

## ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНІ ДОСЛІДЖЕННЯ ПАРАМЕТРІВ СТРУМИННОГО ГОМОГЕНІЗАТОРУ МОЛОКА З РОЗДІЛЬНИМ ПОДАВАННЯМ ВЕРШКІВ

Ковальов О. О., Самойчук К. О., Паляничка Н. О., Верхованцева В. О., Янаков В. П.

### 1. Вступ

Гомогенізація являє собою процес подрібнення жирових кульок та їх рівномірного розподілу в об'ємі плазми молока. Ця операція належить до одного з основних нормативних процесів для більшості продуктів молокопереробної галузі. Водночас з цим слід відзначити високі енергетичні витрати процесу для найбільш поширених конструкцій клапанних гомогенізаторів, що діють за принципом протискування молока у вузький зазор між сідлом і клапаном. Інші конструкції гомогенізаторів, серед яких відомі ротаційні, ультразвукові, електрогідравлічні та вакуумні, не забезпечують потрібного ступеню диспергування жирових кульок та необхідного дисперсного складу готового продукту [1, 2].

До загальних проблем підвищення ефективності гомогенізації відносять відсутність єдиної теоретичної бази. Відомі 6 гіпотез гомогенізації, на базі яких виготовлено понад 10 базових конструкцій. Складність дослідження процесу полягає у великих швидкостях руху, що сягають кількох сотень метрів на секунду та дрібного розміру часток, що коливається у діапазоні 0,8–1,2 мкм. Протягом більш ніж сторічної історії використання операції неодноразово робились спроби дослідити процеси, що призводять до зменшення розмірів жирових кульок.

Одним з відомих досліджень є дослідження процесу за допомогою фотографій, що отримані за допомогою лазера [3]. Однак існуючий на той час рівень технологій не дозволив дійти висновку, який вичерпно пояснював процеси, що відбуваються в зоні клапанної щілини. В роботі [4] робилась спроба дослідити процес подрібнення жирових кульок в комплексному полі ламінарного потоку. Однак суттєвих висновків щодо механізму подрібнення дійти не вдалося. Це пояснюється тим, що числа Вебера, що виникають при цьому режимі, більш ефективні для подрібнення жирових кульок в повітряному середовищі.

Іншу спробу з використанням прозорої ємності та пульсуючого лазера була зроблена в [5], де стверджувалось, що подрібнення відбувається під дією різниці градієнтів дисперсійної та дисперсної фаз. Останні дослідження свідчать, що вирішальну роль в процесі подрібнення жирових кульок відіграє різниця швидкостей дисперсійної та дисперсної фаз продукту [6], тому дослідження в цьому напрямку є актуальними.

З метою дослідження процесу роздільної гомогенізації на базі кафедри обладнання переробних і харчових виробництв Таврійського державного агротехнологічного університету (Мелітополь, Україна) створено лабораторну установку. Установка заснована на принципі створення максимальної різниці швидкостей знежиреного молока та вершків. При цьому в камері гомогенізації вста-

новлюється гідродинамічний режим з числами Вебера більше 50, в результаті чого відбувається зменшення розмірів жирових кульок в молоці.

## 2. Об'єкт дослідження та його технологічний аудит

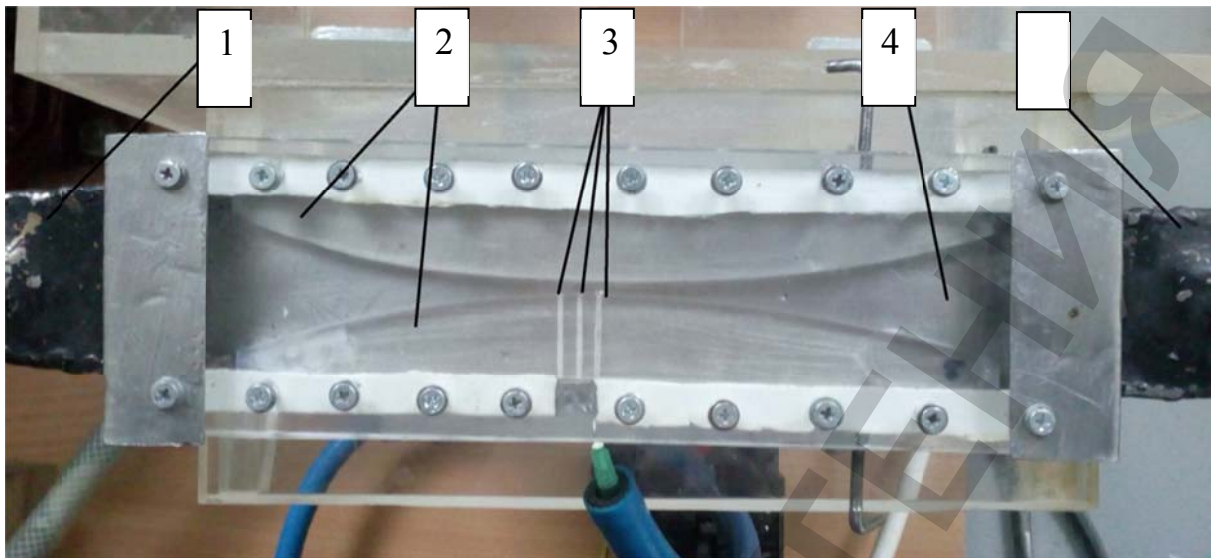
Об'єктом дослідження є процес струминної гомогенізації молока з роздільним подаванням жирової фази. Дослідження процесу проводилось на розробленій лабораторній установці для струминної гомогенізації молока з роздільним подаванням жирової фази, зображеної на рис. 1.



