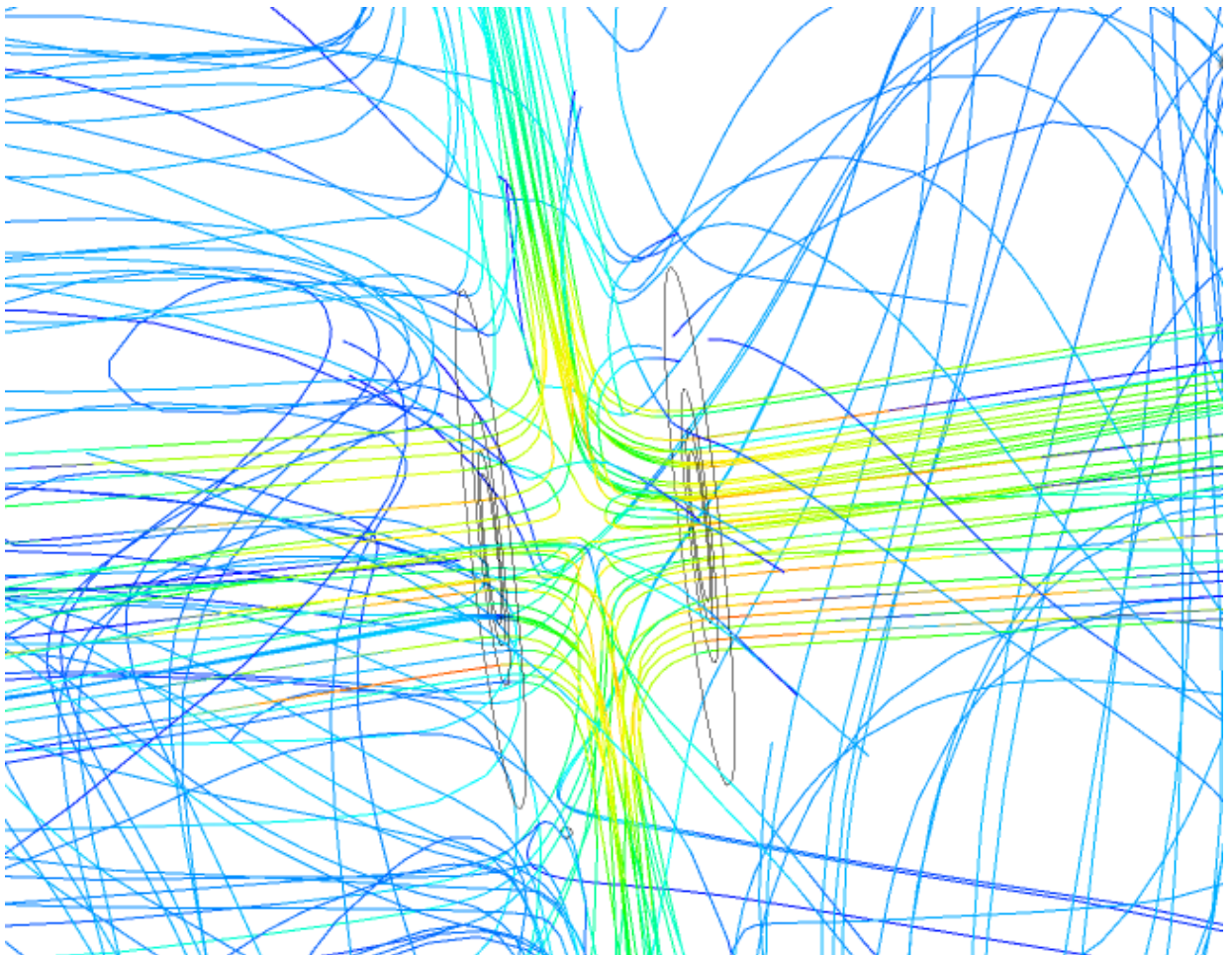


**Дейниченко Г.В., Самойчук К.О., Кюрчев С.В.,
Олексієнко В.О., Паляничка Н.О., Верхоланцева В.О.**

**ПРОТИТЕЧІЙНО-СТРУМИННА
ГОМОГЕНІЗАЦІЯ МОЛОКА**



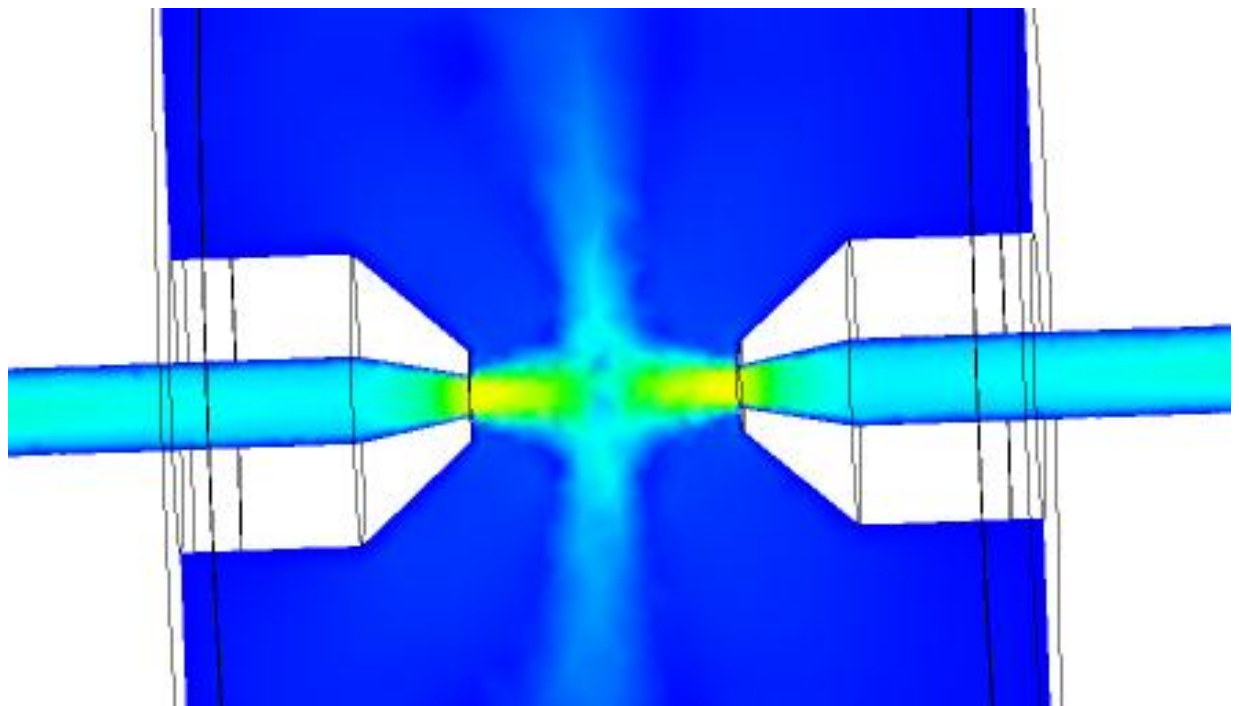
Міністерство освіти і науки України

Таврійський державний агротехнологічний університет

Дейниченко Г.В., Самойчук К.О., Кюрчев С.В., Олексієнко В.О.,
Паляничка Н.О., Верхованцева В.О.

ПРОТИТЕЧІЙНО-СТРУМИННА ГОМОГЕНІЗАЦІЯ МОЛОКА

Монографія



Мелітополь, 2017

УДК 637.134

Рецензенти:

Проректор з наукової роботи Харківського державного університету харчування та торгівлі, Лауреат державної премії України в галузі науки і техніки, доктор технічних наук, професор **Михайлов В. М.**

Директор Навчально-наукового інституту переробних і харчових виробництв Харківського національного технічного університету сільського господарства імені Петра Василенка, доктор технічних наук, професор **Богомолів О. В.**

Рекомендовано до видання Вченою радою Таврійського державного агротехнологічного університету Міністерства освіти і науки України (протокол № 12 від 30 травня 2017 р.)

