з основних проблем молокопереробної промисловості є високі енергетичні витрати процесу. Дослідження шляхів їх зниження поки не дало істотних результатів. Створені на базі відомих гіпотез кілька десятків конструкцій, не знайшли широкого застосування в молокопереробній промисловості. Одна група конструкцій (клапанні гомогенізатори та мікрофлюїдизатори) забезпечують обумовлену технологією величину середнього діаметра жирових кульок, але мають надто високі енерговитрати. Інші конструкції (вібраційні, електрогідрравлічні, відцентрові) дозволяють знизити питомі енергетичні витрати процесу диспергування до 3-5 разів, однак при їх використанні середній діаметр жирових кульок після диспергування має досить високі значення.

Дані досліджень протитечійно-струминного і струменевого гомогенізатора молока з роздільною подачею вершків, свідчать про те, що їх використання дозволяє отримати продукт, середній діаметр жирових кульок в якому становить 0,75-1,1 мкм. При цьому енергетичні витрати таких конструкцій становлять від 0,8-0,9 кВт • год/т до 1,1-1,5 кВт•год/т. У статті пропонується розробити струменево-щілинний гомогенізатор молока, який при прогнозовано високих показниках енергетичної ефективності дозволить усунути проблеми, властиві іншим струминним диспергаторам.

**Ключові слова:** жирова кулька, гомогенізація, молоко, щілинний гомогенізатор, струминний гомогенізатор, диспергування.

## АНАЛИЗ КОНСТРУКЦИЙ ГОМОГЕНИЗАТОРОВ МОЛОКА

Ковалев А. А.

### *Аннотация*

Одной из основных проблем молокоперерабатывающей промышленности являются высокие энергетические затраты процесса. Исследование путей их снижения пока не дало существенных результатов. Главным образом это связано с отсутствием общей теории процесса диспергирования, обобщающие используемые данные о процессах, обуславливающих разрушение жировых шариков. Созданные на базе известных гипотез несколько десятков конструкций, не нашли широкого применения в молокоперерабатывающей промышленности.

Статья посвящена анализу конструкций диспергаторов, как с точки зрения энергетических затрат и показателей качества гомогенизации. Результаты анализа позволяют утверждать о наличии конструкций, обеспечивающих высокие показатели качества диспергирования. Однако такие конструкции (клапанные диспергаторы и микрофлюидизаторы) характеризуются высокими удельными затратами энергии и практически не имеют возможности их снижения. Другие конструкции (вибрационные, электрогидравлические, центробежные) позволяют



снизить удельные энергетические затраты процесса диспергирования до 3–5 раз. Однако вместе с этим такие конструкции отличаются тем, что при их использовании средний диаметр жировых шариков после диспергирования имеет достаточно высокие значения.

Данные исследований противоточно-струйного и струйного гомогенизатора молока с отдельной подачей сливок, свидетельствуют о том, что их использование позволяет получить продукт, средний диаметр жировых шариков в котором составляет 0,75–1,1 мкм. При этом энергетические затраты таких конструкций составляют от 0,8–0,9 кВт•ч/т до 1,1–1,5 кВт•ч/т. Поскольку эти конструкции имеют проблемы, связанные с образованием пены и ускоренным процессом облитерации каналов для подачи сливок, они не нашли широкого применения в молочной промышленности. В статье предлагается разработать струйно-щелевой гомогенизатор молока. При прогнозируемо высоких показателях энергоэффективности его использование позволит устранить проблемы, присущие другим струйным диспергаторам.

**Ключевые слова:** гомогенизация, щелевой гомогенизатор, жировой шарик, струйный гомогенизатор, диспергирование, молоко.

## ANALYSIS OF MILK HOMOGENIZERS

O. Kovalyov

### *Summary*

One of the main problems of the dairy industry is the high energy consumption of the process. Research on ways to reduce them has not yet yielded significant results. This is mainly due to the lack of a general theory of the dispersion process, which summarizes the data used on the processes that cause the destruction of fat globules. Several designs created on the basis of known hypotheses have not found wide application in the milk processing industry. The article is devoted to the analysis of the design of dispersants, both in terms of energy costs and indicators of the quality of homogenization. The results of the analysis allow us to assert the presence of structures that provide high indicators of dispersion quality. However, such designs (valve dispersers and microfluidizers) have high specific energy costs and practically have no possibility of reducing them. Other designs (vibrating, electro-hydraulic, centrifugal) can reduce the specific energy consumption of the dispersion process by up to 3–5 times. However, at the same time, such structures are distinguished by the fact that when they are used, the average diameter of the fat globules after dispersion has rather high values. The research data of the countercurrent-jet and jet milk homogenizer with separate feeding of cream indicate that their use makes it possible to obtain a product with an average diameter of fat globules of 0.75–1.1 microns. At the same time, the energy consumption of such structures ranges from 0.8–0.9 kW•h/t for jet milk homogenizers with a separate supply of cream to 1.1–1.5 kW•h/t for counter-current jet dispersants. Since these designs have problems associated with the formation of foam and the accelerated process of obliteration of the channels for the delivery of cream, they have not found widespread use in the dairy industry.

**Summary of article.** The article proposes to develop a jet-slot milk homogenizer, which, with predictably high energy efficiency, will eliminate the problems inherent in other jet homogenizers.

**Key of words:** homogenization, slot type homogenizer, fat globul, jet homogenizer, dispergating, milk.