**Рис. 1.** Схема установки струминного гомогенізатора молока з роздільною подачею вершків: 1 – насос типу НШ 10 (Україна) для подачі знежиреного молока; 2 – електричний двигун трифазний; 3 – з'єднувальні патрубках; 4 – ємність для знежиреного молока; 5 – камера гомогенізації; 6 – манометр; 7 – дроселюючий вентиль; 8 – блок керування насосом подачі вершків; 9 – пакетний вимикач; 10 – ємність з вершками з відцентровим насосом

Знежирене молоко з ємності 4 під тиском, що створює насос 1 з приводом від електричного двигуна 2 по з'єднувальних патрубках 3 надходить до камери гомогенізації 5. Швидкість подавання дисперсійної фази, що є функцією тиску регулюють за допомогою дроселюючого вентиля 7, значення тиску контролюють за манометром 6. В місці найбільшого звуження центрального каналу камери гомогенізації з ємності з вершками 10 насосом подається встановлене за допомогою блоку керування насосом подачі 8 кількість вершків. З метою забезпечення вимог техніки безпеки в установці передбачено два пакетних вимикачі 9.

Конструктивне рішення для камери гомогенізації наведено на рис. 2.



**Рис. 2.** Схема камери струминного гомогенізатора молока з роздільною подачею вершків: 1 – патрубок підведення знежиреного молока; 2 – направляючі; 3 – канали подавання жирової фази; 4 – кришка з органічного скла; 5 – патрубок відведення гомогенізованого молока

Конструкція (рис. 2) складається з патрубку підведення знежиреного молока (жирність до 0,05 %), по якому продукт під необхідним тиском подається до звуження, що сформоване двома направляючими потоку 2. У місці найбільшого звуження до молока у співвідношенні розрахованому з рівняння матеріального балансу по тонких каналах 3 подаються вершки [7].

Така конструкція дає змогу реалізувати принцип роздільного подавання вершків, за якого забезпечується економія енергетичних витрат на рівні близько 70 %, що досягається за рахунок зниження кількості продукту, який гомогенізується. Крім цього, роздільна гомогенізація сприяє обмеженню механічного впливу на білкову фазу, що забезпечує більшу стабільність емульсії [1]. Спостереження за перебігом процесу дозволяє здійснювати кришка 4 з органічного скла. Відведення гомогенізованого молока відбувається крізь патрубок 5.

Лабораторна установка струминного гомогенізатору молока з роздільним подаванням жирової фази згідно теоретичних розрахунків здатна забезпечити продуктивність на рівні 1600–2000 кг/год, що є достатнім для більшості технологічних процесів галузі. Одночасно з гомогенізацією проводиться нормалізація молока, що знижує енергетичні витрати процесу, однак характеризується необхідністю проведення попереднього сепарування молока, отриманого від різних виробників.

До недоліків устаткування слід віднести можливість виникнення явища облітерації каналів подавання вершків. З метою усунення даного недоліку пропонується періодична обробка устаткування речовиною, що містить розчинник мінеральних відкладень. Крім цього, установка не дає змоги підтримувати температуру дисперсійної та дисперсної фаз продукту, зміна яких від рівня номінального значення 60 °C погіршує умови подрібнення жирових кульок.

### **3. Мета і задачі дослідження**

*Метою дослідження є визначення характеру залежностей між факторами процесу та середнім розміром жирових кульок після гомогенізації. Отримані залежності розширяють сферу відомостей щодо практичного застосування струминного гомогенізатору молока з роздільною подачею жирової фази. При зниженні енерговитрат на рівні 70 % від клапанних зразків середній розмір часток складатиме 0,85–1,1 мкм [8].*

Для досягнення поставленої мети необхідно:

1. Визначити впливові фактори процесу і розробити методіку проведення дослідження.
2. Провести дослідження впливу швидкостей подавання знежиреного молока, розміру каналу в місці найбільшого звуження та каналу подавання вершків на якість диспергування.
3. Визначити оптимальні значення обраних факторів, виходячи з умови забезпечення найменшого розміру жирових кульок.

### **4. Дослідження існуючих рішень проблеми**

Останні тенденції галузі стверджують про необхідність застосування принципів дискретно-імпульсного [9], пульсаційного [10], частотно-пульсаційного [11] та інтенсифікації процесу гомогенізації за рахунок створення активного турбулентного режиму [12]. Більшість з цих принципів при реалізації в конструкції струминних гомогенізаторів молока можуть забезпечити достатньо високу різницю швидкостей фаз продукту [7]. За рахунок різниці швидкостей фаз відбувається досягнення критичних значень чисел Вебера, що обумовлює руйнування краплі під дією тангенційних напружень та динамічних напорів, що діють на неї з боку середовища [13, 14].