Дейниченко Г.В., Самойчук К.О., Кюрчев С.В., Олексієнко В.О., Паляничка Н.О., Верхованцева В.О. Протитечійно-струминна гомогенізація молока: Монографія. – Мелітополь, 2017. – 200 с.

В монографії розглянуто питання гомогенізації молока: здійснено огляд гомогенізаторів й аналіз існуючих гіпотез гомогенізації. Особливу увагу приділено процесу диспергування жирової фази молока в протитечійно-струминному гомогенізаторі, а саме зниженню витрат енергії на процес гомогенізації молока шляхом оптимізації технологічних і конструктивних параметрів і режимів роботи гомогенізатора. Наведений аналіз та уточнення методів визначення якості гомогенізації молока. Розглянуті напрямки удосконалення конструкцій протитечійно-струминних гомогенізаторів.

Монографія розрахована на широке коло спеціалістів молокопереробної промисловості, наукових співробітників та студентів які вивчають процеси та апарати гомогенізації молока.

ISBN

© Дейниченко Г.В., Самойчук К.О., Кюрчев С.В.,
Олексієнко В.О., Паляничка Н.О., Верхованцева В.О.

ЗМІСТ

ПЕРЕЛІК УМОВНИХ ПОЗНАЧЕНЬ	7
ВСТУП	9
1. СПОСОБИ ГОМОГЕНІЗАЦІЇ ТА КОНСТРУКЦІЇ ГОМОГЕНІЗАТОРІВ МОЛОКА	10
1.1. Фізико-хімічні властивості молока і гомогенізація	10
1.2. Огляд існуючих гіпотез руйнування жирових кульок молока	16
1.3. Огляд існуючих пристроїв для гомогенізації молока Обґрунтування напряму подальших досліджень	24 42
2. ТЕОРЕТИЧНІ ДОСЛІДЖЕННЯ ПРОТИТЕЧІЙНО- СТРУМИННОЇ ГОМОГЕНІЗАЦІЇ МОЛОКА	45
2.1. Теоретичні передумови подрібнення жирової фази молока при гомогенізації	45
2.2. Вплив надлишкового тиску та критерію Вебера на ступінь подрібнення жирової фази молока	57
2.3. Енерговитрати процесу протитечійно-струминної гомогенізації	65
2.4. Визначення гідравлічних параметрів протитечійно-струминного гомогенізатора	66
2.5. Визначення конструктивних параметрів форсунок протитечійно-струминного гомогенізатора молока	69
2.6. Визначення відстані між соплами форсунок протитечійно- струминного гомогенізатора молока	71
2.7. Визначення кута між форсунками протитечійно- струминного гомогенізатора молока	77
2.8. Вплив температури на протитечійно-струминну гомогенізацію	78
2.9. Комп'ютерне моделювання протитечійно-струминної гомогенізації з роздільним подаванням жирової фази	81

3. МЕТОДИКА ПРОВЕДЕННЯ ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНИХ ДОСЛІДЖЕНЬ ТА ВИЗНАЧЕННЯ ЯКОСТІ ГОМОГЕНІЗАЦІЇ	86
3.1 Програма експериментальних досліджень	86
3.2 Основні фактори та межі їх варіювання	87
3.3 Обґрунтування схеми та конструкції пристрою для дослідження протитечійно-струминної гомогенізації молока і порядок проведення експериментальних досліджень	89
3.4 Методика оцінювання якості гомогенізації	94
3.4.1 Аналіз способів оцінки якості гомогенізації	94
3.4.2 Статистична обробка результатів експериментального дослідження розмірів жирових кульок у молоці	99
3.4.3 Стабільність жирової фази після гомогенізації	100
3.5 Методика планування повнофакторного експерименту	100
3.6 Перевірка достовірностей теоретичних залежностей	103
3.7 Піноутворення	105
4. ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНІ ДОСЛІДЖЕННЯ ТА ПРАКТИЧНА РЕАЛІЗАЦІЯ РЕЗУЛЬТАТІВ	113
4.1 Вплив надлишкового тиску, відстані між соплами і температури молока на ступінь гомогенізації	113
4.2 Дослідження залежності впливу відстані між соплами форсунок	122
4.3 Дослідження впливу кута між форсунками	124
4.4 Дослідження впливу кута конусності насадок форсунок	125
4.5 Якість гомогенізації жирової фази молока	126
4.6 Розробка промислового зразка протитечійно-струминного гомогенізатора молока та методика його розрахунку	132
5. НАПРЯМИ КОНСТРУКТИВНОГО ВДОСКОНАЛЕННЯ ПРОТИТЕЧІЙНО-СТРУМИННИХ ГОМОГЕНІЗАТОРІВ	139
5.1. Протитечійно-струминний гомогенізатор з кільцевим відбивачем	139

5.2. Спосіб та конструкція протитечійно-струминної гомогенізації з роздільним подаванням жирової фази	143
5.3. Протитечійно-струминний гомогенізатор з оптимальними конструктивними параметрами	146
5.4. Конструкції клапанних головок з використанням способу протитечійно-струминної гомогенізації	149
5.4.1. Роз'ємне виконання клапанної головки для утворення зустрічних потоків	149
5.4.2. Клапанна головка з утворенням зустрічних потоків і коноїдальними каналами	151
5.4.3. Клапанна головка з утворенням зустрічних потоків і конусними каналами	154
5.4.4. Клапанна головка з утворенням зустрічних потоків і каналами для відведення емульсії після зіткнення	156
5.4.5. Клапанна головка з каналами в клапані та сідлі для утворення зустрічних потоків емульсії	162
ВИСНОВКИ	164
СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ	166

ПЕРЕЛІК УМОВНИХ ПОЗНАЧЕНЬ

- v_1 – швидкість струменя молока при виході з сопла форсунки, м/с;
- v_2 – швидкість молока після зіткнення струменів, м/с;
- v_3 – швидкість потоку молока до зіткнення при $a < d / 2$, м/с;
- Δp – надлишковий тиск у форсунках протитечійно-струминного гомогенізатора, Па;
- Δp_σ – перепад тиску для жирової кульки, Па;
- We – критерій Вебера;
- We^{n-c} – критерій Вебера модифікований для протитечійно-струминної гомогенізації;
- $\rho_{пл}$ – густина плазми молока, кг/м³ ;
- $\rho_{жс}$ – густина молочного жиру, кг/м³ ;
- u – швидкість руху жирової кульки відносно плазми молока, м/с ;
- d_k – критичний діаметр жирової кульки, м ;
- σ – поверхневий натяг жирової кульки, Н/м;
- Hm – ступінь гомогенізації;
- D, D_0 – середній діаметр жирових кульок після гомогенізації та до неї, м;
- D_{max} – максимальний діаметр жирової кульки, стабільної у даному потоці, м;
- ϵ_m – швидкість підводу енергії до одиниці маси, Вт/кг;
- φ – коефіцієнт швидкості форсунки;
- ρ_m – густина молока, кг/м³;
- k_1 – коефіцієнт, що залежить для протитечійно-струминної гомогенізації від властивостей молока;
- k_3 – коефіцієнт, що показує площу жирових кульок, яку

- спроможна зруйнувати прикладена до неї сила, $\text{м}^2/\text{Н}$;
- We_k^{n-c} – критичне значення критерію Вебера для протічійно-струминної гомогенізації;
- $\sigma_{ж-п}$ – поверхневий натяг на границі фаз жир - плазма, Н/м ;
- σ_n – поверхневий натяг на границі фаз повітря - плазма, Н/м ;
- $\sigma_{ж}$ – поверхневий натяг на границі фаз повітря - жир, Н/м ;
- Q – продуктивність гомогенізатора, кг/с ;
- t – тривалість гомогенізації, с .
- E_{num} – питомі енерговитрати на протічійно-струминну гомогенізацію, Дж/кг ;
- E – енерговитрати на гомогенізацію, Дж ;
- m – маса обробленого молока, кг ;
- μ – коефіцієнт витрат форсунки;
- d_c – діаметр сопел форсунок, м ;
- ε – ступінь стиснення струменя при виході з сопла форсунки;
- θ – кут конусності конічної насадки форсунки, град ;
- S_2 – площа бічної поверхні циліндра, утвореного соплами форсунок, м^2 ;
- a_{min} – мінімальна відстань між соплами форсунок, м ;
- a – відстань між соплами форсунок, м ;
- β – кут між форсунками, град ;
- T – температура гомогенізації, $^{\circ}\text{C}$;
- χ – показник стабільності емульсії молока;
- $k_{стаб}$ – коефіцієнт стабільності жирової фази молока.

