

## Визначення якості диспергування молочного жиру в струминно-щілинному гомогенізаторі молока

К. О. Самойчук, О. О. Ковальов, В. О. Олексієнко, Н. О. Паляничка,  
Д. В. Дмитревський, В. М. Червоний, Д. В. Горєлков, І. В. Золотухіна,  
А. В. Слащева

*Однією з актуальних задач молокопереробної промисловості є зниження енергетичних витрат процесу диспергування молочного жиру при забезпеченні високого ступеня гомогенізації. Вирішити цю задачу можливо за рахунок розробки та впровадження практично не дослідженого струминно-щілинного гомогенізатора молока. Принцип його дії полягає у попередньому відділенні вершків з незбираного молока і подачі їх у швидкісний потік знежиреного молока. При цьому гомогенізація відбувається за рахунок створення достатньої різниці швидкості дисперсної та дисперсійної фаз молочної емульсії, що математично описується критерієм Вебера.*

*Проведені експериментальні дослідження впливу жирності вершків, швидкості їх подачі та ширини кільцевої щілини на показники дисперсності при гомогенізації в розробленому гомогенізаторі. Знайдено математичну залежність, яка пов'язує ці параметри. Доведено, що для отримання молочної емульсії з дисперсністю 0,8 мкм ширина кільцевої щілини має складати 0,1–0,5 мм, жирність вершків 40–50 %, а швидкість їх подачі – менше 40 м/с. Результати оцінки показників якості диспергування свідчать про зменшення середнього діаметра жирових кульок на 7 % у порівнянні з найбільш поширеним у промисловості показниками клапанного гомогенізатора. Було визначено уточнене критичне значення критерію Вебера для диспергування жирової фази молока – 29, що свідчить про збільшення інтенсивності процесу гомогенізації в порівнянні з струминним гомогенізатором молока з роздільною подачею вершків. Знайдене критичне значення критерію необхідне для створення теорії процесу диспергування молочного жиру та розробки більш ефективних конструкцій гомогенізаторів молока*

*Ключові слова: гомогенізація, струминно-щілинний гомогенізатор, дисперсність, диспергування емульсії, критерій Вебера, жирова кулька*

### 1. Вступ

Гомогенізація молока призводить до покращення смакових якостей молочних продуктів і збільшення терміну їх придатності, тому належить до нормативних операцій молокопереробної галузі й проводиться при виробництві більшості молочних продуктів [1, 2]. Метою проведення гомогенізації є (диспергування) зменшення середнього діаметра жирових кульок (СЖК) молока з 3–4 мкм в необробленому молоці до 0,75–0,85 мкм в готовому продукті. Такі значення відповідають показникам дисперсності найбільш поширених у промисловості

клапанних гомогенізаторів [1]. Крім того в процесі гомогенізації забезпечується рівномірний розподіл вершків (дисперсна фаза) в знежиреному молоці (дисперсійне середовище). Однак для клапанних гомогенізаторів, при забезпеченні високого ступеня диспергування, енергетичні витрати процесу складають 6–8 кВт·год/т гомогенізованого молока [1, 3]. Тому підвищення енергоефективності процесу гомогенізації є актуальною задачею науковців і фахівців харчової галузі промисловості.

Дослідження та розробка енергоефективних конструкцій гомогенізаторів молока характеризується складністю спостереження за процесами руйнування жирових кульок. Це пояснюється мікроскопічним їх розміром, що складає менше 1 мкм, високими значеннями швидкостей руху молока (до 100 м/с в клапанних гомогенізаторах) та низькою прозорістю молочної емульсії. Завдяки цьому дослідниками процесу гомогенізації було висунуто понад 7 гіпотез диспергування молочного жиру (кавітаційна, градієнтна, турбулентна, субкавітаційна і ін.), які суперечать одна одній [1–4]. Створені на базі таких гіпотез гомогенізатори або не забезпечують при диспергуванні СЖК на рівні клапанних (відцентрові, електрогідравлічні, вібраційні) [3], або мають високі енерговитрати (клапанні, мікрофлюїдизатори) [1, 4]. Згідно останніх досліджень, основний гідродинамічний критерій руйнування жирових кульок молока визначається числом Вебера, яке підвищується при збільшенні швидкості руху жирової кульки відносно плазми молока (швидкості ковзання жирової кульки) [2, 3, 5]. Тому найбільш ефективні конструкції гомогенізаторів проектуються таким чином, щоб отримати найбільшу різницю відносної швидкості руху жирової та знежиреної фаз молока. До таких гомогенізаторів відносяться струминні. Крім того струминні гомогенізатори характеризуються низькими енерговитратами (1,0–1,8 кВт·год/т) і високою надійністю роботи [6]. Отже проведення досліджень процесу диспергування молочного жиру з метою розробки конструкцій енергоефективних струминних гомогенізаторів є перспективним для сучасної харчової промисловості.

## **2. Аналіз літературних даних та постановка проблеми**

Про актуальність наряду розвитку струминного диспергування емульсій свідчить значна кількість принципово різних конструкцій струминних гомогенізаторів молока, розроблених останнім часом. До них відносять: протитечійно-струминні, ударно-струминні, кавітаційні гідродинамічні, струминні з роздільним подаванням жирової фази, міні-міксери і мікрофлюїдизатори [3–15]. Останні відносяться до найбільш прогресивного типу гомогенізаторів, що дозволяють отримати молочну емульсію з найдрібнішим дисперсним складом (СЖК 0,1 мкм і менше) [3]. Незважаючи на це, внаслідок високих питомих енерговитрат, які є більшими за клапанні гомогенізатори, і невисокої продуктивності промислових зразків, мікрофлюїдизатори не отримали широкого впровадження на молокозаводах [4].

В праці [7] приведені результати досліджень, які свідчать, що досягти зниження енергетичних витрат можливо за рахунок використання міні-міксерів Т-подібної або П-подібної форми. У них до потоку вершків, які рухаються по

центральному каналу зі швидкістю вище 100 м/с по каналах, розташованих перпендикулярно до напрямку руху дисперсійного середовища, подається знежирене молоко. Показано, що такі конструкції характеризуються помірними витратами енергії (1,5–1,7 кВт·год/т), а СЖК після гомогенізації в них складає 1,0–1,1 мкм [8]. Обмеженням при подальшому вдосконаленні пристроїв такого типу є необхідність у створенні високої швидкості потоку рідини. Оптимізація форми внутрішніх каналів міні-міксерів, результати якої приведені у роботах [7] практично не вирішують цієї проблеми. Крім того в мікроміксерах не досягається ефективна дія потоку вершків на струмінь знежиреного молока [8]. Вирішити цю проблему можливо шляхом використання протитечійно-струминного гомогенізатора, конструкція якого описана у роботі [9]. Такий гомогенізатор містить дві зустрічно розташовані форсунки, завдяки чому диспергування жирової фази відбувається при зіткненні струменів молока. Характерною рисою протитечійно-струминного гомогенізатора є створення високої швидкості обтікання жирових кульок дисперсійним середовищем і, як наслідок, високих значень гідродинамічного критерія Вебера. В праці [9] показано, що протитечійно-струминний гомогенізатор молока забезпечує СЖК на рівні 0,75–0,85 мкм, та має питомі енергетичні витрати на рівні 1,2–1,5 кВт·год/т. Але невирішеними залишились питання, пов'язані з піноутворенням, яке відбувається внаслідок дестабілізації білкових часток при контакті молочної емульсії з повітрям. Аналогічні проблеми має ударно-струминний гомогенізатор, в якому диспергування жирової фази відбувається при зіткненні струменя молока з твердими стінками різної форми. Такий тип гомогенізатора менш енергоефективний, ніж протитечійно-струминний, внаслідок чого його подальші дослідження припинені [10, 11].

Варіантом підвищення енергоефективності може бути розробка пристроїв, принцип дії яких заснований на кавітаційній гіпотезі диспергування жирової фази молочної емульсії. Саме такий підхід застосовано у роботах [12, 13], де надається опис диспергаторів, в яких кавітація створюється при коливаннях пластин або інших робочих органів за рахунок струменя (потoku) молока. Показано, що такі гомогенізатори мають просту та надійну конструкцію. Але останні дослідження впливу кавітації на процес руйнування жирових кульок молока доведено, що цей процес не є визначальним фактором гомогенізації [1, 14]. Ці результати поставили під сумнів розвиток конструкцій, в яких основною рушійною силою диспергування молочного жиру є кавітація.