В ході аналізу світових періодичних видань були виявлені наступні напрямки зниження енергоємності струминних гомогенізаторів молока за умови забезпечення розмірів жирових кульок на рівні менше 1 мкм:

- інтенсифікація процесу подрібнення за рахунок зміни параметрів потоку;
- підбір оптимальної форми робочої камери;
- дослідження і вдосконалення конструкції Т-подібного міні міксеру;
- створення різниці швидкостей фаз між дисперсним і дисперсійним середовищем.

Використання Т-подібного мініміксеру забезпечує подачу знежиреного молока по двох каналах, що розташовані перпендикулярно до потоку вершків, що рухається з більшою швидкістю [15], на рівні, що наближується до клапанних зразків. Але в той же час конструкція міксеру характеризується високими енергетичними витратами, які необхідні для впорскування знежиреного молока.

Дослідження процесу зменшення розміру жирових кульок, що відбувається за рахунок зміни робочого перетину камери [16, 17] мініміксеру не забезпечує достатнього ступеню подрібнення часток. Середній розмір часток складає понад 1 мкм, що свідчить про те, що зміна форми робочого простору без інтенсифікації процесу не є ефективним шляхом зниження розміру жирових кульок.

Дослідження, стосовно зміни гідродинамічного режиму роботи міксеру також не виявили суттєвого резерву для зниження енергетичних витрат процесу [18]. Використання мікроканалу у міксеру доцільно за думкою авторів тільки при забезпеченні впливу на центральну частину струменю, що забезпечують пульсації [19].

Протитечійно-струминний гомогенізатор молока забезпечує подрібнення до середнього розміру часток близько 1 мкм при зниженні енергетичних витрат у 3 рази порівняно з клапанним гомогенізатором [6]. Поряд з цим, він характеризується таким суттєвим недоліком, як істотне піноутворення, що відбувається внаслідок дестабілізації білкової фази, яка відбувається при зіткненні потоків.

На рівні патентів відомі конструкції, що використовують принципи ежекування вершків до потоку знежиреного молока через форсунки у певному відношенні [7]. Однак вони здатні забезпечити зменшення розмірів жирових кульок лише до 1,1 мкм, що більше ніж вимагають технологічні вимоги 0,8–0,9 мкм.

Таким чином, найбільш ефективним шляхом зниження енергетичних витрат при одночасному забезпеченні подрібнення до рівня клапанних конструкцій забезпечує струминний гомогенізатор молока з роздільним подаванням жирової фази. В ньому поєднуються принципи забезпечення максимальної різниці швидкостей дисперсійної та дисперсної фаз при одночасній інтенсифікації руху рідини в камері.

## 5. Методи дослідження

Для проведення експерименту були визначені такі межі варіювання факторів [20]:

- відстань між напрямлюючими у місці найбільшого звуження (нижня межа 1 мм, верхня – 3 мм, крок зміни фактору – 1 мм);
- швидкість подачі знежиреного молока (нижня межа 37 м/с, верхня – 87 м/с, крок зміни фактору – 25 м/с);
- діаметр каналу подавання вершків (нижня межа 0,6 мм, верхня – 0,8 мм, крок зміни фактора – 0,1 мм).

До вхідних параметрів процесу належать діаметр каналу подавання вершків, швидкість подачі знежиреного молока та відстань між напрямлюючими в місці найбільшого звуження.

Вихідними параметрами процесу струминної гомогенізації молока з роздільним подаванням вершків є середній розмір жирових кульок та рівномірність їх розподілу в емульсії.

Кожен дослід виконувався в трьох повторностях. При здійсненні дослідження струминної гомогенізації молока з роздільним подаванням жирової фази відбувалась фіксація декількох показників. Так, температура вершків та знежиреного молока складала 60 °С. Вершки жирністю 40 % подавались до потоку знежиреного молока зі швидкістю, потрібною для забезпечення вихідної жирності на рівні 3,5 %. Кількість вершків та швидкість їх подачі були розраховані з рівняння матеріального балансу для струминного гомогенізатора молока з роздільним подаванням жирової фази.

Після виконання кожного досліду робився відбір ретельно перемішанного зразку продукту. Частина зразку підлягала розведенню водою у співвідношенні 1:10, з якою відбиралась крапля проби для вивчення під мікроскопом. Після відстоювання

протягом 15 хв проби, накритої покривним склом, відбувалось дослідження зразку на оптичному мікроскопі МИКРОМЕД Р-1-LED (Росія) з роздільною здатністю 1500 крат та приєднаною цифровою камерою, що зображена на рис. 3.



