

## ХАРАКТЕРИСТИКИ ДИСПЕРСНОЇ ФАЗИ МОЛОЧНОЇ ЕМУЛЬСІЇ ЯК ОБ'ЄКТА ГОМОГЕНІЗАЦІЇ

Самойчук К.О., д.т.н.

ORCID: 0000-0002-3423-3510

*Таврійський державний агротехнологічний університет  
імені Дмитра Моторного*

Братішко В. В., д.т.н.

ORCID: 0000-0001-8003-5016

*Національний університет біоресурсів і природокористування України*

Ткач В. В., к.т.н.

ORCID: 0000-0003-4198-8396

*Національний науковий центр «Інститут механізації та електрифікації  
сільського госпо-дарства» НААН України*

Тел. (0619) 42-13-06

*Постановка проблеми.* Молочна галузь на сучасному етапі є однією із провідних у структурі харчової індустрії України, а виробництво молока стало невід'ємною складовою забезпечення національної продовольчої безпеки держави. Незважаючи на це, виробництво молочної продукції залишається на низькому рівні, а виробничі потужності молокопереробних підприємств країни задіяні лише на 30–40%, що викликано нестачею як внутрішнього так і зовнішніх ринків збуту молочної продукції. Для підвищення об'ємів продажу в сучасних умовах високої конкуренції необхідне зниження собівартості виробництва шляхом використання енергоефективних процесів і технологій.

Одним з найбільш енерговитратних процесів переважної більшості технологічних схем виробництва молока та молочних продуктів є гомогенізація. Питоме енергоспоживання найбільш поширених – клапанних гомогенізаторів – сягає 7–8 кВт·год/т, до того ж, вони є найбільшими серед обладнання для механічної обробки молока [1, 2]. Розрахунки показують, що при зниженні питомої енергоемності до 1,5–2 кВт·год/т, при об'ємах виробництва молочної продукції в Україні на рівні минулого року, економія лише електроенергії складає не менше 19 мільйонів гривень[3]. Тому, вирішення проблеми високих енерговитрат процесу гомогенізації в сучасних реаліях зростання цін на енергоносії шляхом підвищення ефективності диспергування молочного жиру набуває високої актуальності. Розробку високоефективних гомогенізаторів стримує нестача ґрунтовних досліджень механізмів диспергування молочного жиру, які базуються на механічних властивостях дисперсної фази молока, яка представлена в молоці у вигляді жирових кульок. Будова та механічні властивості жирової кульки є надзвичайно важливими

для визначення механізмів руйнування жирових кульок, а отже і створення єдиної теорії гомогенізації, якої на даний момент не існує [1–4].

*Аналіз останніх досліджень.* Під гомогенізацією молока розуміють процес його обробки, який призводить до диспергування жирової (дисперсної) фази і рівномірного розподілу її по об'єму дисперсійної фази.

Внаслідок гомогенізації зменшується широта розподілу жирових кульок за розмірами та зменшується різниця між розмірами найбільших та найменших жирових кульок. Збільшення дисперсності внаслідок гомогенізації уповільнює седиментацію – молоко після гомогенізації значно довше зберігає мікроскопічну однорідність та розшаровується значно повільніше. При гомогенізації змінюється склад адсорбційних шарів жирових кульок, перерозподіляються деякі складові частини молока між жировою фазою та молочною плазмою, змінюється склад та властивості білків молока.

Молоко являє собою натуральну емульсію жиру (дисперсної фази) у молочній плазмі (дисперсійній фазі). Молочний жир знаходиться у теплом молоці у вигляді рідких крапель, у охолодженому – у вигляді твердих часток сферичної форми; їх зазвичай називають жировими кульками. Середній діаметр жирових кульок у свіжому молоці за оцінками різних авторів [4, 5] коливається у межах 2,5–3 мкм і залежить від численних факторів: породи корів, часу лактації, часу доїння тощо. Їх число складає 1,5–3,0 млрд. в 1 мл. Молочна плазма також являє собою емульсію, так як містить солі, білкові частки і інші компоненти, серед яких найбільші розміри, до 300 нм, мають глобули казеїну. Таким чином, молоко – це складна полідисперсна система.