Ефективним способом зниження енерговитрат на диспергування є роздільна гомогенізація жирової фази. В роботі [15], наводиться принцип дії струминного гомогенізатора молока з роздільною подачею вершків. В такому пристрої молоко перед обробкою сепарується і подається у гомогенізатор двома окремими потоками: вершки через тонкі канали вводяться у швидкісний потік знежиреного молока. Завдяки цьому забезпечується високі значення швидкості обтікання жирових кульок (критерій Вебера), що призводить до зменшення СЖК до 0,8–0,9 мкм і питомих енерговитрат – до 0,9 кВт·год/т [16]. Основним недоліком цього гомогенізатора є необхідність у використанні каналів з внутрішнім діаметром 0,6–0,9 мм, що призводить до їх облітерації, а отже і зниженню надійності його роботи.

До варіантів подолання проблеми низької енергоефективності диспергування слід віднести використання протитечійно-струминного та струминного гомогенізаторів з роздільною подачею жирової фази. Однак ці гомогенізатори мають ряд недоліків, до яких слід віднести:

- подачу дисперсної фази по вузьких каналах, що знижує надійність роботи гомогенізатора;
- контакт емульсії з повітрям, що призводить до погіршення якості гомогенізованої емульсії.

Ці недоліки усунуто в конструкції струминно-щілинного гомогенізатора молока з роздільною подачею вершків (СЦГРВ). Пристрій поєднує в собі переваги роздільної гомогенізації, створення максимального значення критерія Вебера та можливості проведення нормалізації молока за жирністю, одночасно з гомогенізацією [6]. Згідно результатів проведених аналітичних досліджень при використанні СЦГРВ можливо отримати жирові кульки середнім діаметром 0,8–0,9 мкм. При цьому питомі енергетичні витрати гомогенізатора не будуть перевищувати 0,7–0,8 кВт·год/т гомогенізованої емульсії [16]. В праці [17] було визначено вплив форми та діаметра конфузору в місці найбільшого звуження на СЖК молочної емульсії після гомогенізації. Але аналітичне дослідження впливу таких факторів, як жирність вершків, швидкість їх подачі, ширина кільцевої щілини на якість диспергування викликає труднощі внаслідок складної взаємодії між собою багатофазних струменів емульсій в струминному гомогенізаторі. Такі задачі зазвичай вирішують методами комп'ютерного моделювання. Але, внаслідок відсутності єдиної теорії гомогенізації, комп'ютерні моделі, що описують диспергування емульсій, дотепер не розроблені. Цей факт дозволяє стверджувати, що доцільним є проведення досліджень, присвячених визначенню впливу технологічних, гідравлічних і конструктивних параметрів на якість диспергування в СЦГРВ.

При дослідженні диспергування жирових крапель (кульок) в дисперсійному середовищі важливо враховувати стійкість краплі до дії сил, які прагнуть її зруйнувати. Їх співвідношення визначається критерієм Вебера  $We$  [2, 18]. При перевищенні  $We$  деякого критичного значення  $We_k$ , яке залежить від властивостей дисперсного і дисперсійного середовища, відбувається руйнування жирової краплі. Існуючі дані відносно критичного значення критерію Вебера для різних літературних джерел наводяться в діапазоні від 8 до 28. Це пов'язано зі складністю обчислення або експериментального встановлення відносної швидкості руху дисперсійної та дисперсної фаз [3, 5]. Враховуючи таких широкий діапазон коливання значень  $We_k$ , уточнення цієї величини для руйнування жирових кульок молока є важливою задачею при проведенні досліджень механізмів диспергування дисперсної фази молочної емульсії.

### **3. Мета та задачі дослідження**

Метою досліджень є визначення впливу диспергування жирової фази у СЦГРВ на якісні характеристики молока та критерій Вебера. Це дасть можливість обґрунтувати раціональні показники СЦГРВ та розробити промисловий зразок гомогенізатора для впровадження його на виробництві для зниження енерговитрат на гомогенізацію молока.

Для досягнення мети були поставлені такі завдання:

- визначити вплив жирності, ширини кільцевої щілини в місці найбільшого звуження, швидкості подачі вершків на СЖК після диспергування в СЦГРВ;
- оцінити дисперсні характеристики молочної емульсії, отриманої після обробки в СЦГРВ;
- визначити критичне значення критерію Вебера при гомогенізації молока в СЦГРВ.

#### 4. Методика проведення досліджень гомогенізації молока в струминно-щілинному гомогенізаторі

##### 4.1. Схема та принцип дії гомогенізатора

Камера струминно-щілинного гомогенізатора молока (рис. 1) складається з конфузору 2, та дифузору 5, патрубків подачі та відводу готового продукту 1 і 6, ємності з вершками 4 та кільцевої щілини 3 [6]. Попередньо знежирене молоко зі швидкістю  $v_{зн}$  подається крізь патрубок 1. У місці найбільшого звуження конфузору 2 діаметром  $d_k$  з ємності з вершками 4 крізь вузьку кільцеву щілину 3 шириною  $h$  зі швидкістю  $v_v$  подаються вершки. При входженні кільцевого струменя вершків і потік знежиреного молока створюється висока швидкість обтікання жирових кульок і, як наслідок, критерія Вебера. Внаслідок цього при переході до розширення дифузору 5 відбувається руйнування жирових кульок. Гомогенізоване молоко відводиться крізь патрубок 6.

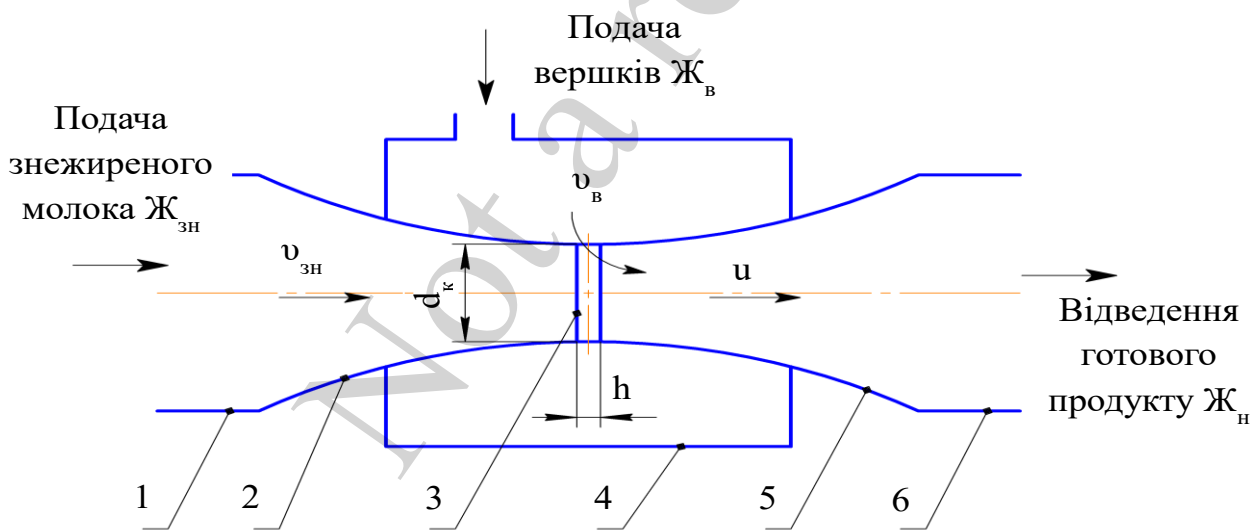


Рис. 1. Схема струминно-щілинного гомогенізатора молока з роздільною подачею вершків: 1 – патрубок подачі знежиреного молока; 2 – конфузур; 3 – кільцева щілина; 4 – ємність з вершками; 5 – дифузур; 6 – патрубок відводу готового продукту;  $v_v$  – швидкість подачі вершків;  $v_{зн}$  – швидкість подачі знежиреного молока;  $d_k$  – діаметр конфузору в місці найбільшого звуження;  $h$  – ширина кільцевої щілини;  $u$  – швидкість ковзання жирових кульок відносно молочної плазми;  $Ж_{зн}$  – жирність знежиреного молока;  $Ж_v$  – жирність вершків;  $Ж_n$  – жирність готового продукту

Розроблений пристрій дозволяє одночасно з гомогенізацією проводити нормалізацію молока за жирністю. Тому швидкість подачі знежиреного молока, вершків і жирність вершків розраховуються зі співвідношення, знайденого в ході аналітичних досліджень для отримання молока необхідної жирності [17].