**Рис. 3.** Зовнішній вигляд мікроскопу з цифровою камерою:

1 – об'єктив; 2 – предметний стіл з пробєю гомогенізованого зразку; 3 – підсвічувальна лампа; 4 – цифрова камера; 5 – гвинт грубого регулювання

Для проведення дослідження використовувалось збільшення до 600 разів, виходячи з умов забезпечення чіткої картини та враховуючи обмеження цифрової камери. При переміщенні зразку в повздовжньому та поперечному напрямках відбувалось фотографування характерних полів зору. Після цього робився підрахунок дисперсних характеристик жирових кульок. Масштаб визначався за попередньо зробленою фотографією об'єктмікрометра з ціною поділки 0,01 мм.

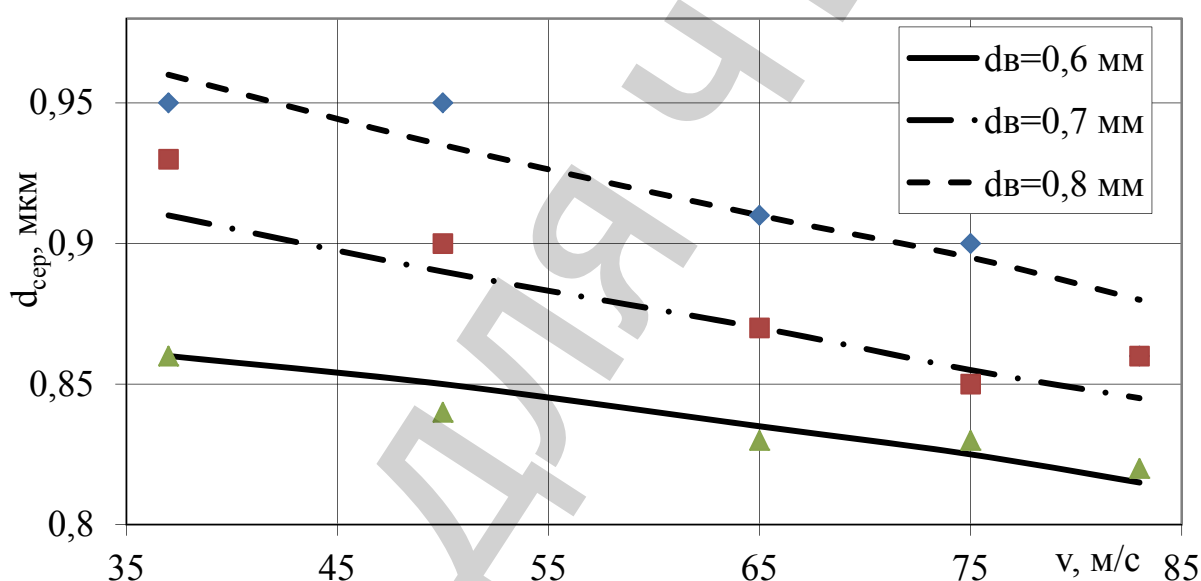
## **6. Результати дослідження**

З метою вибору оптимальних значень швидкості подавання знежиреного молока та діаметру каналу подавання вершків з отриманих результатів експериментів, наведених в табл. 1, будуємо графік, показаний на рис. 4. З діапазону коливання дослідних значень обираємо масштаб для кожної з вісей координат. Після цього на отриману сітку наносимо відповідні значення параметрів, та робимо апроксимацію до найбільш близької відомої функціональної залежності параметрів, якою є лінія.

Таблиця 1

Експериментальні дані залежності між швидкістю подавання знежиреного молока  $v$ , діаметром каналу подавання вершків  $d_v$  та середнім розміром жирових кульок після диспергування  $d_{сер}$

$v$	$d_v$	$d_{сер}$		
		0,8	0,7	0,6
37		0,96	0,91	0,86
50		0,935	0,89	0,85
65		0,91	0,87	0,835
75		0,895	0,855	0,825
83		0,88	0,845	0,815



**Рис. 4.** Графік залежності швидкості подавання знежиреного молока  $v$  і діаметру каналу подачі жирової фази  $d_v$  на середній діаметр жирових кульок  $d_{сер}$  при відстані між направляючими  $a=2$  мм

Аналіз отриманих даних (рис. 4) свідчить про наявність прямо пропорційної залежності між швидкістю подавання знежиреного молока та середнім розміром жирових кульок. Із зростанням швидкості відбувається зростання значення критерію Вебера, що спричинює подрібнення жирової фази до більш дрібних розмірів. З точки зору економії витрат енергії оптимальним значенням швидкості є 60 м/с. При підвищенні тиску вище цього значення якість подрібнення продовжує збільшуватись, але енергетичні витрати процесу, як свідчать теоретичні дослідження, зростають майже на третину.

Рациональним розміром каналу подавання вершків з точки зору технологічно виконуваних умов для лабораторного зразку є 0,6 мм, за якого досягається подрібнення на рівні 0,83–0,86 мкм. Це пояснюється тим, що потік знежиреного молока діє на струмінь меншого діаметру більш рівномірно, при цьому впливу зазнають центральна і периферійна частини струменю.