У спокійному стані на поверхні свіжого молока через 20...30 хв. утворюється шар відстоюваних вершків. Відстоювання обумовлене різницею густини плазми та молочного жиру. Швидкість відстоювання залежить також від розмірів жирових кульок, в'язкості дисперсійної фази, але головним чином від утворення скупчень (агрегатів) жирових кульок при склеюванні жирових кульок одна з одною. Це склеювання викликається імуноглобулінами. При знижених температурах імуноглобуліни адсорбуються на поверхні твердих жирових кульок, при збільшенні температури до 50–55<sup>0</sup>С вони денатурують і переходять у молочну плазму. Високі температури пастеризації зменшують відстоювання вершків, що обумовлюється руйнуванням імуноглобулінів (температура 55<sup>0</sup>С і більше). Інтенсивне перемішування сприяє утворенню конгломератів жирових кульок [6, 7].

Дисперсійною фазою молочної емульсії є плазма молока, яка представляє собою розчин молочного цукру і солей у воді. Деякі

автори [5] виділяють ще третю фазу молока – білкову, що складається переважно з нерозчинних міцел і субміцел казеїну, а також сироваткових білків.

Рівномірності розподілу мікроскопічних жирових часток не приділяється особлива увага завдяки їх постійному (броунівському) руху, в наслідок чого концентрація жиру в мікрооб'ємі молочної емульсії вирівнюється без докладання спеціальних засобів і умов.

Жирова фаза молока представляє собою молочний жир у вигляді жирових кульок (крапель, часток), розмір яких у незбираному молоці коливається у широких межах 0,1–10 мкм [7, 8]. В процесі гомогенізації середній діаметр жирових кульок зменшується до 0,75–1,2 мкм, при цьому кількість жирових кульок зростає до 40–80 млрд. в 1 мл, а площа поверхонь жирових кульок збільшується в 13–27 разів.

В процесі гомогенізації важливо не допускати дестабілізації молочного жиру і коалесценції жирових часток. Стабільність дисперсної фази порушується при:

- будь-якій механічній обробці молока (перекачування, транспортування, очищення тощо);
- змінах кислотності молока за границі рН 6,0–7,0;
- заморожуванні та відтаюванні;
- підвищенні концентрації жиру;
- зіткненні жирових часток або їх агломератів в процесі гомогенізації.

Вірогідність зіткнення жирових кульок підвищується при використанні таких типів гомогенізаторів, як, наприклад, протитечійно-струминні [3].

Підвищити стабільність жирової фази молока можливо додаванням емульгаторів, наявність яких зменшує поверхневий натяг складових молока.

В Україні відсутні нормативні документи, якими визначається достатність гомогенізації або технологічно регламентуються необхідні дисперсні характеристики молочної емульсії в результаті гомогенізації [9]. Важливою характеристикою при розрахунку критеріальних залежностей процесу руйнування жирових кульок є поверхневий натяг оболонки жирової кульки (на границі молочний жир-плазма). Довідники не вказують цей параметр, регламентуючи лише поверхневий натяг молока [1, 4]. Це створює труднощі для розрахунку механізмів руйнування жирової кульки та проектування і розрахунок гомогенізаторів на задану ступінь дисперсності.

*Формулювання цілей статті (постановка завдання).* Метою даної статті є визначення дисперсних характеристик молочної емульсії, які могли б стати базовими для створення теорії та розрахунку гомогенізаторів на задану ступінь дисперсності.

Задачами статті є:

– проаналізувати відомі властивості молочної емульсії та жирової кульки молока і визначити необхідну і достатню ступінь дисперсності молочного жиру в результаті гомогенізації молока;

– визначити поверхневий натяг поверхні жирової кульки молока, необхідний для розрахунку параметрів гомогенізаторів.