#### 4. 2. Методи експериментальних досліджень

Для проведення експериментальних досліджень на базі кафедри обладнання переробних і харчових виробництв імені професора Ф. Ю. Ялпачика Таврійського державного агротехнологічного університету імені Дмитра Моторного (Україна) було створено лабораторну установку СЦГРВ (рис. 2). Пристрій складається з ємності зі знежиреним молоком 8, з якої воно надходить по гнучкому шлангу 1 до шестеренного насосу 2 типу НШ. Він приводиться в дію від електричного трифазного двигуна 5, що запускається при включенні пакетного вимикача 4.

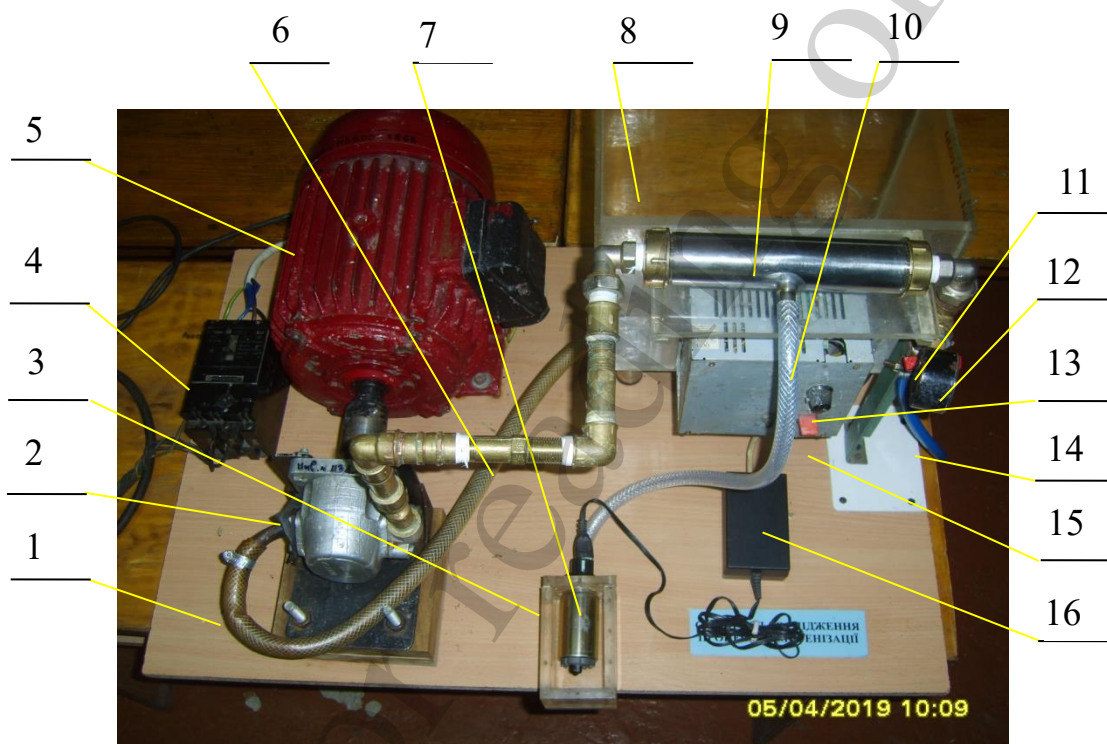


Рис. 2. Лабораторна установка струминно–щілинного гомогенізатора молока: 1 – гнучкий трубопровід для подачі знежиреного молока; 2 – насос шестеренний типу НШ; 3 – ємність з вершками; 4 – пакетний вимикач; 5 – електричний трифазний двигун; 6 – трубопровід; 7 – насос подачі дисперсної фази; 8 – ємність із знежиреним молоком; 9 – камера гомогенізації; 10 – гнучкий шланг з фіксатором для подачі вершків; 11 – дроселююча засувка; 12 – манометр; 13 – частотний перетворювач з регулятором; 14 – гнучкий шланг для відведення гомогенізованого молока; 15 – тумблер запуску насоса подачі вершків 16 – електричний привід насоса подачі вершків

Робочий тиск знежиреного молока регулюється шляхом перекриття дроселюючої засувки 11 та контролюється розташованим поруч з нею манометром 12. Після попереднього проведення сепарування, отримане знежирене молоко з насоса 2 крізь трубопроводи 6 подається до камери гомогенізації 9. В місці її найбільшого звуження до знежиреного молока з ємності з вершками 3 за допомогою насосу 7 через гнучкий шланг 10 подаються вершки. Насос подачі вершків приводиться в дію при вмиканні до електричної мережі джерела живлення 16 та запуску тумблера 15. При цьому необхідна кількість вершків забезпечується за допомогою частотного перетворювача з регулятором 13. Нормалізоване та гомогенізоване молоко відводиться крізь гнучкий шланг 14 у спеціальну ємність [16].

Для проведення експериментальних досліджень було використане молоко коров'яче (Milk and liquid milk products) ISO 9622: 2013 [19]. Відбір проб здійснювалось згідно (Milk and milk products. Guidance on sampling) ISO 707: 2013 [20].

Дисперсний склад жирових кульок після диспергування визначався за допомогою оптичного мікроскопу Микромед Р-1-LED (Росія) загальною кратністю збільшення 1500 крат. До нього приєднувалась цифрова камера Mustek Wcam 300 (Taiwan) з роздільною здатністю 640x480 [21]. Кожен з дослідів повторювався тричі.

Сталим фактором процесу диспергування в струминно-щілинному гомогенізаторі молока є температура знежиреного молока та вершків, встановлене оптимальне значення якої 60–65°C [2, 15, 22]. Змінними факторами були жирність вершків, швидкість вершків та ширина кільцевої щілини. Для проведення експерименту були визначені такі межі варіювання змінних факторів [16]:

- жирність вершків (10–50%);
- швидкість вершків (5–110 м/с);
- ширина кільцевої щілини (0,1–0,9 мм).

Якість процесу гомогенізації молока визначають параметрами СЖК та шириною розподілу дисперсного складу молочної емульсії. Візуально останній показник можна оцінити за гістограмою розподілу жирових кульок за розмірами, а кількісно – коефіцієнтом варіації.

#### 4. 3. Методика визначення критичного значення критерія Вебера

Основним критерієм руйнування жирової кульки є критерій Вебера. Його значення залежить головним чином від швидкості ковзання, яка являє собою різницю відносних швидкостей дисперсійної та дисперсної фаз молока (рис. 1) [2, 5, 11]. Середній діаметр жирових кульок після диспергування  $d_{cp}$  для струминно-щілинної гомогенізації в залежності від  $We_k$  можна визначити як [3]

$$d_{cp} = \frac{We_k \sigma_{ж-п}}{2\rho_{пл} u^2}, \quad (1)$$

де  $\sigma_{ж-п}$  – поверхневий натяг на межі розділу фаз молочний жир–плазма знежиреного молока, Н/м;  $\rho_{пл}$  – густина молочної плазми, кг/м<sup>3</sup>;  $u$  – швидкість ковзання жирової кульки, відносно молочної плазми, м/с.

Швидкість ковзання жирової кульки для струминно–щілинного гомогенізатора молока можна визначити як різницю між швидкостями руху потоку знежиреного молока  $v_{zn}$  та струменю вершків  $v_v$ . Для створення найкращих умов руйнування жирових кульок необхідно підвищувати швидкість знежиреного молока. Такі умови створюються в центральній частині осьової лінії внутрішніх поверхонь конфузору в місці розташування щілини. При перпендикулярній подачі потоку жирової фази (рис. 1) по відношенню до напрямку руху знежиреного молока швидкість ковзання жирової кульки, буде дорівнювати швидкості потоку знежиреного молока  $u=v_{zn}$ . Умовою адекватності наведеної рівності є подача вершків з мінімальною швидкістю  $v_v$  крізь кільцеву щілину шириною  $h$  [17]. Наведений вище вираз є дійсним лише за умови подавання через щілину поодинокі жирової кульки. У струминному гомогенізаторі щілинного типу крізь щілину подаються вершки (емульсія жирової фази в плазмі молока), тому значення швидкості  $u$  залежить від ширини щілини в місці подачі вершків, вмісту жиру в вершках і швидкості руху потоку вершків [18, 23]:

$$u = k_{щ} v_{zn}, \quad (2)$$

де  $k_{щ}$  – коефіцієнт щілинної гомогенізації з поперечним подаванням жирової фази, який враховує вплив жирності, швидкості та ширини кільцевої щілини для подачі вершків.

