

**МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
ПОЛІСЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ**

Факультет інженерії та енергетики
Кафедра агроінженерії та технічного сервісу

УДК 637.131

Кваліфікаційна робота на правах
рукопису

ІВАЩУК Олександр Володимирович

**КВАЛІФІКАЦІЙНА РОБОТА
ОБҐРУНТУВАННЯ ПАРАМЕТРІВ ТА РЕЖИМІВ РОБОТИ
ГОМОГЕНІЗАТОРА МОЛОКА**

208 «Агроінженерія»

Подається на здобуття освітнього ступеня магістр

Кваліфікаційна робота містить результати власних досліджень.
Використання ідей, результатів і текстів інших авторів мають посилання на
відповідне джерело

(підпис)

(ініціали та прізвище здобувача вищої освіти)

Керівник роботи
к.т.н., доц. Медведський О.В.

Житомир – 2023

АНОТАЦІЯ

Іващук О. В. **Обґрунтування параметрів та режимів роботи гомогенізатора молока.** – Кваліфікаційна робота на правах рукопису.

Кваліфікаційна робота на здобуття освітнього ступеня магістр зі спеціальності 208 – агроінженерія. – Поліський національний університет, Житомир, 2023 р.

Магістерська робота спрямована на вирішення наукового завдання покращення технологічного процесу гомогенізації молока. Виконана оцінка відомих конструкцій серійних гомогенізаторів молока, встановлені їх переваги та недоліки.

Розроблена конструкція струменевого гомогенізатора молока із перехресним потоками молока та вершків у спільному каналі. Отримане аналітичне рівняння визначення впливу інтенсивності потоку молока на розмір здрібнення кульок молочного жиру. Визначено оптимальну форму позовжнього каналу.

За результатами дослідження отримані рівняння регресії взаємозв'язку кінцевого розміру кульок молочного жиру та конструкційно-технологічних параметрів розробленого гомогенізатора молока.

Ключові слова: потік молока, осьовий канал, потік вершків, діаметр кульок, форма каналу

ANNOTATION

Ivashchuk O. V. **Justification of the parameters and modes of operation of the milk homogenizer.** – Qualification work on manuscript rights.

Qualification work for a master's degree in specialty 208 – agroengineering. – Polissia National University, Zhytomyr, 2023.

The master's work is aimed at solving the scientific task of improving the technological process of milk homogenization. The known designs of serial milk homogenizers were evaluated, their advantages and disadvantages were established.

The design of a jet milk homogenizer with cross-flows of milk and cream in a common channel has been developed. The obtained analytical equation for determining the effect of the intensity of the milk flow on the size of the crushing of milk fat balls. The optimal shape of the longitudinal channel was determined.

Based on the results of the research, the regression equations of the relationship between the final size of milk fat balls and the structural and technological parameters of the developed milk homogenizer were obtained.

Key words: milk flow, axial channel, cream flow, ball diameter, channel shape

ЗМІСТ

ВСТУП	4
РОЗДІЛ 1. ОЦІНКА ТЕХНОЛОГІЙ ТА ТЕХНІЧНИХ ЗАСОБІВ ГОМОГЕНІЗАЦІЇ МОЛОКА	7
1.1. Аналіз способів гомогенізації молока	7
1.2. Оцінка шляхів реалізації потенціалу способів отримання гомогенованого молока	11
1.3. Висновки до розділу 1	14
РОЗДІЛ 2. ВСТАНОВЛЕННЯ ТЕОРЕТИЧНИХ ПЕРЕДУМОВ ВИКОРИСТАННЯ СТРУМЕНЕВОГО ГОМОГЕНІЗАТОРА МОЛОКА .	15
2.1. Розроблення конструкційно-технологічної схеми струменевого гомогенізатора молока	15
2.2. Встановлення конструкційно-технологічних параметрів розробленого гомогенізатора	17
2.3. Висновки до розділу 2	23
РОЗДІЛ 3. ДОСЛІДЖЕННЯ ГЕОМЕТРИЧНИХ ТА ТЕХНОЛОГІЧНИХ ПАРАМЕТРІВ РОЗРОБЛЕНОГО СТРУМЕНЕВОГО ГОМОГЕНІЗАТОРА МОЛОКА	25
3.1. Встановлення впливу параметрів гомогенізатора на розмір кульок молочного жиру	25
3.2. Встановлення витрат потужності для функціонування розробленого гомогенізатора молока	27
3.3. Висновки до розділу 3	30
ВИСНОВКИ	31
СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ	33

ВСТУП

Актуальність теми. Виробництво продуктів переробки молока є важливою задачею забезпечення продовольчої безпеки нашої держави, особливо у такий складний історичний час – боротьби за незалежність із споконвічним ворогом всього українського. Людський організм потребує корисних речовин, котрі знаходяться у молочних продуктах. За твердженнями спеціалістів [1-4] доросла людина має споживати до 380 кг молочних продуктів переробки та молока. Нажаль такого рівня споживання в нашій країні поки не досягнуто. В першу чергу, звичайно, на рівень досягнення потрібного обсягу виробництва молока на душу населення значний вплив має війна [4]. Але станом на довоєнний період спостерігалась тенденція до незадоволення потреб відповідно до вимог, в середньому споживалось 210-220 кг молочних продуктів на рік [1].