ВСТУП

Процес приготування однорідних за складом композицій з дисперсних матеріалів шляхом їх гомогенізації в апаратах різних типів широко використовується у молочній промисловості. Гомогенізоване молоко має низку переваг перед незбираним: поліпшені сенсорні та смакові якості, краще засвоєння та менші втрати молочного жиру тощо. Тому гомогенізація молока стала нормативним процесом у більшості сучасних технологічних схем виробництва молочних продуктів: питного стерилізованого та пастеризованого молока, кисломолочних продуктів, морозива, молочних консервів, сиру.

З середини ХХ століття у виробництві для гомогенізації переважно використовувались клапанні гомогенізатори. Незважаючи на їх очевидні недоліки (велике питоме споживання енергії - 6,5...7,6 кВт·год/т, значна вартість, інтенсивне спрацювання деталей), такі машини є найбільш розповсюдженими і на сучасних підприємствах. Подальше вдосконалення конструкції клапанних гомогенізаторів вичерпало себе і не призводить до суттєвого зменшення енерговитрат. Тому актуальним і важливим є необхідність ґрунтовного дослідження механізмів подрібнення жирової фази молока для розробки нових, більш ефективних способів гомогенізації з метою зменшення енергоємності процесу гомогенізації та збільшення ступеня диспергування молочного жиру. Найбільш перспективною в цьому сенсі є протитечійно-струминна гомогенізація, яка дає змогу отримати ступінь диспергування таку ж, як і в клапанних гомогенізаторах, при істотно менших енерговитратах.

1. СПОСОБИ ГОМОГЕНІЗАЦІЇ ТА КОНСТРУКЦІЇ ГОМОГЕНІЗАТОРІВ МОЛОКА

1.1. Фізико-хімічні властивості молока і гомогенізація

Молоко являє собою натуральну емульсію жиру (дисперсної фази) у молочній плазмі (дисперсійній фазі). Молочний жир знаходиться у теплому 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 [20, 22, 72, 85, 143, 144, 211] 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 відстояних 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 іммуноглобулінами. При знижених температурах іммуноглобуліни адсорбуються на поверхні твердих жирових кульок, при збільшенні температури до 50...55⁰С вони денатурують і переходять у молочну плазму. Високі температури пастеризації зменшують відстоювання вершків, що обумовлюється руйнуванням іммуноглобулінів (температура 55⁰С і більше). Інтенсивне перемішування сприяє утворенню конгломератів жирових кульок [20, 22].

Терміном "гомогенізація" (буквально - підвищення однорідності) називають процес дроблення часток або крапель дисперсної фази та одночасний їх рівномірний розподіл у дисперсійній фазі. Стосовно молока можна сказати, що гомогенізація – це процес подрібнення жирових кульок молока та рівномірний розподіл їх за об'ємом плазми молока.

Деякі автори відносять гомогенізацію до первинної обробки молока. В Україні, як і у розвинутих країнах Америки та Західної Європи, гомогенізація поряд з такими процесами як пастеризація, стерилізація та нормалізація є нормативним процесом та використовується у більшості технологічних процесів молочної промисловості [202, 205].

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. Взагалі, гомогенізоване молоко має такі переваги перед негомогенізованим [20, 22, 36, 74, 135, 176, 177]:

- поліпшення смакових та сенсорних властивостей завдяки одночасному збільшенню в'язкості, однорідності, покращенню консистенції, більш інтенсивному білому кольору та зменшенню поглинання сторонніх запахів з оточуючого середовища;

- збільшення поверхні жирової фази полегшує засвоюваність молочного жиру організмом людини (за перетравлюванням жиру та білків гомогенізоване молоко відповідає кип'яченому);

- підвищена стійкість при зберіганні та транспортуванні внаслідок зменшення дестабілізації молочного жиру і триваліше зберігання первісного смаку молока;

- рівномірний розподіл молочного жиру та пов'язаних з ним вітамінів А і D;
- практично відсутня жирова плівка при кип'ятінні молока, що зберігає сухі речовини молока;
- відсутність залишків на стінках тари при виливанні молока;
- покращення якості продуктів з використанням гомогенізованого молока (кава з незбираним молоком, пудинги, каші, напої тощо);
- утворення більш міцних білкових згустків при виробництві кисломолочних продуктів та збільшення його перетравлюваності;
- значне підвищення в'язкості йогуртів, зниження виділення сироватки;
- запобігання розрідження консистенції при виробництві кефіру;
- покращення збивання сумішів для виробництва морозива і його структури. При заморожуванні морозива та його зберіганні не відбувається утворення грудочок жиру;
- створення повноти смаку відновлених молочних продуктів, запобігання появі водянистого присмаку.

Однією з характерних рис емульсій є стабільність протягом часу. Стабільність молока як молочної емульсії жиру у молочній плазмі обумовлена наявністю адсорбційних оболонок жирових кульок і у значній мірі залежить від їх структурно-механічних властивостей [70]. Встановлено, що на поверхні жирових кульок адсорбовані білки, фосфатиди, мідь, залізо, різні ферменти. Білки складають біля 60% складу оболонок, фосфатиди – 35%. Під оболонкою, в якій виділяють зовнішню та внутрішню частини, послідовними шарами розташовані легкоплавкі та тугоплавкі тригліцериди [23].

Під впливом різних факторів може відбуватися часткова або повна дестабілізація натуральної емульсії молочного жиру у плазмі, при цьому можливо розшарування на дві суцільні фази – жирову і водну. Ступінь такої дестабілізації залежить від характеру технологічної обробки молока,

структурно-механічних властивостей оболонки жирових кульок, кількості жиру. При цьому частина жирових кульок коалесцує – відбувається збільшення їх середнього діаметра. При збільшенні концентрації дисперсної фази ймовірність коалесценції значно зростає [17, 20, 206].

На ступінь дестабілізації значно впливає температура [20, 200, 203]. При заморожуванні та відтаюванні молока молочний жир стає у значній мірі дестабілізованим. При збільшенні концентрації молочного жиру його дестабілізація під впливом різних факторів збільшується. Максимальна стабільність жиру спостерігається при рН 6,0...7,0. Ступінь дестабілізації жиру посилюється як при збільшенні, так і при зменшенні рН. При порушенні сольової рівноваги також підвищується дестабілізація молочного жиру. При будь-якій механічній обробці молока (транспортуванні, перекачуванні, сепарації, очищенні) відбувається дестабілізація молочного жиру. Такий процес вкрай небажаний (окрім виробництва масла), так як зменшує стійкість при зберіганні і якість самого молока та продуктів його переробки.

Часто у дисперсне середовище додають емульгатори, які сприяють диспергуванню агрегатів жирових кульок, завдяки зменшенню поверхневого натягу складових частин молока [20, 207].