Коефіцієнт  $k_{щ}$  враховує [23]:

- жирність вершків, які подаються в гомогенізатор  $J_b$ ;
- ширину щілини в місці подачі вершків до потоку  $h$ ;
- швидкості вершків у місці включення кульки з щілини до потоку знежиреного молока  $v_v$ .

Рівняння (2) має коефіцієнт, який враховує вплив реального потоку вершків (певної жирності, швидкості подачі і ширини, що визначається шириною кільцевої щілини камери гомогенізатора) на швидкість обтікання жирових кульок. Якщо припустити умови при яких крізь кільцеву щілину подається лише поодинока жирова кулька, в такому випадку:

- $J_b=100\%$ ;
- $h=d_{cp}$ , тобто крізь кільцеву щілину проходить лише одна жирова кулька молока;
- $v_v=0$ , тобто швидкість обтікання жирової кульки дорівнює швидкості потоку плазми,

то  $k_{щ}$  у рівнянні (2) буде дорівнювати 1, а швидкість ковзання жирової кульки буде дорівнювати швидкості руху знежиреного молока.

Залежність  $k_{щ}=f(J_b, h, v_v)$  необхідно визначити експериментально.

Для визначення критичного значення критерію Вебера на підставі отриманих даних будувались графічні залежності СЖК від змінних факторів. Після цього за допомогою Microsoft Office Excel 2010 виконувалось прогнозування значень швидкості подачі вершків, ширини щілини та жирності вершків для умов, які імітують входження у потік знежиреного молока поодинокі жирової кульки.



Критичне значення критерія Вебера обчислювали за формулою, яку отримали з формули (1)

$$We_k \leq \frac{2\rho_{пл} (k_{щ} v_{зн})^2 d_{ср}}{\sigma_{ж-п}}, \quad (3)$$

У цій формулі використовували значення  $k_{щ}$ ,  $v_{зн}$  і  $d_{ср}$  отриманих у ході експериментальних досліджень.

## 5. Результати експериментальних досліджень гомогенізації молока в струминно-щілинному гомогенізаторі

### 5.1. Вплив швидкості, жирності вершків і ширини кільцевої щілини на дисперсність молочної емульсії

У відповідності з розробленою методикою були проведені експериментальні дослідження впливу швидкості й жирності вершків і ширини кільцевої щілини на СЖК молока після гомогенізації в СЦГРВ.

Зменшення СЖК до рівня клапанних гомогенізаторів можливо досягти шляхом підвищення жирності та швидкості подачі вершків (рис. 3). СЖК після диспергування на рівні клапанних гомогенізаторів досягається при швидкості подачі вершків  $v_B=5-40$  м/с та при швидкості, що перевищує 100 м/с. Це пояснюється тим, що в діапазоні значень швидкості подачі вершків  $v_B=40-100$  м/с забезпечується мінімальна різниця між швидкостями руху дисперсійної та дисперсної фаз емульсії. Високу дисперсність продукту дозволяє отримати використання режиму, який передбачає подачу вершків зі швидкістю  $v_B \geq 100$  м/с. Але при цьому енергетичні витрати на створення потоку високої швидкості будуть високими, а енергоефективність гомогенізації в СЦГРВ знизиться. Отже найбільш ефективним з точки зору якості гомогенізації та енерговитрат є подача вершків зі швидкістю менше 40 м/с.

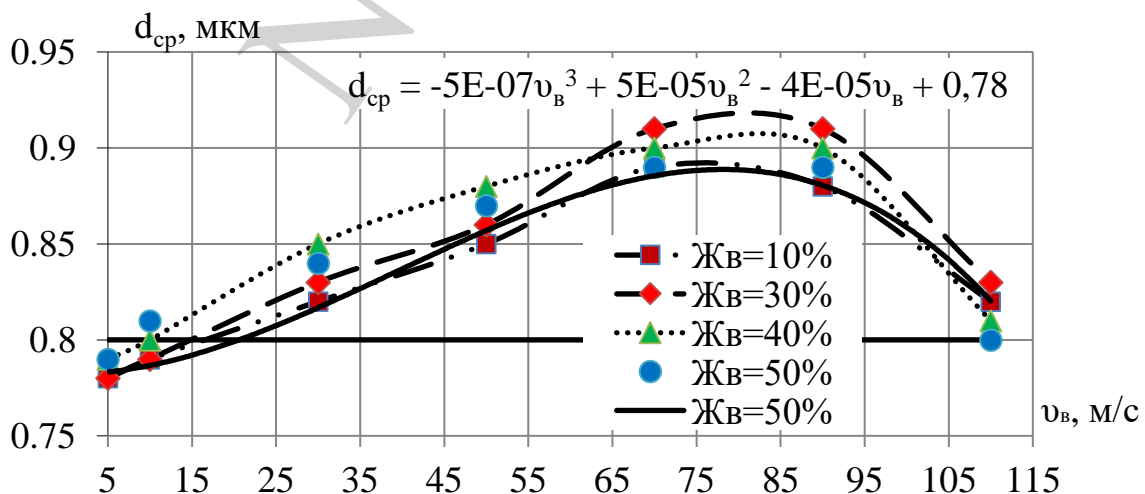


Рис. 3. Графік залежності середнього діаметра жирових кульок  $d_{ср}$  від швидкості вершків  $v_B$  і жирності вершків  $Ж_в$ , при  $h=0,5$  мм,  $Ж_н=3,5\%$ ,  $d_k=3$  мм,  $v_{зн}=60$  м/с

Зменшення СЖК можливо досягти шляхом зменшення ширини кільцевої щілини  $h$  (рис. 4). При використанні щілини шириною 0,1–0,5 мм можливо отримати продукт СЖК, якого складає 0,75–0,85 мкм, що знаходиться на рівні показників дисперсності клапанного гомогенізатора [1–3].

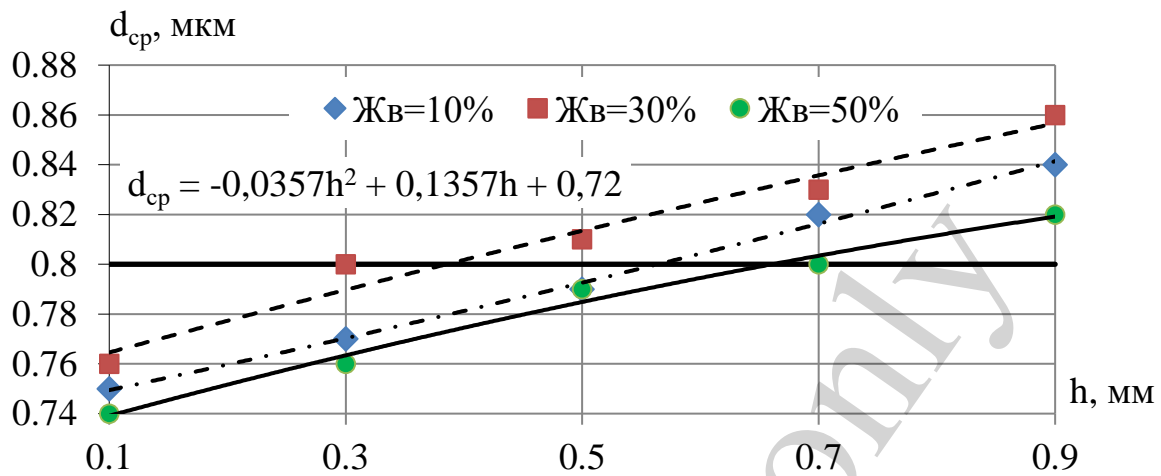


Рис. 4. Графік залежності середнього діаметра жирових кульок  $d_{ср}$  від ширини щілини камери гомогенізації в місці найбільшого звуження конфузору  $h$  і жирності вершків  $Ж_в$ , при  $Ж_н=3,5\%$ ,  $d_к=3$  мм,  $v_{зн}=60$  м/с

При підвищенні жирності вершків, які подаються до СЦГРВ, ступінь диспергування підвищується. Найменших значень СЖК можливо досягти при використанні вершків жирність яких складає 40–50 % (рис. 5).