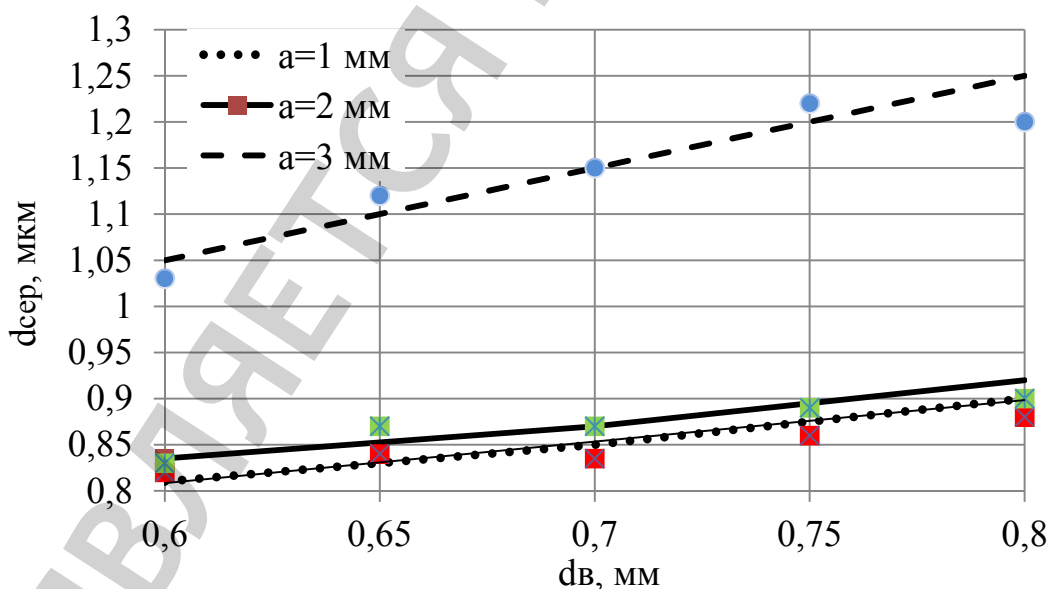
З метою вибору оптимальних значень центрального каналу в місці найбільшого звуження, дослідимо залежність між ним, діаметром каналу подавання вершків та середнім діаметром кульок після гомогенізації, експериментальні дані яких наведено в табл. 2.

**Таблиця 2**

Експериментальні дані діаметру каналу подавання вершків  $d_v$ , відстані між напрямлюючими  $a$  та середнім розміром жирових кульок після диспергування  $d_{сер}$

$d_v$	$a$	$d_{сер}$		
		1	2	3
0,6		0,81	0,835	1,05
0,65		0,83	0,85	1,1
0,7		0,85	0,87	1,15
0,75		0,87	0,9	1,2
0,8		0,9	0,92	1,25

Отримані дані (рис. 5) свідчать про те, що подрібнення на рівні клапанних гомогенізаторів, в діапазоні значень 0,8–0,9 мкм забезпечує відстань у місці найбільшого звуження 1 та 2 мм. Оптимальним значенням параметру при цьому слід вважати 2 мм, оскільки незначне зменшення розмірів жирових кульок при відстані 1 мм підвищує енергетичні витрати на 1 кВт. Дослідження підтвердили дані, отримані при моделюванні процесу в програмному комплексі ANSYS (США) [20].



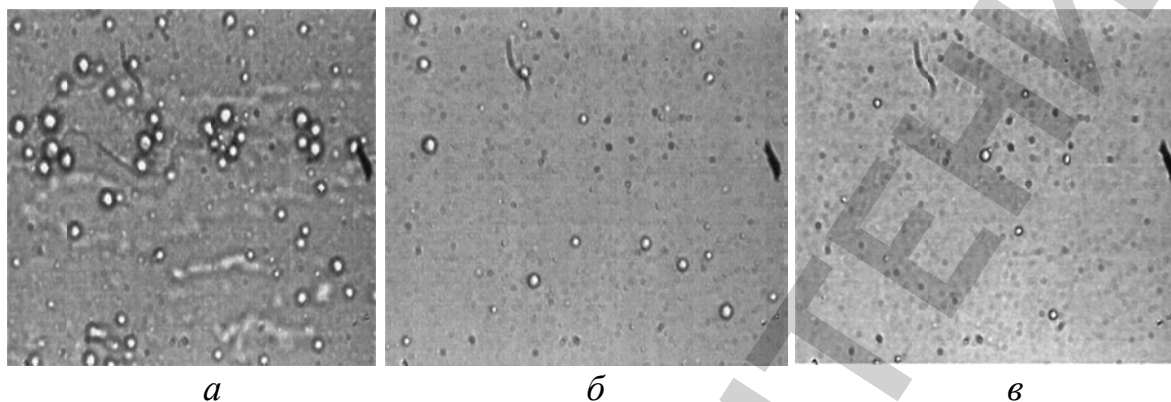
**Рис. 5.** Графік залежності середнього діаметру жирових кульок  $d_{сер}$  від діаметру каналу подавання вершків  $d_v$  та відстані між напрямлюючими при швидкості знежиреного молока 60 м/с

Отримані результати свідчать, що при відстані центрального каналу, що дорівнює 3 мм буде відбуватись розсіювання зони локалізації максимальних



швидкостей. Дане явище буде погіршувати умови подрібнення та вести до збільшення розміру жирових кульок.