Основний білок молока - казеїн - складається з ряду фракцій, які являють собою індивідуальні білки. Казеїн у молоці існує у вигляді колоїдних часток, що складаються з різних фракцій казеїну, що зв'язані з кальцієм, неорганічним фосфором, магнієм і цитратами. Ці частки називають казеїнат-фосфат-кальцієвим комплексом. Їх величина коливається у межах від 30 до 300 нм, і мають вони сферичну форму [22, 40, 70]. При гомогенізації білкові частинки подрібнюються, причому дисперсність білкової фракції змінюється пропорційно дисперсності жиру (середній діаметр білкових часток зменшується з 107 нм до 59 нм). Поверхня жирової фази після гомогенізації збільшується, і на знов створеній поверхні адсорбуються поверхнево-активні фракції білків плазми (α -казеїн). В

спокійному стані оболонки жирових кульок гомогенізованого молока потовщуються та наближаються за товщиною до оболонок жирових кульок натурального молока [218]. В негомогенізованому молоці на поверхні жирових кульок адсорбуються 2,3% казеїну, а після гомогенізації – 25,2%. Диспергування білкових фракцій відбувається під впливом адсорбційних, а не гідродинамічних, як для жирової фази, сил [186].

В'язкість гомогенізованого молока збільшується завдяки збільшенню загальної поверхні жирової фази, а також абсорбцією білків на оболонках жирових кульок. Особливо помітна зміна в'язкості, якщо діаметр жирових кульок наближається до 1 мкм [140].

Температура молока впливає на такі його властивості, як в'язкість, густина та поверхневий натяг [20, 22, 74] (таблиці 1.1 – 1.3).

Таблиця 1.1 – Вплив температури на густину молока.

Вид молока	Густина, кг/м ³ , в залежності від температури молока, °С			
	20	40	60	80
Незбиране молоко жирністю 4,5%	1029	1020	1010	996
Пастеризоване молоко жирністю 2,5%	1026	1020	1012	1000
Знежирене молоко	1034	1026	1016	1007

Таблиця 1.2 – Вплив температури на поверхневий натяг молока.

Вид молока	Поверхневий натяг, Н/м, в залежності від температури молока, °С				
	15	20	25	30	40
Незбиране молоко	44,6	41,7	39,9	38,9	38,5
Знежирене молоко	50,1	48,1	46,8	46,6	46,7

Таблиця 1.3 – Вплив температури на в'язкість молока.

Вид молока	В'язкість, в залежності від температури молока, °С											
	5		10		15		20		30		40	
	$\times 10^{-3}$ Па·с	$\times 10^{-6}$ М ² /с	$\times 10^{-3}$ Па·с	$\times 10^{-6}$ М ² /с	$\times 10^{-3}$ Па·с	$\times 10^{-6}$ М ² /с	$\times 10^{-3}$ Па·с	$\times 10^{-6}$ М ² /с	$\times 10^{-3}$ Па·с	$\times 10^{-6}$ М ² /с	$\times 10^{-3}$ Па·с	$\times 10^{-6}$ М ² /с
Незбиране молоко	2,96	2,87	2,47	2,39	2,10	2,04	1,79	1,74	1,33	1,30	1,04	1,02

Властивості молока та складових компонентів молочної емульсії, які безпосередньо або опосередковано впливають на процес гомогенізації і використані у подальших аналітичних та експериментальних дослідженнях протитечійно-струминного гомогенізатора молока, зведені до таблиці 1.4 [4, 41, 74, 81, 118, 169, 175, 197].

Таблиця 1.4 – Фізико-хімічні властивості молока

Показник	Середнє значення	Границя коливання
1	2	3
Густина, кг/м ³ : – молока	1029	1027...1033
– плазми	1035	1033...1038
– молочного жиру	923	918...927
В'язкість молока, Па·с	0,00179	0,0011...0,0025
Поверхневий натяг на границі фаз, Н/м:		
– плазма–повітря	0,054	
– молоко–повітря	0,044	0,0424...0,051
– кристалічний жир–повітря	0,010	
– рідкий жир–повітря	0,030	
Титруєма кислотність, °Т	17	16...20
Величина рН	6,69	6,5...6,8
Температуропроводність, м ² /с	$13 \cdot 10^{-8}$	$(12,5...13,5) \cdot 10^{-8}$
Показник переломлення	1,35	1,3440...1,3615

Продовження таблиці 1.4

1	2	3
Температура кристалізації, °С:		
– молока	– 0,55	– 0,51...– 0,58
– легкоплавких молочних жирів	27	24...28
– тугоплавких молочних жирів	34	30...36
Температура розплавлення молочних жирів, °С:		
– легкоплавких	27	25...29
– тугоплавких	35	30...37
Температура денатурації молочного білку евглобуліну, °С	55	50...57

1.2. Огляд існуючих гіпотез руйнування жирових кульок молока

До теперішнього часу немає чітко визначеної, єдиної теорії диспергування жирової фази молока при гомогенізації. Основна причина цього – це важкодоступність безпосереднього спостереження руйнування жирових кульок внаслідок високих швидкостей їх руху і мікроскопічних розмірів. Недостатність експериментальних даних призвела до появи декількох гіпотез гомогенізації. Дуже обмежена кількість робіт присвячена обґрунтуванню механізму гомогенізації. Більшість авторів розробок нових гомогенізаторів обмежуються описом принципу їх дії та називають це "механізмом гомогенізації". Основними гіпотезами гомогенізації є [108, 180, 113, 115, 157, 215]:

- 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 Віттінга);
- 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 русі емульсії з прискоренням (К.О. Самойчука).

Крім основних гіпотез існують і ті, що не знайшли широкого розповсюдження або не мають достатнього обґрунтування: розрізання часток жиру при вході у клапанну щілину, вибух у рідині, стирання жирових кульок, удар струменя, ультразвукова гомогенізація. Але не виключено, що ці теорії в майбутньому отримають подальший розвиток, адже гідродинаміка містить достатню кількість парадоксів [180].

Розглянемо розвиток уявлень про механізм гомогенізації у клапанних машинах, які залишаються найбільш розповсюдженими на виробництві з появи на початку ХХ століття. Принцип їх дії полягає в продавлюванні під високим тиском молока крізь вузьку щілину. Тиск рідини створюється зазвичай плунжерним насосом і дорівнює у середньому 10...25 МПа, швидкість проходження крізь щілину 150...300 м/с [12, 84, 85, 99, 172].

Першу гіпотезу – розрізання жирових кульок при їх проходженні через гомогенізуючу щілину, спростував Барановський. Він розрахував висоту клапанної щілини, що виявилась більше розміру жирових кульок (приблизно 0,03...2,5 мм). Розрізання жирових кульок при вході рідини в щілину клапана не підтверджується також численними спробами гомогенізації холодного молока при температурі менше 30⁰С, коли жир знаходиться у твердому стані, які показали, що при будь-якому тиску диспергування твердих жирових кульок практично неможливо. За гіпотезою Барановського, гомогенізація відбувається в самому каналі між сідлом і клапаном [12, 84]. В гомогенізуючій щілині спостерігаються значні градієнти швидкості, тому що швидкість плинину велика, а товщина щілини складає частки міліметра. За Барановським швидкість жирової кульки при

гомогенізації змінюється від досить малої початкової швидкості v_0 (кілька метрів за секунду) у каналі сідла діаметром d до досить великої v_m (кілька сотень метрів за секунду) у клапанній щілині висотою h (рис. 1.1). Жирова кулька спрямовується спочатку по каналу сідла із середньою швидкістю v_0 , змінює напрямок і рухається до граничного перетину зі швидкістю v_0 , яка значно менше v_m . При переході від малих швидкостей до високих в жировій кульці відбуваються внутрішні деформації, його передня частина включається в потік у гомогенізуючій щілині з великою швидкістю v_m , витягається в нитку і роздрібнюється у виді дрібних крапельок у результаті дії сил поверхневого натягу.