*Основна частина.* Стандарти і нормативи, які регламентують ступінь дисперсності жирових часток молока після гомогенізації, не існує. Єдиним стандартом з гомогенізації є ГОСТ 27203-87 "Гомогенизаторы для молока. Основные параметры", який регламентує лише основні технічні показники плунжерних гомогенізаторів клапанного типу без урахування ступеня дисперсності молочного жиру після обробки. Для визначення достатньої дисперсності жирової фази після гомогенізації існують такі орієнтири:

– інструкція по хімічному контролю [10], в якій перевірку якості гомогенізації рекомендують проводити за відстоюванням жиру протягом 48 годин або методом центрифугування, причому зазначено, що найбільш надійним вважається метод мікроскопічного визначення розмірів жирових кульок;

– середній розмір жирових кульок в найбільш розповсюджених клапанних гомогенізаторах, який сягає 0,75–0,80 мкм при режимах роботи, спрямованих на максимальний ступінь дисперсності [1, 2, 9];

– середній розмір жирових кульок після обробки в клапанних гомогенізаторах згідно рекомендованих режимів гомогенізації (тиску) в технологічних схемах виробництва питного молока і вершків, який вважається достатнім, становить 1,0–1,2 мкм [9];

– нижня границя дисперсності жирової емульсії молока після обробки в серійних але менш розповсюджених типах гомогенізаторів (вакуумних, роторно-пульсаційних тощо) становить 1,0–1,2 мкм [1];

– у відповідності з United States Public Health Service, у добре гомогенізованому молоці протягом 48 годин не з'являється видимого відстоювання вершків;

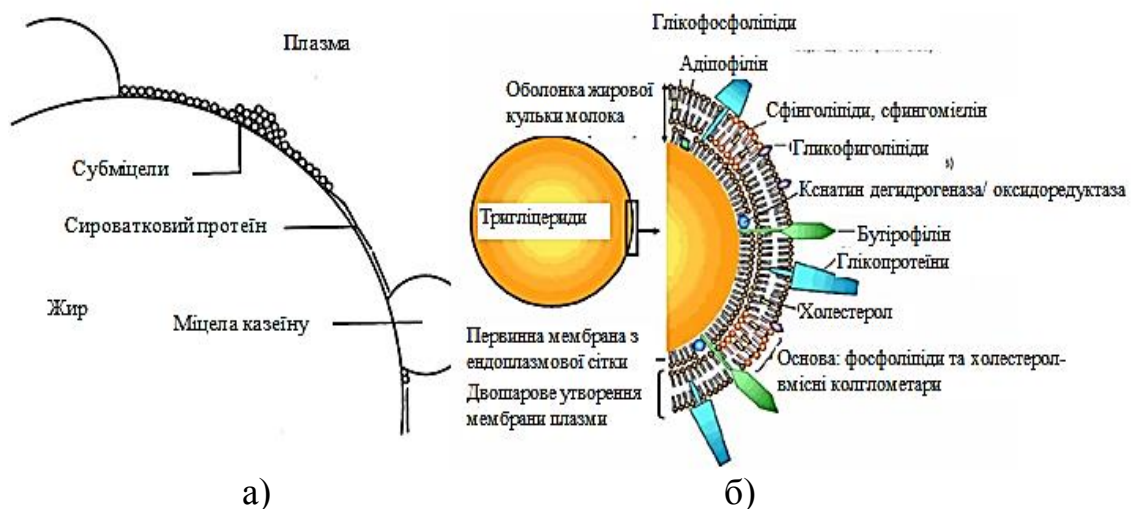
– вміст жиру у верхніх 100 мл пляшки обсягом 250 мл не повинен відрізнитись більше ніж на 10% від молока, що знаходиться у решті пляшки [11].

Таким чином, можна вважати, що дисперсність молочної емульсії є високою при середніх розмірах жирових кульок 0,75–0,8 мкм і менше, а достатньою при досягненні середнього діаметру 1,2 мкм.

Білкова фаза молока має розміри близько 0,1 мкм (від 40 до 300 нм) і при гомогенізації частково подрібнюється, але причиною є не гідродинамічні, а переважно адсорбційні сили. В необробленому молоці на поверхні жирових кульок адсорбуються близько 2–3% білка, а після гомогенізації – до 25%, тобто відбувається перерозподіл

білка між плазмою та оболонками жирових кульок. Товщина оболонок жирових кульок молока після гомогенізації зменшується, а після вистоювання збільшується і наближується до товщини оболонок жирових кульок у незбираному молоці.