Зовнішній вигляд мікрофотографій на основі яких робився підрахунок середнього розміру жирових кульок наведений на рис. 6.



**Рис. 6.** Мікрофотографії: *a* – негомогенізованого зразку; *б* – зразку гомогенізованого молока при швидкості 83 м/с, відстані центрального каналу в місці найбільшого звуження 1 мм та діаметру каналу подавання вершків 0,8 мм; *в* – зразку гомогенізованого молока при швидкості 60 м/с, відстані центрального каналу в місці найбільшого звуження 2 мм та діаметру каналу подавання вершків 0,6 мм

Мікрофотографії зразків гомогенізованого молока (рис. 6) наочно демонструють перевагу обґрунтованих оптимальних режимів.

## 7. SWOT-аналіз результатів досліджень

*Strengths.* До сильних сторін дослідження слід віднести виявлення характеру зв'язку між діаметром каналу подавання вершків, швидкістю знежиреного молока та середнім розміром жирових кульок. Дослідження проводилось за умов оптимальних температурних режимів, обґрунтованих роботами інших авторів. Подавання вершків з постійною швидкістю забезпечує рівномірний вплив потоку знежиреного молока на струмінь вершків. Подавання вершків у кількості, визначеній з рівняння матеріального балансу, забезпечує нормалізацію емульсії до жирності питного молока (3,5 %).

Використання методу прямого вимірювання жирових кульок під мікроскопом з цифровою камерою з визначенням масштабу з точним масштабуванням за допомогою об'єктивної мікрометри дає змогу з високою точністю визначити дисперсні характеристики молочної емульсії. Проведення відстоювання зразку після розведення на предметному склі сприяє спливанню дрібних жирових кульок і потрапляння їх у чітке поле зору мікроскопу для підвищення точності визначення середнього діаметру жирових кульок. Застосований метод мікрофотографій дозволив не тільки визначити середній діаметр жирових кульок після гомогенізації, але й дослідити рівномірність розподілу жирових часток в об'ємі плазми молока.

В порівнянні з аналогами, наприклад протитечійно-струминним гомогенізатором молока, лабораторний зразок відрізняється відсутністю дестабілізації білкової фази емульсії. В порівнянні з цим гомогенізатором у лабораторному зразку

з роздільною подачею вершків досягається зниження енергетичних витрат майже на третину. Це пояснюється використанням принципу роздільного подавання жирової фази з можливістю одночасного проведення нормалізації продукту.

*Weaknesses.* До недоліків дослідження відноситься відсутність врахування впливу на середній розмір жирових кульок після гомогенізації подачі вершків та впливу жирності дисперсної фази. Можливість фіксації жирових кульок найменшого розміру була обмежена низькою роздільною здатністю мікроскопу та цифрової камери. Відсутність дослідження подачі вершків та жирності дисперсної фази на середній розмір жирових кульок після гомогенізації не дає змогу визначити емпіричний коефіцієнт. Даний показник враховує форму та розміри каналу подавання жирової фази та умови за яких здійснюється нормалізація продукту.

Низька тривалість проведення досліду, що складала 10 с, може мати вплив на результати дослідження на початковому та кінцевому етапі кожного з дослідів.

До негативних сторн дослідження слід віднести його високу трудомісткість на етапі дослідження зразку та підрахунку кількості жирових кульок. До недоліків установки відноситься необхідність проведення попереднього сепарування вершків, однак ця операція і без цього застосовується у більшості технологічних процесів галузі.

*Opportunities.* До додаткових можливостей, що сприятимуть реалізації цілей дослідження, слід віднести наступні фактори. Гомогенізатори клапанного типу застосовуються в більшості нормативних процесів на молокопереробних підприємствах великих потужностей. Однак високі енергетичні витрати та низькі норми економії при досягненні меж досконалості спонукають виробників здійснювати пошук нових перспективних напрямків енергозбереження. Серед найбільш перспективних конструкцій, з точки зору зниження енергетичних витрат та за умови забезпечення якості, що наближується до клапанних зразків, виділяють гомогенізатори струминного типу. Значна їх частина базується на принципі створенні різниці між дисперсійною та дисперсною фазами продукту. Технічна реалізація цього принципу забезпечує зменшення середнього розміру жирових кульок з 3–4 у необробленому продукті до 0,85–1,1 мкм в молоці після гомогенізації.

Додаткові можливості від впровадження струминного гомогенізатору з роздільною подачею вершків забезпечуватиме економію за рахунок одночасного виконання гомогенізації та нормалізації. Крім цього, зниження енергетичних витрат для нього відносно клапанних зразків становить від 4 до 5 разів, а відносно протитечійно-струминного гомогенізатору біля 30 %.