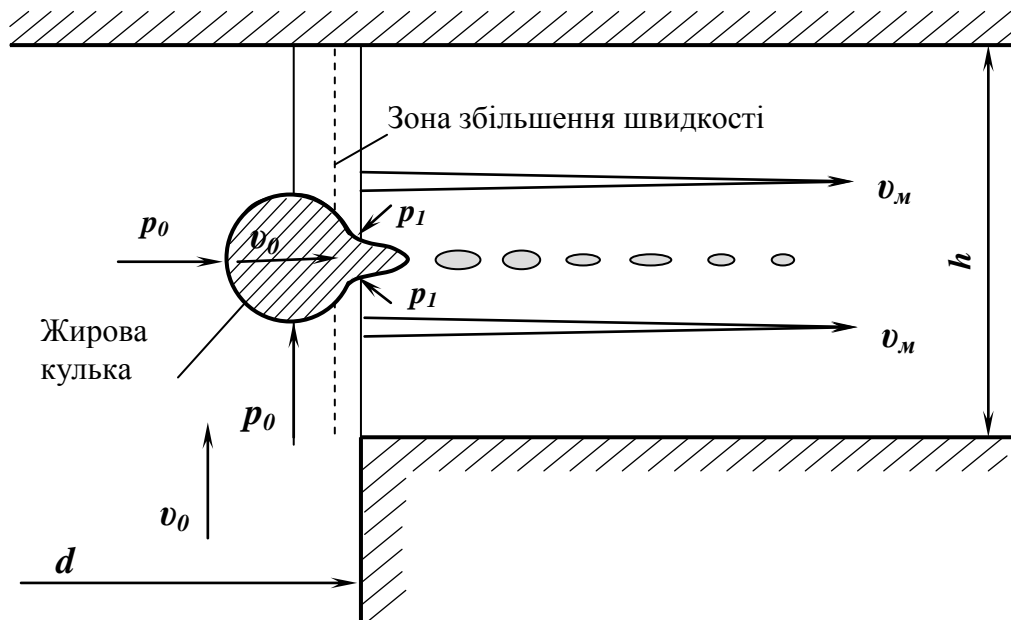


Рис. 1.1. Схема гомогенізації по Барановському.

Швидкому витягуванню жирової краплі і відриванню від неї дрібних часток сприяє гідродинамічний тиск на кульку p_0 , що з боків і за краплею значно більше тиску p_1 у зоні високих швидкостей. Таким чином, ефективність гомогенізації залежить, насамперед, від швидкості потоку v_1 при вході рідини в клапанну щілину, а, отже, і від тиску гомогенізації, величина якого завжди визначає швидкість. Згідно відомої гідравлічної залежності, при підвищенні тиску швидкість v_1 збільшується пропорційно квадратному кореню з перепаду тисків ΔP ($\Delta P = p_1 - p_0$) [170].

Така схема гомогенізації дійсна лише для жирових часток, розміри яких порівняні з висотою щілини [108]. Однак жирова кулька на 1...2 порядки менша. Розрахунки показали, що необхідний для руйнування жирової кульки перепад тиску досягається лише при умові входу потоку в клапанну щілину під кутом 68° , що нереально на практиці [180].

За гіпотезою Суркова [171], жирові кульки, знаходячись у полі швидкостей потоку, піддаються обертальному рухові, внаслідок якого під впливом відцентрових сил кульки розриваються на більш дрібні. Для досягнення максимально високого ступеня дисперсності необхідно збільшувати швидкість плинину рідини до визначеного критичного значення. При цьому необхідно зменшити величину гомогенізуючої щілини, підвищуючи тиск процесу, щоб уникнути турбулізації потоку. Пристрій гомогенізуючої голівки повинний сприяти створенню умов для стійкого ламінарного руху, адже розрахований розмір жирової кульки в 2,9 рази менше при ламінарному русі ніж при турбулентному.

Ребіндер [141] (а згодом і Віттінг [220]) указує, що жирові кульки під дією високих градієнтів швидкостей руху рідини у вузькій щілині витягаються в циліндри і при співвідношенні їхньої довжини до діаметра, рівному або більшому 11, стають хитливими і мимовільно розриваються на дрібні сферичні крапельки. Ці висновки були підтверджені рядом експериментальних робіт, в яких при продавлюванні під малим тиском через капіляр висококонцентровані емульсії гомогенізувалися, що відбувалося внаслідок розтягнення великих деформованих крапель жиру в капілярі до їхнього розпаду на більш дрібні краплі [78]. За інших рівних умов, ефективність гомогенізації залежить від швидкості руху рідини в капілярі; вона збільшується зі зменшенням в'язкості, наприклад, при підвищенні температури [77]. Одночасно з дробленням великих жирових кульок відбувається і коалесценція дрібних, діаметром до 1 мкм; краплі, діаметр яких перевищує 1 мкм, стабілізуються [79]. Згідно з припущенням Віттінга [220], гомогенізація проходить чотири стадії: наявність натуральної жирової

кульки, покритої первинною оболонкою; розтягнення цієї кульки в ниточки, що покриваються новими оболонками; утворення з ниточок скупчень (грон) жирових кульок — стадія вісколізації; розпад цих скупчень на дрібні індивідуальні жирові кульки — стадія мікронізації. При правильному режимі гомогенізації вона завершується останньою стадією, при його порушеннях гомогенізація може закінчитися стадією вісколізації.

Ретельні дослідження існуючих механізмів гомогенізації, проведені Фроловим, Арсентьєвим і Куцаковим [181], доводять, що в'язкість суміші і різниця густини жиру та плазми не впливають на гомогенізацію.

За гіпотезами Суркова і Віттинга рушійною силою гомогенізації є градієнт швидкості потоку, який в клапанній щілині тим більше, чим ближче до стінок клапана розташована жирова кулька. Проте основний потік молока проходить поблизу середини щілини, де градієнт швидкості незначний. Тому, якщо дотримуватись вище приведених гіпотез, то більша частина жирових кульок не повинна подрібнюватись [180], що суперечить практиці.

Класична теорія деформації та руйнування краплі в залежності від ступеня турбулентності належить Колмогорову, який розглядав цей процес як результат великої кількості випадкових явищ і на основі теорії вірогідності отримав розподіл крапель за розмірами згідно логарифмічного закону. Він винайшов формули для критерію руйнування жирових кульок (критерію Вебера), що знайшло своє підтвердження для розбавлених емульсій (концентрація дисперсної фази менше 0,1%). На основі цієї теорії Вальстра [218] знайшов залежність, згідно якої максимальний діаметр краплі D_{max} , стабільної у турбулентному потоці, відповідає [53]

$$D_{max} \sim \dot{\epsilon}_m^{-0,4}, \quad (1.1)$$

де $\dot{\epsilon}_m$ - швидкість підводу енергії до одиниці маси, Вт/кг.

Теорію турбулентності підтверджує те, що накладення механічних коливань на гомогенізуючий клапан (що підвищує турбулізацію рідини) значно підвищує диспергуючий ефект процесу, але швидкість потоку та

ступінь його турбулізації (при Re від 12000 до 50000) не впливають на процес дроблення краплі [66, 193]. Турбулентність з боку класичної гідродинаміки розглядається як напластування поперечних потоків, що направлені перпендикулярно вісі руху рідини [18, 37]. Для мікроскопічних процесів дроблення жирових кульок нерівномірність потоку не тільки в просторі (при ламінарному русі), але і у часі створює мікроградієнти, які істотно впливають на диспергування. При цьому турбулентність як така не створює нового механізму гомогенізації [180].