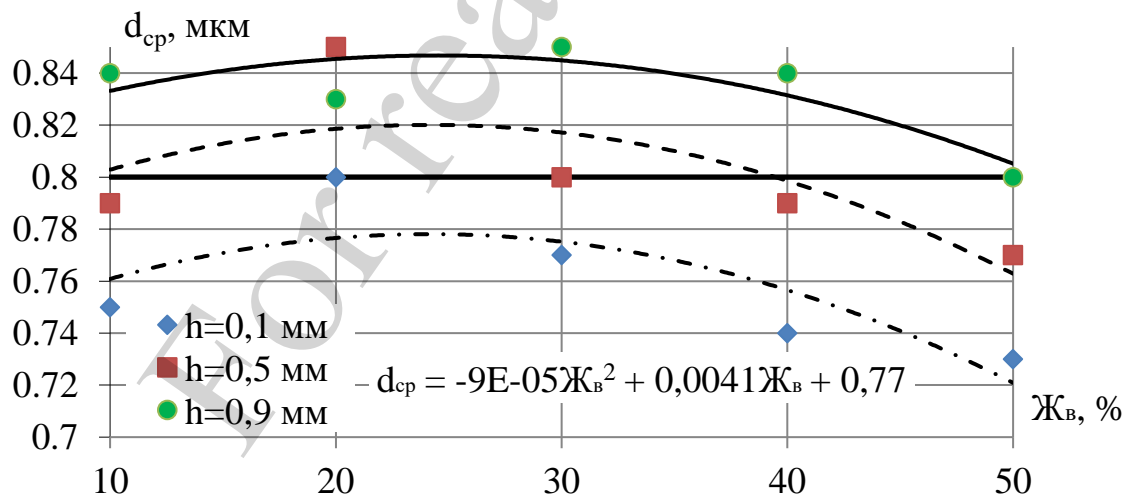


Рис. 5. Графік залежності середнього діаметра жирових кульок  $d_{ср}$  від жирності вершків  $Ж_в$ , та ширини щілини камери гомогенізації в місці найбільшого звуження  $h$  при  $Ж_{н,м}=3,5\%$ ,  $d_к=3$  мм,  $v_{зн}=60$  м/с

При зменшенні жирності вершків менше 10–20 % також відбувається незначне зниження СЖК. Але при використанні одночасної нормалізації молока

за жирністю, використовувати вершки такої жирності на практиці нераціонально. СЖК залежить від ширини кільцевої щілини та при збільшенні її з  $h=0,1$  мм до  $h=0,9$  мм при використанні вершків жирністю 30 % показники дисперсності погіршуються на 10 %.

Отже, для отримання гомогенізованого молока жирністю 2–4 %, показники СЖК якого знаходяться на рівні клапанних гомогенізаторів, швидкість подачі вершків має бути меншою за 40 м/с. При цьому їх жирність має знаходитись в діапазоні 40–50 %, а ширина кільцевої щілини повинна складати 0,1–0,5 мм.

## 5. 2. Визначення якісних характеристик молочної емульсії

На рис. 6 наведені мікрофотографії не гомогенізованого молока та зразків молока, оброблених в струминно–щілинному гомогенізаторі молока з роздільною подачею вершків.

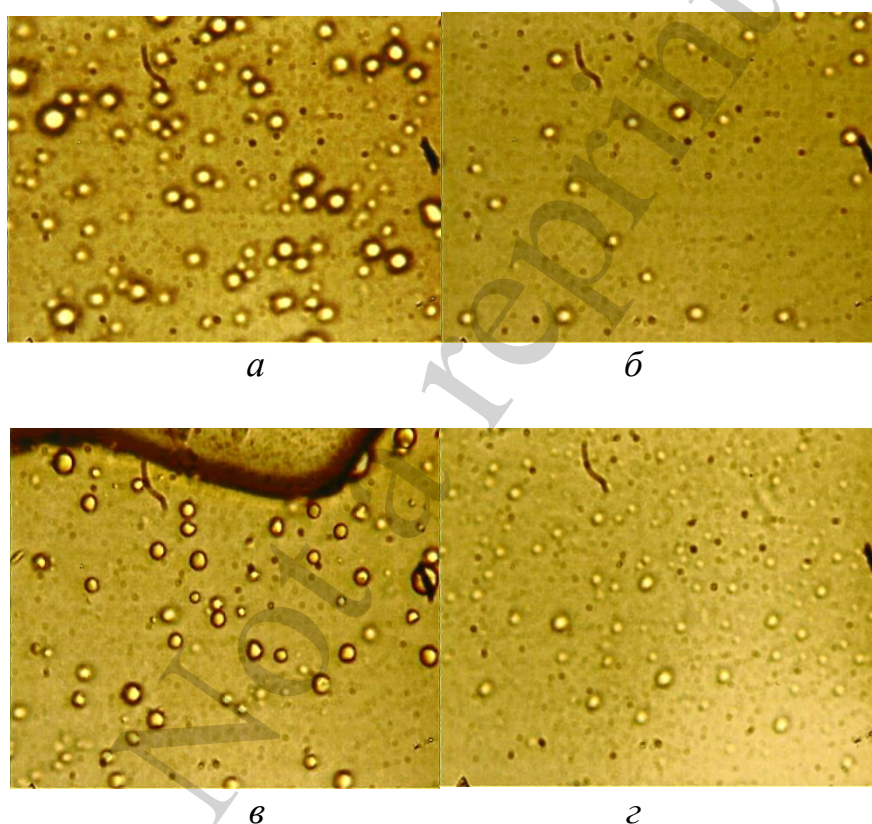


Рис. 6. Мікрофотографії: *a* – необробленого молока ( $d_{cp}=3,2$  мкм); *б* – після гомогенізації в СЦГРВ (при  $h=0,5$  мм;  $d_k=3$  мм; Жв=10 %) ( $d_{cp}=0,84$  мкм); *в* – після гомогенізації в СЦГРВ (при  $h=0,5$  мм;  $d_k=3$  мм; Жв=30 %) ( $d_{cp}=0,91$  мкм); *г* – після гомогенізації в СЦГРВ (при  $h=0,5$  мм;  $d_k=3$  мм; Жв=40 %) ( $d_{cp}=0,79$  мкм)

Для знайдених раціональних параметрів жирності та швидкості подачі вершків і ширини щілини (Жв=40 %,  $v_b=20$  м/с,  $h=0,5$  мм), після аналізу мікрофотографій було побудовано гістограму розподілу СЖК по розмірних групах (рис. 7).

Отримані показники свідчать про збільшення для СЖК в діапазоні 0,5–1 мкм з 55 % для струминного гомогенізатора молока з роздільною подачею вершків до майже 65 % у струминно–щілинному гомогенізаторі молока. Молоко

до гомогенізації характеризується такими параметрами: середній діаметр жирових кульок  $d_{cp}=2,49$  мкм, дисперсія  $\sigma=1,66$ , коефіцієнт варіації  $V=33$  %. Для молока після обробки в клапанному гомогенізаторі:  $d_{cp}=0,85$  мкм,  $\sigma=0,51$   $V=18$  % (при тиску 20 МПа), при цьому після обробки продукту в струминно-щілинному гомогенізаторі  $d_{cp}=0,79$  мкм,  $\sigma=0,48$   $V=15$  %.