*Threats.* До складнощів, що пов'язані з впровадженням результатів досліджень струминного гомогенізатору молока, відносять недостатню вивченість процесів, що відбуваються в струминному гомогенізаторі з роздільним подаванням вершків. Головною перешкодою на шляху впровадження цього типу струминного гомогенізатору є високі фінансові витрати модернізації обладнання для гомогенізації на підприємствах молокопереробної галузі, що мають велику потужність. А коли модернізація проводиться, головним її напрямом є не заміна морально та фізично застарілих конструкцій клапанних гомогенізаторів, а заміна їх окремих вузлів. Оскільки можливості модернізації гомогенізаторів клапанного типу дійшла меж технічних можливостей конструкції, можна відзначити, що суттєвого ефекту з точки зору економії енергетичних витрат не відбувається.

З іншого боку, малі підприємства, що за рахунок гнучкості є більш схильними до впровадження нових зразків техніки, віддають перевагу менш коштовним конструкціям міксерів та диспергаторів. До проблем цих конструкцій відносять недостатній ступінь подрібнення жирових кульок, який для більшості конструкцій після проведення гомогенізації не перевищує 1,3–1,6 мкм. Отже, можливість впровадження струминного гомогенізатору молока з роздільною подачею вершків на цих підприємствах існує за умови зниження вартості обладнання.

Таким чином, SWOT-аналіз результатів досліджень дозволяє визначити такі напрямки досягнення цілей дослідження:

- зниження вартості конструкції, що зробить її привабливою для виробників підприємств малої та середньої потужності;
- проведення дослідження залежності між подачею вершків, їх жирністю та середніми розмірами жирових кульок після гомогенізації для більш досконалої та універсальної конструкції струминного гомогенізатора;
- використання для досліджень цифрової камери з більшою роздільною здатністю, що дозволить отримувати більш точні результати стосовно найбільш дрібних часток жиру розподілених в об'ємі плазми молока.

## **8. Висновки**

1. Розроблена методика проведення дослідження. В якості впливових факторів визначені розмір центрального каналу в місці найбільшого звуження, швидкість подачі знежиреного молока та діаметр каналу подачі вершків. Відстань між направляючими в місці найбільшого звуження має суттєвий вплив на середній розмір жирових кульок при розмірах, що перевищують 2 мм. Зменшення відстані до 1 мм незначно покращує якість гомогенізації, але характеризується збільшенням витрат енергії близько 1 кВт/т.

2. Визначено характер зв'язку між швидкістю подавання знежиреного молока, розміром каналу в місці найбільшого звуження та каналу подавання вершків на якість диспергування. Встановлено, що основним фактором, що визначає процес диспергування жирової фази молока, є швидкість потоку. Залежність між середніми розмірами жирових кульок та швидкістю подавання знежиреного молока має прямо пропорційний характер. Однак використання режиму роботи зі швидкістю, що перевищує 60 м/с, суттєво підвищує енергетичні витрати процесу, але при цьому забезпечує подальше зменшення розміру жирових кульок.

3. Встановлено, що оптимальними розмірами центрального каналу подавання жирової фази є 0,6 мм. При цьому забезпечується подрібнення до середнього розміру жирових кульок на рівні 0,83–0,86 мкм. Менше значення показнику сприятиме процесу швидкої облітерації каналів подавання вершків, але прогнозовано матиме ще більший ступінь подрібнення часток жиру. У зв'язку з цим, в умовах виробництва за наявності технологічної можливості втілення, доцільно використання декількох каналів подавання жирової фази з розмірами 0,2–0,3 мм.

Оптимальним значенням відстані центрального каналу в місці найбільшого звуження є 2 мм. Враховуючи це, при необхідності підвищення продуктивності установки можливо змінювати розміри установки, але при цьому має зберігатись співвідношення параметрів, а рекомендована відстань має масштабуватись.