Таким чином, за останні 60 років накопичений величезний експериментальний матеріал досліджень гомогенізації в клапанних машинах, але безпосередньо спостерігати руйнування жирових кульок поки що не вдавалось. Проривом у цьому напрямі стали дослідження доктора Фредеріка Іннінгса в університеті Лунда (Швеція) [204]. В гомогенізуючій голівці він створив крихітне сапфірове вікно з пульсуючими лазерами вздовж просвіту. Таким чином він дістав можливість крок за кроком спостерігати послідовність процесу розщеплювання жиру і фотографувати його швидкісними камерами. В результаті отримано висновок, що жирові краплі деформуються під дією прискорення при вході в щілину і проходять по ній в такому деформованому стані, у витягнутій формі. Розщеплювання відбувається тільки під дією турбулентних потоків, коли краплі виходять назовні. Саме градієнт швидкості – феномен відмінності швидкості руху різних частин розтягнутої краплі – забезпечує її розщеплювання. Слід однак зауважити, що отримані фотографії процесу так і не були представлені.

У проточній частині клапанів гомогенізаторів при тиску $5 \cdot 10^6 - 5 \cdot 10^7$ Па має місце явище кавітації, що підтверджується ерозією поверхні клапана [67, 69, 89, 187]. Незважаючи на те, що гіпотеза кавітаційного диспергування викликала багато спорів, в наш час вона перетворилася на розвинену та добре розроблену теорію [178]. Фізико-математична модель процесу кавітаційного диспергування (Ткаченко) полягає у захваті пульсуючим кавітаційним пухирцем жирової краплі, яка, в свою чергу,

швидко рухається до пухирця. В момент зіткнення пухирець деформується, а потім захоплюється з утворенням кумулятивного струменя, що виникає з боку жирової краплі. Струмінь втягує краплю до пухирця, розтягує та подрібнює її. Доведено, що для отримання більш високодисперсних емульсій необхідно генерувати кавітаційне поле з пухирцями якомога менших розмірів, наприклад, шляхом збільшення швидкості потоку. Тобто, як і в теорії Барановського, диспергування жирових кульок досягається саме завдяки збільшенню швидкості у клапанній щілині, хоча Барановський запропонував абсолютно інший механізм гомогенізації. Завдяки теорії Ткаченко легко пояснюється той факт, що при появі кавітації істотно змінюється залежність між ступенем гомогенізації та енерговитратами і при тій самій енергії, що підводиться, гомогенізація стає більш ефективною [87].

Проблема застосування теорії Ткаченко на практиці полягає в тому, що маловірогідним є збіг у просторі трьох явищ: утворення кавітаційного пухирця, зіткнення його з жировою кулькою і утворення кавітаційного струменя.

Орешиною [92, 93, 113, 114] висунута гіпотеза дроблення краплі здуванням мікрочасток і потім розвинута Паляничкою Н.А. [121–124]. Жирова кулька при цьому подрібнюється по аналогії з руйнуванням краплі рідини в інтенсивному потоці повітря. Швидкісною кінозйомкою фіксувалося дроблення крапель олії у рідині при впливі на них ультразвукових та ударних збурювань. Дійшли висновку, що стадії руйнування під дією ударних імпульсів виглядають таким чином. Спочатку крапля деформується у дископодібне тіло, потім її центральна частина витягується у купол, поверхня куполу проривається, а тор, що залишився, розпадається на ланцюжок крапель. Під впливом ультразвукових коливань з поверхні крапельки зривалися ще більш дрібні краплі, що утворювали туман з її підвітряного боку. Алгоритм розрахунку пристроїв ударної дії заснований на обчисленні відносних швидкостей краплі та оточуючого середовища з наступним розрахунком критерію Вебера. Час з моменту досягнення

критичного значення критерію Вебера до повного руйнування називається часом індукції. Встановлена залежність часу індукції від критерію Вебера [44, 113]. В даній теорії як фактор руйнування жирових кульок при гомогенізації вперше виявлений час дії руйнівних сил [149]. Час індукції складає незначну долю від загальної тривалості дроблення, можливо завдяки цьому час руйнування як окремий фактор гомогенізації не був виявлений іншими дослідженнями. На експериментальному пристрої, що поєднує принципи ударних та ультразвукових коливань, середній розмір жирових кульок при гомогенізації молока досягає 0,5 мкм.

Фіалковою висунута гіпотеза скловання жирових кульок молока в процесі субкавітаційного диспергування, згідно якої у зонах високих швидкостей гомогенізаторів (наприклад, клапанного), тиск рідини знижується до значень, при яких відбувається сублімація жирових кульок – перехід їх у твердий стан і розкрашування на більш дрібні частки [179, 180]. У підтвердження своєї теорії приводиться поле швидкостей у зазорі клапанного гомогенізатора, де відмічені зони зниженого тиску. Слід зауважити, що значення недостатні для миттєвого замерзання жиру, але автор гіпотези пояснює це неможливістю розташувати датчики ближче і більш точно виміряти тиск. Автори не дослідили час, необхідний для сублімації, адже швидкість протікання гомогенізації в клапанних машинах становить приблизно 10^{-5} с.

В результаті досліджень різновиду роторно-пульсаційного апарату – пульсаційного апарату з ротором, що вібрує висунута гіпотеза, що прискорення потоку є базовий чинник для руйнування жирових кульок [154–157, 159, 195]. при русі емульсії з прискоренням за рахунок різної густини молочного жиру і плазми виникають сили інерції, що призводять до руху жирової кульки відносно плазми – швидкості ковзання, при перевищенні деякого критичного значення якої, жирова частка деформується, а потім руйнується.

Теоретично і експериментально визначений зв'язок між прискоренням

руху молока та дисперсністю молочного жиру [215, 216]. Діаметр дисперсійної частки залежить від прискорення молока при його русі крізь канали переривника. Слід зауважити, що прискорення є визначальною для руйнування крапель у механізмі нестійкості Релея-Тейлора [148].

Для перевірки гіпотези про визначальну роль в процесі диспергування прискорення потоку емульсії та розповсюдження результатів досліджень, проведених на ПА з ВР на інші типи гомогенізаторів, необхідні подальші дослідження.

У результаті проведеного аналізу зрозуміло, що для підтвердження більшості теорій бракує наявності спостережень за процесом руйнування жирових кульок. Тому такі теорії носять суто теоретичний, умоглядний характер. За результатами спостережень за процесом руйнування жирових кульок М.М. Орешіною та Ф. Іннінгсом витікає, що рушійною силою механізму гомогенізації є градієнт швидкості потоку, під дією якого жирова кулька розтягується та розпадається на краплі. Однак енергоефективність такого механізму руйнування низька, як показують питомі енерговитрати клапанних гомогенізаторів (становлять 7–9 кВт·год/т).

Швидкість ковзання жирової кульки відносно плазми молока вважають рушійною силою процесу Орешіна М.М., Ф. Іннінгс та інші вчені. Тому перспективним напрямом вдосконалення апаратів для гомогенізації молока є конструкції, які дозволяють створювати максимальну швидкість ковзання жирової кульки відносно дисперсійної фази молока.

1.3. Огляд існуючих пристроїв для гомогенізації молока

У промисловості для гомогенізації молока використовують спеціальні апарати – гомогенізатори. Велика радянська енциклопедія 1972 р. видання визначає гомогенізатор як "апарат для отримання однорідних мілко подрібнених сумішей, а також емульсій високої дисперсності". На практиці до гомогенізаторів відносять також емульсори і диспергатори – апарати для

створення дрібнодисперсних емульсій, в яких також відбуваються процеси подрібнення дисперсної фази емульсії і її перемішування. Стосовно молочної промисловості умовно прийнятий такий розподіл між ними: якщо середній діаметр подрібнених часток більше 2 мкм – такий апарат називають емульсором або диспергатором, якщо менше 2 мкм – це гомогенізатор [180].

Розробники апаратів для перемішування молока та молочних продуктів до призначення своїх машин часто додають і гомогенізацію. Дійсно, при достатньо інтенсивному перемішуванні молока внаслідок турбулізації та завихрювань створюються умови для подрібнення жирових кульок молока та розбивання агломератів жирових кульок, тому мішалки, що створюють потоки з турбулентним режимом руху рідини, також можуть бути віднесені до класу гомогенізаторів [19].