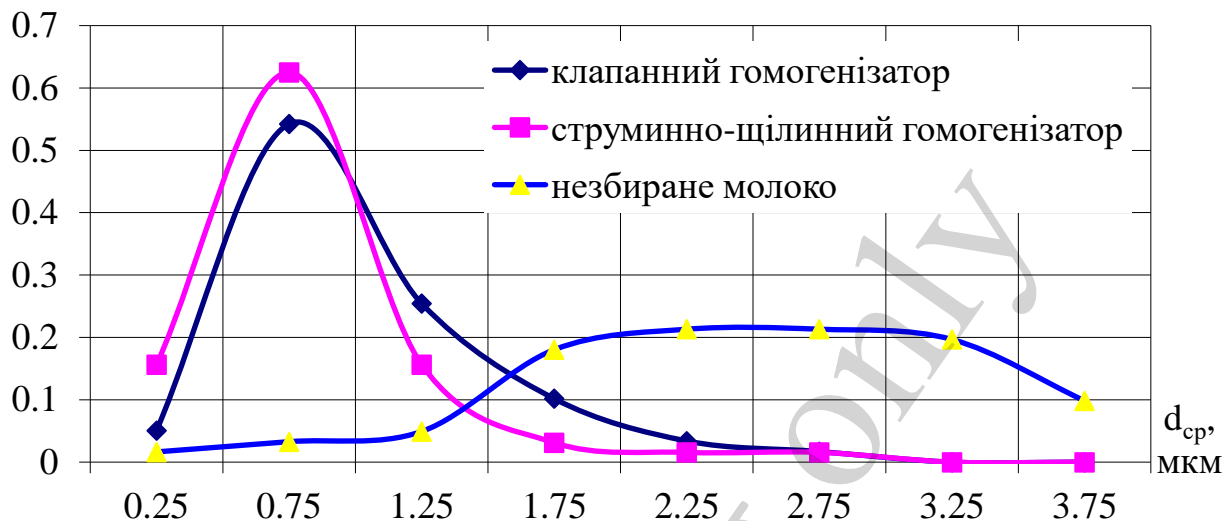


Рис. 7. Гістограма розподілу середнього діаметру жирових кульок за розмірними групами: а – після струминно-щілинної гомогенізації; б – після струминної гомогенізації з роздільним подаванням жирової фази; в – необробленого молока

Дані гістограми свідчать, що після обробки в СЦГРВ коефіцієнт варіації нижче аналогічного показника для клапанних гомогенізаторів на 17 %. При цьому СЖК продукту, обробленого в СЦГРВ, на 7 % менше, ніж у клапанних, які вважаються одними з найкращих за цим показником [2, 24].

### 5. 3. Визначення критичного значення критерія Вебера

З експериментальних даних представлених на рис. 3–5, були побудовані графіки залежностей  $k_h=f(h)$ ,  $k_{ж}=f(\text{Ж})$ ,  $k_v=f(v)$ . При цьому провели екстраполяцію експериментальних даних до умов, при яких  $k_{ш}=1$  (рис. 8–10).

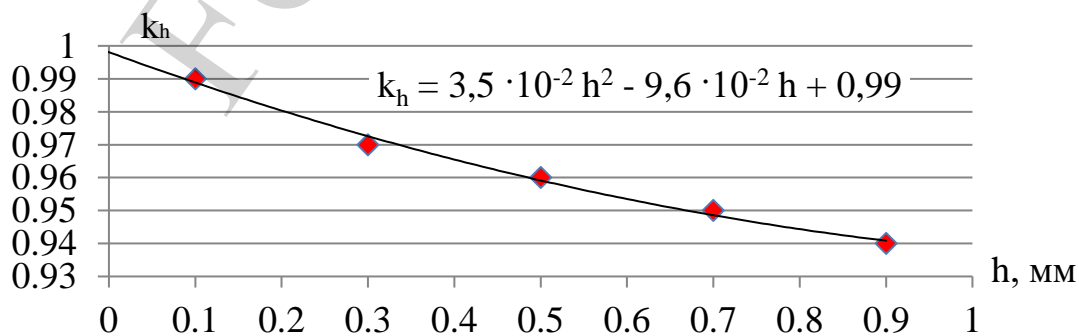


Рис. 8. Графік залежності коефіцієнту впливу ширини кільцевої щілини  $k_h$  від ширини кільцевої щілини в місці подавання вершків  $h$

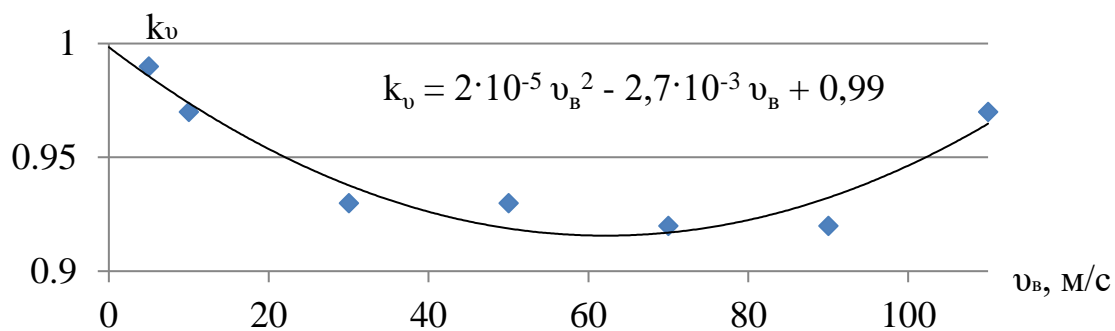


Рис. 9. Графік залежності коефіцієнту впливу швидкості подачі вершків  $k_v$  від швидкості подачі вершків  $v_B$

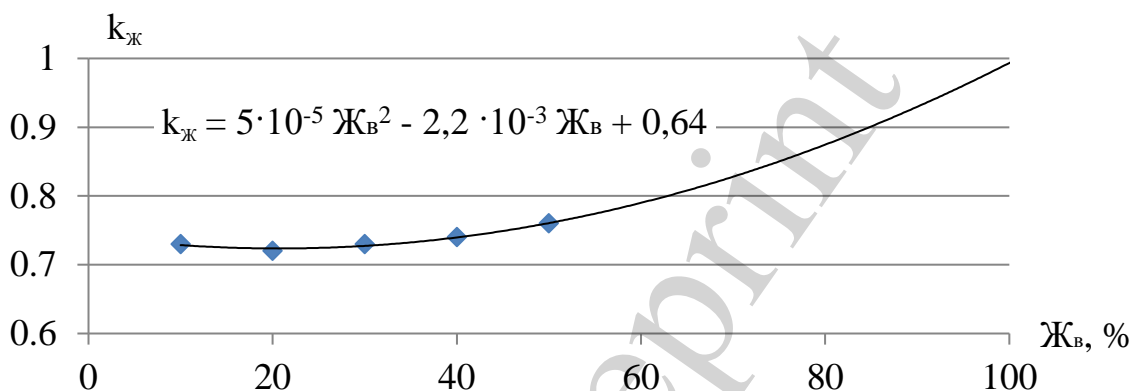


Рис. 10. Графік залежності коефіцієнту впливу жирності вершків  $k_{\text{ж}}$  від жирності вершків  $\text{Ж}_в$

В результаті отримані емпіричні вирази для складових  $k_{\text{ш}}$ :

$$k_h = 3,5 \cdot 10^{-2} h^2 - 9,6 \cdot 10^{-2} h + 0,99, \quad (4)$$

$$k_v = 2 \cdot 10^{-5} v_B^2 - 2,7 \cdot 10^{-3} v_B + 0,99, \quad (5)$$

$$k_{\text{ж}} = 5 \cdot 10^{-5} \text{Ж}_в^2 - 2,2 \cdot 10^{-3} \text{Ж}_в + 0,64. \quad (6)$$

З урахуванням рівнянь (4)–(6) формула (1) набуває вигляду:

$$d_{\text{ср}} = \frac{We_{\text{к}} \sigma_{\text{ж-п}}}{2\rho_{\text{ш}} ((3,5 \cdot 10^{-2} h^2 - 9,6 \cdot 10^{-2} h + 0,99)(2 \cdot 10^{-5} v_B^2 - 2,7 \cdot 10^{-3} v_B + 0,99))} \times$$

$$\times \frac{We_{\text{к}} \sigma_{\text{ж-п}}}{(5 \cdot 10^{-5} \text{Ж}_в^2 - 2,2 \cdot 10^{-3} \text{Ж}_в + 0,64))^2 v_{\text{зн}}^2}. \quad (7)$$

За формулою (3) при  $\rho_{\text{пл}}=1030 \text{ кг/м}^3$ ,  $d_{\text{ср}}=0,75 \text{ мкм}$ ,  $v_{\text{зн}}=60 \text{ м/с}$  (при діаметрі конфузора в місці найбільшого звуження  $d_{\text{к}}=3,5 \text{ мм}$ ),  $\sigma_{\text{ж-п}}=0,1 \text{ Н/м}$ , критичне значення критерію Вебера дорівнює 29.