## Література

1. Фиалкова, Е. А. Гомогенизация. Новый взгляд [Текст]: монография / Е. А. Фиалкова. – Санкт-Петербург: ГИОРД, 2006. – 392 с.
2. Walstra, P. Homogenization [Text] / P. Walstra, J. T. M. Wouters, T. J. Geurts // Food Science and Technology. – CRC Press, 2005. – P. 279–298. doi:[10.1201/9781420028010.ch9](https://doi.org/10.1201/9781420028010.ch9)
3. Pickering, C. J. D. Laser speckle photography and particle image velocimetry: photographic film noise [Text] / C. J. D. Pickering, N. A. Halliwell // Applied Optics. – 1984. – Vol. 23, № 17. – P. 2961–2969. doi:[10.1364/ao.23.002961](https://doi.org/10.1364/ao.23.002961)
4. Feigl, K. Simulation and experiments of droplet deformation and orientation in simple shear flow with surfactants [Text] / K. Feigl, D. Megias-Alguacil, P. Fischer, E. J. Windhab // Chemical Engineering Science. – 2007. – Vol. 62, № 12. – P. 3242–3258. doi:[10.1016/j.ces.2007.02.008](https://doi.org/10.1016/j.ces.2007.02.008)
5. Innings, F. Visualization of the Drop Deformation and Break-Up Process in a High Pressure Homogenizer [Text] / F. Innings, C. Tragardh // Chemical Engineering & Technology. – 2005. – Vol. 28, № 8. – P. 882–891. doi:[10.1002/ceat.200500080](https://doi.org/10.1002/ceat.200500080)
6. Самойчук, К. О. Обґрунтування параметрів та режимів роботи протичейно-струменевого диспергатора молока [Текст]: автореф. дис. ... канд. техн. наук: 05.18.12 / К. О. Самойчук. – Донецьк, 2008. – 20 с.
7. Дейниченко, Г. В. Конструкції струминних диспергаторів жирової фази молока [Текст] / Г. В. Дейниченко, К. О. Самойчук, О. О. Ковальов // Праці Таврійського державного агротехнологічного університету. – 2016. – Вип. 16, Т. 1. – С. 219–228.
8. Самойчук, К. О. Якість та енергетична ефективність процесу струминної гомогенізації молока з роздільною подачею вершків [Текст] / К. О. Самойчук, О. О. Ковальов, В. О. Султанова // Праці Таврійського державного агротехнологічного університету. – 2015. – Вип. 15, Т. 1. – С. 241–249.
9. Stankiewicz, A. I. Process Intensification: Transforming Chemical Engineering [Text] / A. I. Stankiewicz, J. A. Moulijn // Chemical Engineering Progress. – January 2000. – P. 20–34.
10. Glasgow, I. Enhancement of microfluidic mixing using time pulsing [Text] / I. Glasgow, N. Aubry // Lab Chip. – 2003. – Vol. 3, № 2. – P. 114–120. doi:[10.1039/b302569a](https://doi.org/10.1039/b302569a)
11. Kessler, H. G. Food and Bio Process Engineering – Dairy Technology [Text] / H. G. Kessler. – Ed. 5. – Germany, Munchen: Verlag A. Kessler (Publishing House A. Kessler), 2002. – 694 p.
12. Vankova, N. Emulsification in turbulent flow [Text] / N. Vankova, S. Tcholakova, N. D. Denkov, I. B. Ivanov, V. D. Vulchev, T. Danner // Journal of Colloid and Interface Science. – 2007. – Vol. 312, № 2. – P. 363–380. doi:[10.1016/j.jcis.2007.03.059](https://doi.org/10.1016/j.jcis.2007.03.059)
13. Chapter 6.3. Homogenizers [Text] / Teknotext AB // Dairy Processing Handbook. – Lund, Sweden: Tetra Pak Processing Systems AB, 1995. – P. 115–122.

14. Liao, Y. A literature review of theoretical models for drop and bubble breakup in turbulent dispersions [Text] / Y. Liao, D. Lucas // *Chemical Engineering Science*. – 2009. – Vol. 64, № 15. – P. 3389–3406. doi:[10.1016/j.ces.2009.04.026](https://doi.org/10.1016/j.ces.2009.04.026)
15. Bothe, D. Fluid mixing in a T-shaped micro-mixer [Text] / D. Bothe, C. Stemich, H.-J. Warnecke // *Chemical Engineering Science*. – 2006. – Vol. 61, № 9. – P. 2950–2958. doi:[10.1016/j.ces.2005.10.060](https://doi.org/10.1016/j.ces.2005.10.060)
16. Chung, C. K. Effect of geometry on fluid mixing of the rhombic micro-mixers [Text] / C. K. Chung, T. R. Shih // *Microfluidics and Nanofluidics*. – 2007. – Vol. 4, № 5. – P. 419–425. doi:[10.1007/s10404-007-0197-9](https://doi.org/10.1007/s10404-007-0197-9)
17. Cortes-Quiroz, C. A. Effect of channel aspect ratio of 3-D T-mixer on flow patterns and convective mixing for a wide range of Reynolds number [Text] / C. A. Cortes-Quiroz, A. Azarbadegan, M. Zangeneh // *Sensors and Actuators B: Chemical*. – 2017. – Vol. 239. – P. 1153–1176. doi:[10.1016/j.snb.2016.08.116](https://doi.org/10.1016/j.snb.2016.08.116)
18. Fani, A. Investigation of the steady engulfment regime in a three-dimensional T-mixer [Text] / A. Fani, S. Camarri, M. V. Salvetti // *Physics of Fluids*. – 2013. – Vol. 25, № 6. – P. 64102. doi:[10.1063/1.4809591](https://doi.org/10.1063/1.4809591)
19. Goulet, A. Effects of microchannel geometry on pulsed flow mixing [Text] / A. Goulet, I. Glasgow, N. Aubry // *Mechanics Research Communications*. – 2006. – Vol. 33, № 5. – P. 739–746. doi:[10.1016/j.mechrescom.2006.01.007](https://doi.org/10.1016/j.mechrescom.2006.01.007)
20. Самойчук, К. О. Моделирование процесса струйной гомогенизации молока с отдельной подачей сливок [Текст] / К. О. Самойчук, А. А. Ковалев, А. А. Бездичный // *Вестник МГУП*. – 2015. – Вып. 2 (19). – С. 69–76.