На сьогоднішній час не існує визначеної, закріпленої стандартами класифікації гомогенізаторів, тому для упорядкування цих машин пропонується класифікація машин для гомогенізації молочної промисловості за конструктивними ознаками і переважним принципом подрібнення (рис. 1.2) [148, 108].

Найбільш чисельною групою серед щілинних гомогенізаторів (в яких реалізується принцип продавлювання крізь щілину) є клапанні гомогенізатори, принцип диспергування у яких розглянутий у підрозділі 1.2.

Існує велика кількість конструкцій клапанних гомогенізаторів, що відрізняються: конструкцією клапана [20, 24, 85, 100, 110], способом нагнітання рідини [20, 100, 203]; видом продукту, що подається (незбиране молоко або вершки з наступним перемішуванням зі знежиреним молоком) [64]; за видом виконання гомогенізуючої головки [99, 100, 167]; кількістю ступенів гомогенізації [99, 100, 213]; напрямком руху продукту відносно сидла клапана (всередину або назовні) [20]; за способом регулювання тиску [167] та висотою підйому клапана [20]. Пропонується їх класифікація (рис. 1.3).

Незважаючи на наявність великої кількості клапанних гомогенізаторів, їх основні техніко-економічні та технологічні параметри коливаються у невеликих межах [24, 38, 108, 167, 213].