Жирова кулька має складну будову, стосовно якої немає єдиного погляду [8]. Внутрішня частина жирової кульки представляє собою легкоплавкі жири, ближче до поверхні розташовані тугоплавкі жири. Оболонка, яка покриває жири, має тонку мембрану, що складається з ліпопротеїдних часток [12]. На зовнішній частині оболонки адсорбуються міцели і субміцели білків плазми (рис. 1) [13, 14].



а) – характерні розміри мембрани жирової кульки молока, б) – будова жирової кульки.

Рис. 1. Жирова кулька молока.

Таким чином внаслідок складності будови жирової кульки і її оболонки, склад, властивості і розміри яких значно змінюються в процесі гомогенізації, не вірно визначати характеристикою міцності жирової кульки лише поверхневий натяг.

У відповідності з правилом Антонова [15], поверхневий натяг поверхні жирової кульки  $\sigma_{ж-п}$  визначається як різниця поверхневих натягів жиру та плазми відносно загального газу (повітря):

$$\sigma_{ж-п} = \sigma_n - \sigma_{ж}, \quad (1)$$

де  $\sigma_n$  – поверхневий натяг на границі фаз плазма – повітря, Н/м,  $\sigma_n = 0,054$  Н/м [1, 4];

$\sigma_{ж}$  – поверхневий натяг на границі фаз жир – повітря, Н/м,  $\sigma_{ж} = 0,030$  Н/м [1, 4].

$$\sigma_{ж-п} = 0,054 - 0,030 = 0,024 \text{ Н/м.}$$

Однак коефіцієнт поверхневого натягу на границі жирова кулька-плазма  $\sigma_{ж-п}$  молока внаслідок складної структури оболонки жирової кульки може взагалі мати інший фізичний зміст. Його можна

уявляти не як силу, що прикладена до одиниці довжини контуру поверхні між жировою кулькою та плазмою, а як питому поверхню енергії, що приходить на одиницю поверхні жирової кульки, подібно до поверхневої теорії подрібнення тіл П. Р. Ріттинґера [16]. Як відомо, поверхнева теорія руйнування добре узгоджується з експериментальними даними при великих площах утворених поверхонь – дрібнодисперсному дробленні, що відбувається при гомогенізації молока. Тому значення  $\sigma_{ж-п}$  може суттєво відрізнитись від коефіцієнта поверхневого натягу на границі "молочний жир-плазма", яке використовується при розрахунках дослідників процесу гомогенізації.

*Висновки.* Незважаючи на широке розповсюдження процесу гомогенізації в молочній промисловості, існує брак стандартів і нормативів, які регламентують цей процес. На основі літературних даних і технологічної документації, які регламентують необхідний тиск найбільш розповсюджених – клапанних гомогенізаторів, визначена дисперсність молочної емульсії, достатня для існуючих технологій виробництва молочної продукції: 0,75–0,85 мкм.

Згідно значень поверхневого натягу на границі жир-повітря та плазма-повітря визначене значення поверхневого натягу поверхні жирової кульки, що складає 0,024 Н/м. Але, висунуте припущення, що внаслідок складності будови жирової кульки і її оболонки, хибним є загальноприйнятий підхід вважати основною характеристикою міцності оболонок жирової кульки лише поверхневий натяг.

#### Література:

1. Фиалкова Е. А. Гомогенизация. Новый взгляд: монография–справочник. Спб.: ГИОРД, 2006. 392с.
2. Walstra P. Homogenization. *Dairy Science and Technology*. 2006, chp. 9, p. 275-279.
3. Самойчук К. О. Розвиток наукових основ гідродинамічного диспергування молочних емульсій: дисертація ... д-ра техн. наук, спец.: 05.18.12 / Харк. держ. ун-т харч. та торгівлі. Харків, 2018. 391 с.
4. Якубчак О. М. Фізичні та біохімічні властивості. *Молочное дело*. 2005. №12. С. 36–37.
5. Charpantier J.–C. The triplet «molecular processes - product - process» engineering: the futur of chemical engineering. *Chemical Engineering Science*. 2002. Vol. 57. P. 4667–4690. DOI: 10.1016/S0009-2509(02)00287-7.
6. Kwiatkowski M., Wurlitzer M., Krutilin A. et al. Homogenization of tissues via picosecond-infrared laser (PIRL) ablation: Giving a closer view on the in-vivo composition of protein species as compared to mechanical homogenization. *Journal of Proteomics*. 2016. Vol. 134. P. 193–202. DOI: 10.1016/j.jprot.2015.12.029.