Отримана формула (7) дозволяє обирати технологічні, гідравлічні та конструктивні параметри роботи СЦГРВ для забезпечення необхідної величини СЖК молочної емульсії на етапі проектування його промислових зразків.

## **6. Обговорення результатів досліджень якості диспергування молочної емульсії**

Отримані результати досліджень є продовженням розробок, опублікованих в циклі статей, які присвячені розробці математичної моделі, визначення показників якості та енерговитрат СЦГРВ [16, 17, 23]. Особливістю струминно-щілинного гомогенізатора молока є можливість подачі тонкого струменю вершків крізь вузьку кільцеву щілину до швидкісного потоку знежиреного молока. Реалізація такого способу дозволяє забезпечити суттєву економію питомих витрат енергії на диспергування (до 6–8 разів) при забезпеченні дисперсності на рівні клапанних гомогенізаторів [16]. До обмежень дослідження слід відсутність мікрофотографій стадій процесу руйнування жирових кульок молока при гомогенізації в СЦГРВ. Але це пов'язано зі значними технічними труднощами, що обумовлені високими швидкості руху жирових кульок та мікроскопічним їх розміром [24, 25].

Результати проведених експериментальних досліджень (рис. 3) свідчать про можливість отримання продукту, показники дисперсності, якого знаходяться на рівні клапанних гомогенізаторів при швидкості подачі вершків, менше 40 м/с. Такі параметри мають близькі значення до результатів досліджень струминного гомогенізатора молока з роздільною подачею вершків, раціональне значення швидкості подачі вершків для якого складає менше 30 м/с [18]. Розбіжність у результатах пояснюється наявністю в струминному гомогенізаторі молока декількох каналів, що дозволяє забезпечити необхідну продуктивність гомогенізатора при меншій швидкості подачі вершків. В діапазоні швидкості подачі вершків 40–100 м/с спостерігається збільшення СЖК. Це пояснюється тим, що для отримання молочної емульсії, з дисперсністю на рівні клапанних гомогенізаторів, згідно результатів аналітичних досліджень, швидкість подачі знежиреного молока має складати 60–90 м/с [17]. При перевищенні швидкості подачі вершків 100 м/с спостерігається зниження СЖК, але використання такого режиму, характеризується низькою енергоефективністю. Витрати енергії на створення тонкого струменя в'язкої рідини (молочних вершків) швидкістю більше 100 м/с стають близькими до енерговитрат клапанного гомогенізатора [1, 2, 5]. Отримані результати добре корелюють з залежностями, знайденими для струминного гомогенізатора молока з роздільною подачею вершків [5, 26, 27].

Отримати молочну емульсію, СЖК якої знаходяться на рівні клапанних гомогенізаторів можливо шляхом зменшення ширини кільцевої щілини (рис. 4). При цьому, зменшується центральна зони струменя вершків зі зниженою швидкістю обтікання жирових кульок. Зменшення цієї зони призводить до підвищення ступеня диспергування емульсії. Таким чином раціональне значення

ширини кільцевої щілини має прямувати до мінімуму. Однак надто низькі значення ширини щілини призводять до підвищення облітерації її внутрішніх поверхонь, що знизить надійність роботи дослідного гомогенізатора. Отже раціональні значення ширини щілини 0,1–0,5 мм. Отриманий діапазон значень очікувано менший за діаметр каналів подачі вершків струминного гомогенізатора молока з роздільною подачею вершків (0,6–0,8 мм) [18]. Площа поперечного перерізу кільцевої щілини СЩГРВ близька до значень сумарної площі каналів подачі вершків в струминному гомогенізаторі з роздільною подачею вершків. Але при використанні кільцевої щілини замість трубчастих каналів стає можливим зменшити ширину щілини, що підвищує ступінь диспергування молочної емульсії (рис. 4).

Проведеними експериментальними дослідженнями доведено, що збільшення дисперсності молочної емульсії відбувається при підвищенні жирності вершків до 50% (рис. 5). Це відбувається внаслідок неефективної дисипації енергії струменя знежиреного молока, в який вводиться струмінь вершків, на молочну плазму, яка міститься в вершках. Тому при збільшенні кількості плазми у потоці вершків (що зворотно пропорційно їх жирності) знижується швидкість обтікання жирових кульок потоком знежиреного молока, а отже і ступінь диспергування.

Межі коливання отриманого діапазону раціональних значень жирності вершків добре узгоджується з залежностями струминного гомогенізатора молока з роздільною подачею вершків [18]. Раціональні показники жирності вершків для нього змінюються в діапазоні 35–45 %, при цьому СЖК складає 0,8–0,9 мкм [18]. Дослідження раціональних параметрів роботи міні міксеру Т-подібної форми свідчать, що раціональне значення швидкості подачі вершків складає 40% [28, 29]. При його використанні отримується молочна емульсія, СЖК змінюється в діапазоні 1,0–1,1 мкм [30]. Використання вершків, жирність яких перевищує 50% нераціонально з точки зору суттєвого збільшення енерговитрат для проведення додаткової гомогенізації вершків високої жирності [31, 32].

Експериментально визначене критичне значення критерію Вебера для СЩГРВ  $We_k=29$ . Отримані результати свідчать про його збільшення порівняно з відомими з інших досліджень значеннями. Наприклад при диспергуванні у повітряному середовищі критичне значення критерію Вебера складає 8–10, а для струминного гомогенізатора молока з роздільною подачею вершків 28 одиниць [23, 5]. Різниця густини дисперсної та дисперсійної фаз на 2 порядки менше, ніж для рідини та повітря. Збільшення величини критерію для емульсій порівняно з газом виникає внаслідок більшої залучення до руху сусідніх шарів рідини, що оточують кульку, порівняно з перебігом диспергування у повітряному середовищі [26, 27]. Відмінність отриманого критичного значення критерію Вебера від струминного гомогенізатора молока з роздільною подачею вершків, пояснюється більшою залученістю сусідніх шарів. Такий ефект досягається при використанні в СЩГРВ кільцевої щілини замість каналів для подачі вершків. Це призводить до підвищення відносної швидкості й, як наслідок, до підвищення інтенсивності перебігу процесу гомогенізації [5, 27].

Отримані результати розподілу СЖК по розмірних групах (рис. 6) свідчать про зменшення коефіцієнта варіації на 17% та підвищення дисперсності розробленого гомогенізатора порівняно з показниками клапанного гомогенізатора [2, 33]. Таке підвищення якості молочної емульсії корелює зі значеннями критерія Вебера для СЦГРВ і клапанного гомогенізатора [5]. Тому отримані результати досліджень підтверджують гіпотезу визначального впливу на ступінь диспергування різниці між швидкостями дисперсійної та дисперсної фаз [5, 21, 27].

Обмеженням проведених досліджень є відсутність даних щодо ступеня облітерації внутрішніх поверхонь кільцевої щілини, при тривалій роботі гомогенізатора. Це потенційно може призвести до зниження продуктивності та підвищення питомих енерговитрат. Проведення досліджень впливу облітерації планується провести після розробки промислового зразка СЦГРВ.

## 7. Висновки

1. Знайдено залежність між швидкістю вершків, шириною кільцевої щілини, жирністю вершків та середнім діаметром жирових кульок після диспергування в СЦГРВ. Її аналіз дозволяє встановити раціональні параметри гомогенізатора. Для забезпечення СЖК на рівні 0,75–0,85 мкм швидкість вершків 40 м/с та менше, жирність вершків 40–50%, та ширина кільцевої щілини 0,1–0,5 мм.

2. Проведено оцінку дисперсних характеристик молочної емульсії, отриманої після обробки в СЦГРВ. Коефіцієнт варіації 15%, а СЖК молочної емульсії 0,79 мкм, що нижче аналогічних показників для клапанних гомогенізаторів на 17 і 7 % відповідно. Це доводить високу якість молочної емульсії після обробки в дослідному гомогенізаторі.

3. Проведене на основі експериментальних даних прогнозування, виконане методом екстраполяції експериментальних даних, дозволило знайти уточнене критичне значення критерію Вебера для диспергування молока, яке дорівнює 29. Знайдене значення необхідне для створення математичних моделей процесу диспергування молочного жиру та розробки більш ефективних конструкцій гомогенізаторів молока.