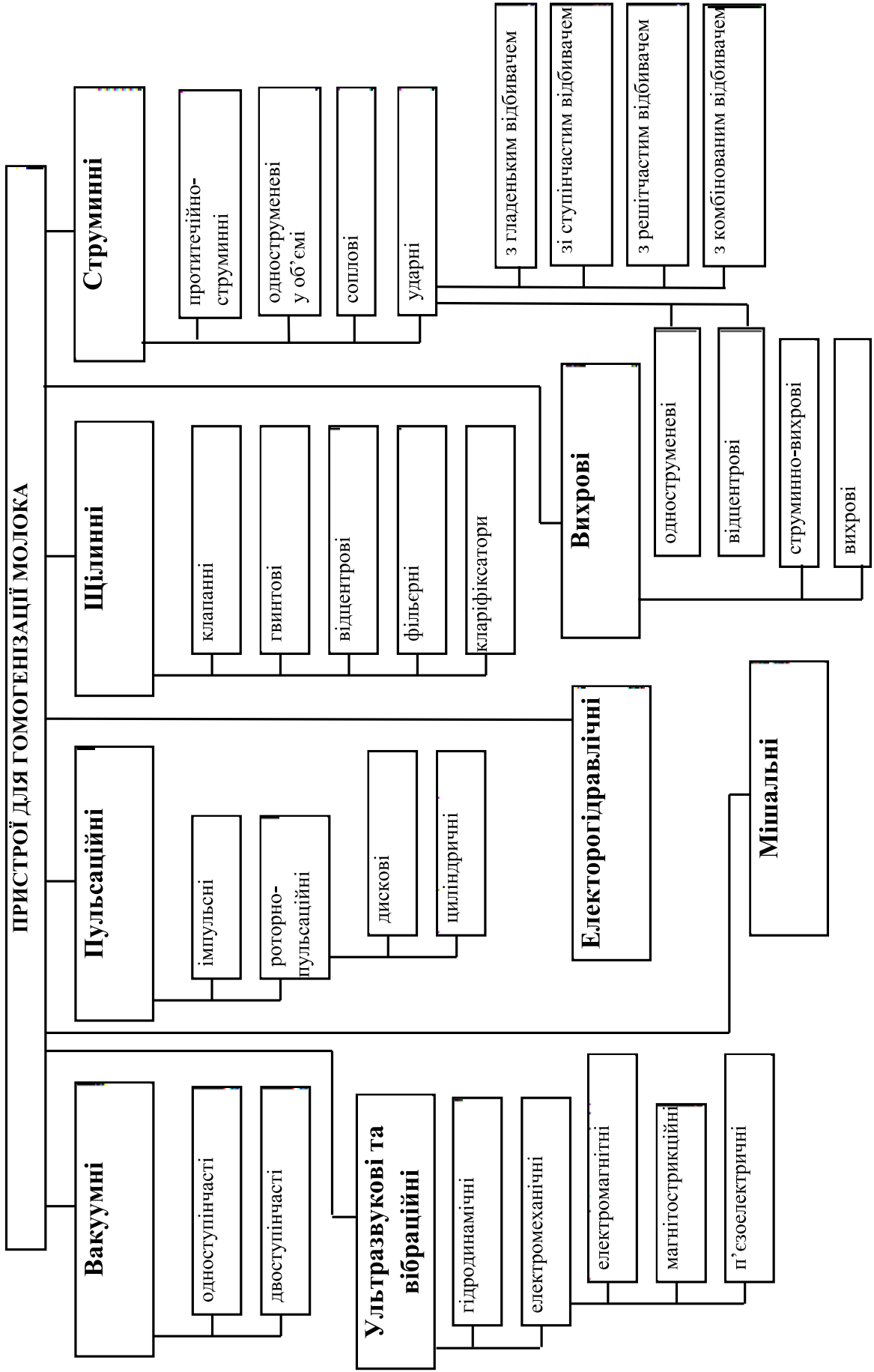


Рис. 1.2. Класифікація пристроїв для гомогенізації молока

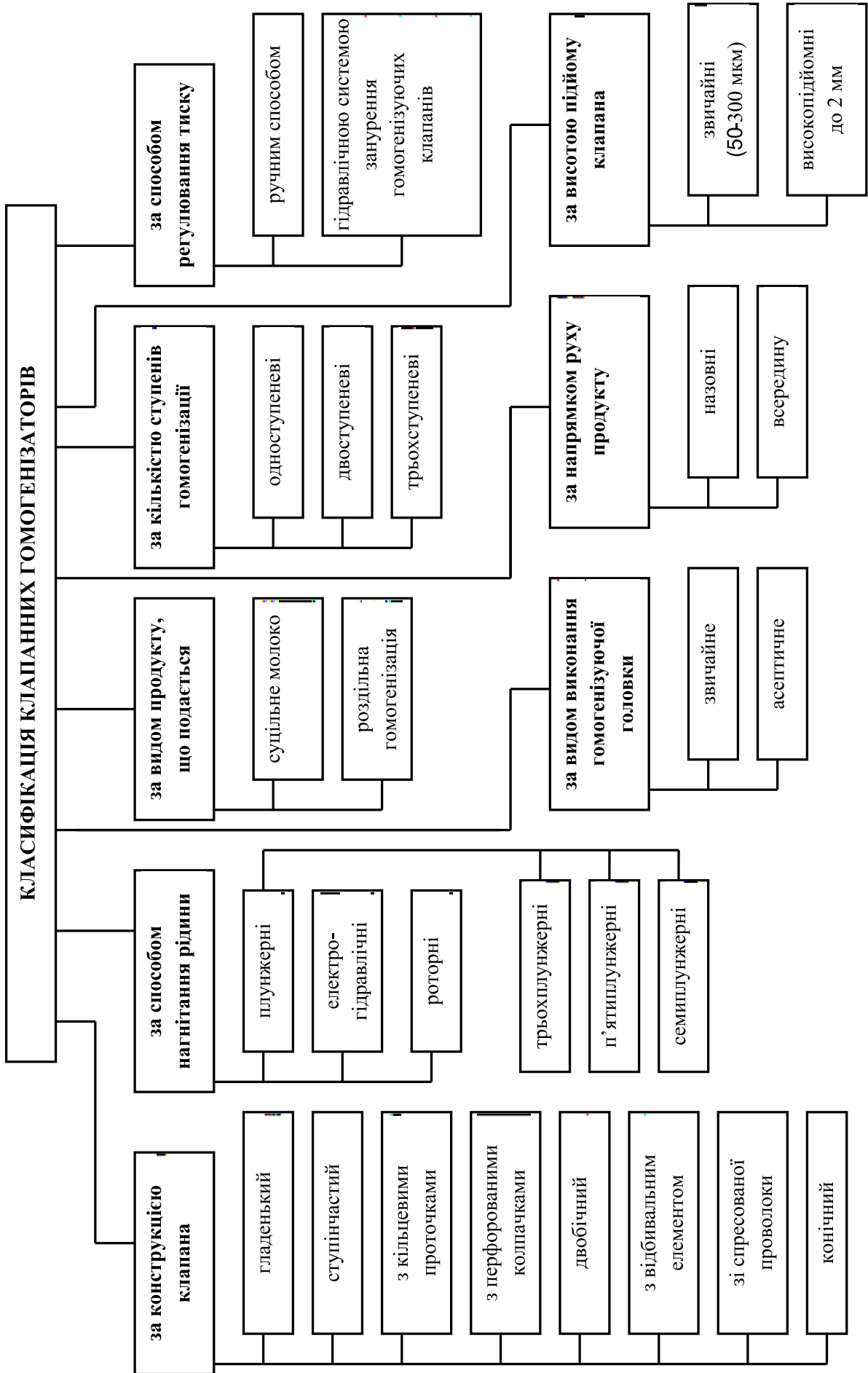


Рис. 1.3. Класифікація клапанних гомогенізаторів.

Механічний коефіцієнт корисної дії (ККД) клапанних гомогенізаторів досить великий (70...85%). Можливості щодо вдосконалення механічної частини таких гомогенізаторів майже вичерпано, а технологічний ККД (відношення енергії, необхідної для подолання сил поверхневого натягу жирових кульок, до енергії, що споживає насос гомогенізатора) дорівнює $1,8 \cdot 10^{-5}$ [87]. Тому переважна більшість удосконалень клапанних гомогенізаторів спрямована на зміну характеру потоку у гомогенізуючій голівці. Запропоновані з цією метою додаткові пристрої та зміни конструкції деталей і вузлів призводять до зниження потужності до 20%.

Пропонується конструкція гомогенізуючого клапана з проточками і гіпотеза руйнування жирових кульок в клапанному гомогенізаторі за рахунок сили опору кульки при русі її у плазмі молока, що виникає при вихровій течії (турбулентному сліду) жирової кульки [110]. На думку автора, диспергування відбувається за типом "парашут" – одному з видів вібраційного механізму руйнування крапель. Однак, у роботі [178] показано, що такий тип дроблення крапель можливий лише при частотах збурюючі коливань вище 3000 кГц, що навряд чи створюється у клапані гомогенізатора. Крім цього, нові розробки спрямовані на зниження рівня шуму машини, зменшення зносу деталей, полегшення обслуговування, спрощення конструкції [100, 217, 219, 198, 203].

Виготовленням гомогенізаторів клапанного типу займаються багато підприємств. За кордоном найбільш відомі з них це Rannie (Данія), Alfa-Laval (Швеція), Manton – Gaulin, "Cherry-Burrell" (США), "APV" (Великобританія) "Bran&Luebbe" (Німеччина). В Україні Одеським механічним заводом "ОДМЕЗ" випускаються гомогенізатори К5-ОГ2А-250, К5-ОГ2А-500, К5-ОГ2А-1,25, А1-ОГ2М-2,5, А1-ОГ2М та К5-ОГА-10 (таблиця 1.6). Крім того, випускаються гомогенізатори серій П8-ГМ, ОГЗМ, ОГВ, МИ-ОГМ, АГ, А1-ОГ2-С. Показники закордонних клапанних гомогенізаторів несуттєво відрізняються від приведених вище [38, 99, 108, 199, 202, 219].

Таблиця 1.5 – Порівняльні показники технічних характеристик гомогенізаторів

Марка гомогенізатора	K5- ОГ2 А- 250	K5- ОГ2 А- 500	K5- ОГ2 А- 1,25	A1- ОГ2 М-2,5	A1- ОГ2 М	K5- ОГА- 10
Продуктивність, л/год	250	500	1250	2500	5000	10000
Тиск гомогенізації, МПа	12,5	18	20	20	20	17
Установлена потужність двигуна, кВт, не більше	4,0	5,5	11,0	18,5	37,0	55,0
Габаритні розміри, мм						
довжина	970	970	970	1475	1475	1475
ширина	650	650	860	1120	1120	1270
висота	1100	1100	1400	1640	1640	1650
Маса, кг, не більше	400	420	760	1350	1400	1800
Питома енергоємність, кВт·год/т	16,0	11,0	8,8	7,4	7,4	5,5

Максимальна ефективність гомогенізації клапанних гомогенізаторів при тиску 25 МПа, двоступінчастій обробці та температурі процесу 60...80 °С сягає 75%, а середній діаметр жирових кульок дорівнює 0,75 мкм.

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...20 МПа [12]

$$d = \frac{3,8 \cdot 10^{-3}}{\sqrt{\Delta p}}. \quad (1.2)$$

Разом з цим клапанні машини мають істотні недоліки: висока вартість (близько 30 тис. грн. при продуктивності 5000 л/год), високі питомі енерговитрати (6...8 кДж/т) [103], складність обслуговування, швидкий знос робочих поверхонь клапана [187], висока металомісткість, значна маса і габаритні розміри. Підвищення робочого тиску більше 25 МПа практично не збільшують дисперсність жиру. Численні вдосконалення гомогенізуючої головки не приводять до підвищення максимального ступеня диспергування і до істотного зменшення енерговитрат.

Ідея роздільної гомогенізації реалізована у кларіфікаторах - машинах для одночасного очищення та гомогенізації молока [20]. Подрібнення дисперсної фази в ньому відбувається аналогічно клапанному при обертанні гомогенізуючого диску, але завдяки меншому тиску ефективність гомогенізації кларіфікатора не перевищує 40%.

У гвинтових гомогенізаторах продукт проходить по різьбовій поверхні з зазорами, що регулюються. У такий спосіб гомогенізуються продукти у агрегаті ALM, що випускаються французькою фірмою "П'єр Герен". При проходженні продукту між виступами різьбової поверхні і стінкою, продукт гомогенізується подібно тому, як це відбувається у клапанних гомогенізаторах. Одночасно з диспергуванням частка продукту, що знаходиться між різьбовими виступами, зміщується на невеликий кут, тому в таких агрегатах досягається краще перемішування (розподілення дисперсної фази) продукту. Ефективність гомогенізації гвинтових гомогенізаторів складає 48% [39, 46, 114]. Механізм гомогенізації не відрізняється від клапанних машин.

Відцентрові гомогенізатори працюють за принципом відцентрових насосів, але на відміну від них, продукт під дією відцентрової сили на периферії колеса повинен пройти через вузьку щілину [167], тобто принцип дії не відрізняється від клапанних. Ефективність гомогенізації роторних гомогенізаторів не перевищує 35% [20]. Для її підвищення необхідно збільшити частоту обертання ротора, що викликає значні труднощі.

У фільтрному гомогенізаторі продукт продавлюється через паралельно розташовані отвори з постійним або змінної величини перерізом. Такими апаратами є фільтрний апарат СВА-3 (виробник ЗАО "Плат", Росія), та агрегат МДХ401 (виробник Унитех&Флант-М, Росія - Болгарія). При роботі таких апаратів досягається ефективність гомогенізації близько 17%, а при обробці протягом 20 хвилин – 20% [46, 114].

У пульсаційних пристроях для гомогенізації напруги зсуву, сили кавітації і інерції діють одночасно [57, 58, 76, 134, 138, 194]. Дія таких