7. Орешина М. Н., Космодемьяский Ю. В. Управление дисперсностью пищевых эмульсий и суспензий. *Хранение и переработка сельхозсырья*. 2007. №6. С. 65–67.

8. Просеков А. Ю., Курбанова М. Г. Анализ состава и свойств белков молока с целью использования в различных отраслях пищевой промышленности. *Техника и технология пищевых производств*. 2009. № 4. С. 68–71.

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

10. Инструкция по химическому контролю на предприятиях молочной промышленности; утв. М-вом мясн. и молоч. пром-сти СССР 30.12.88. Москва, 1988. 118 с.

11. De S. Special Milks. *Outlines of Technology*. Oxford University Press, 2001. P. 93–97.

12. Brunner J. E., Duncan C. W., Trout G. M., Mackenzie M. The fat-globule membrane of nonhomogenized and homogenized milk. *Journal of Food Science*. 2006. 18(1–6). P. 469–474. DOI: 10.1111/j.1365-2621.1953.tb17739.x.

13. Fox P. F. Milk proteins: general and historical aspects. *Advanced Dairy Chemistry* / Ed.: Fox, P. F., McSweeney, Paul L. H. (Eds.). 2003. Vol. 1: Proteins. P. 1–41.

14. Lopez C., Madec M.-N., & Jimenez-Flores R. Lipid rafts in the bovine milk fat globule membrane revealed by the lateral segregation of phospholipids and heterogenous distributions of glycoproteins. *Food Chemistry*. 2010. Vol. 120. P. 22–33. DOI:10.1016/j.foodchem.2009.09.065

15. Рид Р., Шервуд Т. Свойства газов и жидкостей. Ленинград: Химия, 1971. 701 с.

16. Курманов А. К., Исинтаев Т. И., Рыспаев К. С. Теория дробления ингредиентов взвесей. *Известия ОГАУ*. 2013. № 1 (39). С. 48–51.

## ХАРАКТЕРИСТИКИ ДИСПЕРСНОЇ ФАЗИ МОЛОЧНОЇ ЕМУЛЬСІЇ ЯК ОБ'ЄКТА ГОМОГЕНІЗАЦІЇ

Самойчук К. О., Братішко В. В., Ткач В. В.

### Анотація

У статті проаналізовані сучасні відомості про дисперсні характеристики молочної емульсії як об'єкта гомогенізації молока: розміри жирових кульок до та після гомогенізації; температурні параметри та їх вплив; стабільність жирової фази та методи її збереження; стан білкової фази молока та її зміни в процесі гомогенізації. Наведені дані з будови жирових кульок.

Відмічений брак стандартів і нормативної документації, які регламентують ступінь дисперсності жирових часток молока після гомогенізації. Для визначення необхідних розмірів жирових кульок в процесі гомогенізації до уваги прийняті такі дані: інструкція по хімічному контролю часів радянського союзу; середній розмір жирових кульок в найбільш розповсюджених – клапанних гомогенізаторах; середній розмір жирових кульок після обробки згідно

рекомендованих режимів гомогенізації (тиску) в технологічних схемах виробництва питного молока і вершків; границя дисперсності жирової емульсії молока після обробки в вакуумних, роторно-пульсаційних тощо гомогенізаторах; відповідність з United States Public Health Service про ступінь відстоювання жиру; вимоги щодо різниці вмісту жиру у плящі в процесі зберігання. В результаті аналізу визначена дисперсність молочної емульсії, достатня для існуючих технологій виробництва молочної продукції: 0,75–0,85 мкм.