## Література

1. Фиалкова, Е. А. (2006). Гомогенизация. Новый взгляд. СПб.: ГИОРД, 392.
2. Нужин, Е. В., Гладушняк, А. К. (2007). Гомогенизация и гомогенизаторы. Одесса: Печатный дом, 263.
3. Huppertz, T. (2011). Homogenization of Milk | Other Types of Homogenizer (High-Speed Mixing, Ultrasonics, Microfluidizers, Membrane Emulsification). Encyclopedia of Dairy Sciences, 761–764. doi: <https://doi.org/10.1016/b978-0-12-374407-4.00226-0>
4. Ciron, C. I. E., Gee, V. L., Kelly, A. L., Auty, M. A. E. (2010). Comparison of the effects of high-pressure microfluidization and conventional homogenization of milk on particle size, water retention and texture of non-fat and low-fat yoghurts. International Dairy Journal, 20 (5), 314–320. doi: <https://doi.org/10.1016/j.idairyj.2009.11.018>



5. Samoichuk, K., Zahorko, N., Oleksienko, V., Petrychenko, S. (2019). Generalization of Factors of Milk Homogenization. *Modern Development Paths of Agricultural Production*, 191–197. doi: [https://doi.org/10.1007/978-3-030-14918-5\\_21](https://doi.org/10.1007/978-3-030-14918-5_21)
6. Дейниченко, Г. В., Самойчук, К. О., Ковальов, О. О. (2016). Конструкції струминних диспергаторів жирової фази молока. *Праці Таврійського державного агротехнологічного університету*, 1 (16), 219–227.
7. Fonte, C. P., Fletcher, D. F., Guichardon, P., Aubin, J. (2020). Simulation of micromixing in a T-mixer under laminar flow conditions. *Chemical Engineering Science*, 222, 115706. doi: <https://doi.org/10.1016/j.ces.2020.115706>
8. Roudgar, M., Brunazzi, E., Galletti, C., Mauri, R. (2012). Numerical Study of Split T-Micromixers. *Chemical Engineering & Technology*, 35 (7), 1291–1299. doi: <https://doi.org/10.1002/ceat.201100611>
9. Samoichuk, K., Zhuravel, D., Palyanichka, N., Oleksienko, V., Petrychenko, S., Slobodyanyuk, N. et. al. (2020). Improving the quality of milk dispersion in a counter-jet homogenizer. *Potravinarstvo Slovak Journal of Food Sciences*, 14, 633–640. doi: <https://doi.org/10.5219/1407>
10. Jiang, B., Shi, Y., Lin, G., Kong, D., Du, J. (2019). Nanoemulsion prepared by homogenizer : The CFD model research. *Journal of Food Engineering*, 241, 105–115. doi: <https://doi.org/10.1016/j.jfoodeng.2018.08.014>
11. Morales, J. O., Watts, A. B., McConville, J. T. (2016). Mechanical Particle-Size Reduction Techniques. *AAPS Advances in the Pharmaceutical Sciences Series*, 165–213. doi: [https://doi.org/10.1007/978-3-319-42609-9\\_4](https://doi.org/10.1007/978-3-319-42609-9_4)
12. Ashokkumar, M., Bhaskaracharya, R., Kentish, S., Lee, J., Palmer, M., Zisu, B. (2009). The ultrasonic processing of dairy products – An overview. *Dairy Science & Technology*, 90 (2-3), 147–168. doi: <https://doi.org/10.1051/dst/2009044>
13. Mohammadi, V., Ghasemi-Varnamkhasti, M., Ebrahimi, R., Abbasvali, M. (2014). Ultrasonic techniques for the milk production industry. *Measurement*, 58, 93–102. doi: <https://doi.org/10.1016/j.measurement.2014.08.022>
14. Bratsikhin, A., Leschenko, E., Kostenko, K. (2019). Influence of cavitation disintegration on dairy foods production. *Journal of Hygienic Engineering and Design*, 27, 173–177.
15. Samoichuk, K., Zhuravel, D., Viunyk, O., Milko, D., Bondar, A., Sukhenko, Y. et. al. (2020). Research on milk homogenization in the stream homogenizer with separate cream feeding. *Potravinarstvo Slovak Journal of Food Sciences*, 14, 142–148. doi: <https://doi.org/10.5219/1289>
16. Самойчук, К. О., Ковальов, О. О., Паляничка, Н. О., Колодій, О. С., Лебідь, М. Р. (2019). Експериментальні дослідження параметрів струминного гомогенізатора молока з роздільною подачею вершків щільового типу. *Праці Таврійського державного агротехнологічного університету*, 2 (19), 117–129. doi: <https://doi.org/10.31388/2078-0877-19-2-117-129>
17. Самойчук, К. О., Ковальов, О. О., Борохов, І. В., Паляничка, Н. О. (2019). Аналітичні дослідження енергетичних показників і параметрів якості струминно-щільового гомогенізатора молока. *Праці Таврійського державного агротехнологічного університету*, 1 (19), 3–18.

18. Самойчук, К. О., Ковальов, О. О. (2016). Механізми диспергування жирових кульок в струминному гомогенізаторі молока. Наукові праці ОНАХТ, 80 (1), 103–107.
19. ISO 9622:2013. Milk and liquid milk products.
20. ISO 707:2013. Milk and milk products. Guidance on sampling.
21. Samoichuk, K., Kiurchev, S., Oleksienko, V., Palyanichka, N., Verholantseva, V. (2016). Research into milk homogenization in the pulsation machine with a vibrating rotor. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*, 6 (11 (84)), 16–21. doi: <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2016.86974>
22. Самойчук, К. О., Ковальов, О. О., Івженко, О. В. (2012). Аналіз методів оцінювання якості гомогенізації молока. *Праці Таврійського державного агротехнологічного університету*, 4 (12), 222–230.
23. Ковальов, О. О., Паляничка, Н. О., Лебідь, М. Р. (2018). Обґрунтування коефіцієнту струминної гомогенізації. *Агроекологічні аспекти виробництва та переробки продукції сільського господарства: матеріали міжнар. наук.-практ. конф. Мелітополь-Кирилівка: ТДАТУ*, 46.
24. Chapter 6.3. Homogenisers. *Dairy Processing Handbook* (2003). Lund, 115–122.
25. Wang, X., Wang, Y., Li, F., Li, L., Ge, X., Zhang, S., Qiu, T. (2020). Scale-up of microreactor: Effects of hydrodynamic diameter on liquid–liquid flow and mass transfer. *Chemical Engineering Science*, 226, 115838. doi: <https://doi.org/10.1016/j.ces.2020.115838>
26. Liao, Y., Lucas, D. (2009). A literature review of theoretical models for drop and bubble breakup in turbulent dispersions. *Chemical Engineering Science*, 64 (15), 3389–3406. doi: <https://doi.org/10.1016/j.ces.2009.04.026>
27. Tartar, L. (2009). *The General Theory of Homogenization. Lecture Notes*, 470.
28. Fani, A., Camarri, S., Salvetti, M. V. (2013). Investigation of the steady engulfment regime in a three-dimensional T-mixer. *Physics of Fluids*, 25 (6), 064102. doi: <https://doi.org/10.1063/1.4809591>
29. Stankiewicz, A., Moulijn, J. A. (2002). Process Intensification. *Industrial & Engineering Chemistry Research*, 41 (8), 1920–1924. doi: <https://doi.org/10.1021/ie011025p>
30. Hussong, J., Lindken, R., Pourquie, M., Westerweel, J. (2009). Numerical Study on the Flow Physics of a T-Shaped Micro Mixer. *IUTAM Bookseries*, 191–205. doi: [https://doi.org/10.1007/978-90-481-2626-2\\_15](https://doi.org/10.1007/978-90-481-2626-2_15)
31. Степанова, Л. И. (2000). *Справочник технолога молочного производства. Т. 1. Цельномолочные продукты*. СПб.: ГИОРД, 384.
32. Walstra, P., Geurts, T. J., Noomen, A., Jellema, A., Van Boekel, M. A. J. S. (1999). *Dairy technology: Principles of Milk Properties and Processes. Part II: Processes*. New York: Marcel Dekker Inc, 246.
33. Postelmans, A., Aernouts, B., Jordens, J., Van Gerven, T., Saeys, W. (2020). Milk homogenization monitoring: Fat globule size estimation from scattering spectra of milk. *Innovative Food Science & Emerging Technologies*, 60, 102311. doi: <https://doi.org/10.1016/j.ifset.2020.102311>