Згідно значень поверхневого натягу на границі жир-повітря та плазма-повітря визначене значення поверхневого натягу поверхні жирової кульки, що складає 0,024 Н/м. Але, висунуте припущення, що внаслідок складності будови жирової кульки і її оболонки, хибним є загальноприйнятий підхід вважати основною характеристикою міцності оболонок жирової кульки лише поверхневий натяг.

**Ключові слова:** гомогенізація молока, жирова кулька, дисперсні характеристики, поверхневий натяг жирової кульки.

## ХАРАКТЕРИСТИКИ ДИСПЕРСНОЙ ФАЗЫ МОЛОЧНОЙ ЭМУЛЬСИИ КАК ОБЪЕКТА ГОМОГЕНИЗАЦИИ

Самойчук К.О., Братишко В. В., Ткач В. В.

### Аннотация

В статье проанализированы современные сведения о дисперсных характеристики молочной эмульсии как объекта гомогенизации молока: размеры жировых шариков до и после гомогенизации; температурные параметры и их влияние; стабильность жировой фазы и методы ее сохранения; состояние белковой фазы молока и её изменения в процессе гомогенизации. Приведены данные по строению жировых шариков.

Отмечен недостаток стандартов и нормативной документации, регламентирующих степень дисперсности жировых частиц молока после гомогенизации. Для определения необходимых размеров жировых шариков в процессе гомогенизации во внимание приняты следующие данные: инструкция по химическому контролю времен Советского Союза; средний размер жировых шариков в наиболее распространенных - клапанных гомогенизаторах; средний размер жировых шариков после обработки согласно рекомендованных режимов гомогенизации (давления) в технологических схемах производства питьевого молока и сливок; граница дисперсности жировой эмульсии молока после обработки в вакуумных вакуумные пульсационных т.д. гомогенизаторах; соответствие с United States Public Health Service о степени отстаивания жира; требования относительно разницы содержания жира в бутылках в процессе хранения. В результате анализа определена дисперсность молочной эмульсии, достаточная для существующих технологий производства молочной продукции: 0,75–0,85 мкм.

Согласно значений поверхностного натяжения на границе жир-воздух и плазма-воздух определено значение поверхностного натяжения поверхности жирового шарика молока, которое составляет 0,024 Н/м. Выдвинуто предположение, что вследствие сложности строения жирового шарика и его оболочки, ложным является общепринятый подход считать основной характеристикой прочности оболочек жировой шарика только поверхностное натяжение.

**Ключевые слова:** гомогенизация молока, жировой шарик, дисперсные характеристики, поверхностное натяжение жирового шарика.



## CHARACTERISTICS OF THE DISPERSED PHASE OF MILK EMULSION AS AN OBJECT OF HOMOGENIZATION

K. Samoichuk, V. Bratishko, V. Tkach

### Summary

The article analyzes modern information about the dispersed characteristics of milk emulsion as an object of milk homogenization: size of fat globules before and after homogenization, temperature parameters and their influence, stability of fat phase and methods of its preservation, state of protein phase of milk and its changes in homogenization. Data on the structure of fat globules are given.

There is a lack of standards and regulations explaining the degree of dispersion of milk fat particles after homogenization. To determine the required size of fat globules in the process of homogenization, the following data are taken into account: instructions for chemical control of the Soviet Union; the average size of fat globules in the most common - valve homogenizers; the average size of fat globules after processing according to the recommended modes of homogenization (pressure) in technological schemes of production of drinking milk and cream; the limit of dispersion of milk fat emulsion after processing in vacuum, rotor-pulsation, etc. homogenizers; compliance with the United States Public Health Service on the degree of fat sedimentation; requirements for the difference in fat content in the bottle during storage. As a result of the analysis, the dispersion of the milk emulsion was determined, which is sufficient for the existing technologies of dairy production: 0.75–0.85  $\mu\text{m}$ .

According to the values of surface tension at the border between fat-air and plasma-air, the value of surface tension of the surface of the globule is determined, which is 0.024 N/m. However, the assumption is made that due to the complexity of the structure of the fat globule and its shell, it is wrong to take the generally accepted approach to consider the main characteristic of the strength of the shells of the fat globule to be only surface tension.

**Key words:** homogenization of milk, fat globule, dispersed characteristics, surface tension of fat globule.