Однією із умов збільшення споживання молочних продуктів населенням країни є збільшення ефективності переробки незбираного молока. Відомо [2], що продукти переробки молока краще засвоюються дорослим організмом. Важливим у процесі подальшої переробки молока є технологічна операція гомогенізації незбираного молока. Від ефективності гомогенізації залежить збереженість технологічних властивостей молока та подальша доля отримання якісних продуктів переробки.

Широко використовуються у переробних виробництвах механічні методи отримання гомогенізованого молока. Такі методи дозволяють забезпечити мінімальний розмір кульок молочного жиру на рівні 1 мкм та достатню однорідність розподілення у загальному об'ємі. Технічні засоби відрізняються відносною простотою конструкції та експлуатації, що обумовило їх широке використання. Але значні питомі енерговитрати, залежність від якості очищення молока та низький коефіцієнт корисної дії спонукають вчених до пошуку нових технічних рішень гомогенізаторів молока.

Таким чином, розроблення ефективних сучасних технічних засобів здрібнення кульок молочного жиру є важливим та актуальним завданням для молокопереробної галузі сьогодення.

Мета і задачі досліджень. Метою наукових досліджень є підвищення ефективності здрібнення кульок молочного жиру шляхом обґрунтування параметрів гомогенізатора молока струменевого типу.

Щоб досягнути поставленої мети необхідно вирішити наступні задачі:

- оцінити існуючі технології та технічні засоби отримання гомогенізованого молока, встановити їх переваги та недоліки;
- розробити структурну схему гомогенізатора молока струменевого типу;
- визначити вплив геометричних параметрів на ефективність технологічного процесу залежно від режимів роботи;
- встановити раціональні режими роботи та конструкційні параметри розробленого гомогенізатора молока;
- визначити експлуатаційну доцільність використання розробленого гомогенізатора струменевого типу.

Об’єкт дослідження – процес руйнування кульок молочного жиру під час гомогенізації.

Предмет дослідження – гомогенізатор молока струменевого типу та його конструкційно-геометричні параметри.

Методи досліджень. Дослідження проводились із використанням теоретичних положень та методів математичного аналізу для встановлення аналітичних залежностей та характеристик з використанням відомих законів гідравліки, теплотехніки, термодинаміки та гідродинаміки. При цьому широко використовувались методи інтегрального та диференціального типу.

Дослідні дані оброблялись із використанням доступного програмного середовища Microsoft Excel та інших програм.

Апробація результатів роботи. Результати досліджень, які отримані у кваліфікаційній роботі, доповідались та отримали схвалення на наукових конференціях, та викладені у таких роботах:

1. Іващук О. В. Аналіз способів гомогенізації молока. *Студентські читання–2023* : матеріали науково-практичної конференції. 25 жовтня 2023 р. Житомир: Поліський національний університет, 2023. С. 170–173.

2. Медведський О. В., Іващук О. В. Оцінка шляхів реалізації потенціалу способів отримання гомогенізованого молока. *Інженерні процеси та системи* : матеріали I Міжнародної науково-практичної конференції здобувачів вищої освіти та молодих вчених. 14-15 червня 2023 р. Житомир: Поліський національний університет, 2023. С. 99–102.

3. Медведський О. В., Іващук О. В. Дослідження конструкційно-технологічної схеми струменевого гомогенізатора молока. *Біоенергетичні системи* : матеріали VII Міжнародної науково-практичної конференції. 15-17 листопада 2023 р. Житомир: Поліський національний університет, 2023. С. 94–95.

Структура та обсяг роботи. Кваліфікаційна робота складається зі вступу, 3-х розділів текстової частини, загальних висновків, списку використаних літературних джерел. Текстова частина магістерської роботи виконана державною мовою, викладена на 34-х сторінках друкованого тексту, проілюстрована однією таблицею та 17-ма рисунками.

РОЗДІЛ 1

ОЦІНКА ТЕХНОЛОГІЙ ТА ТЕХНІЧНИХ ЗАСОБІВ ГОМОГЕНІЗАЦІЇ МОЛОКА

1.1. Аналіз способів гомогенізації молока

В молокопереробній промисловості важливо збільшити витривалість молока до розшаровування, що спонукає до виникнення такого процесу як скисання. Швидкість розшаровування залежить від розміру молочної жирової кульки, зі збільшенням розміру швидкість осадження зростає [5-7]. Тому, для сповільнення розшаровування молока пропонується здрібнювати кульки молочного жиру до середнього розміру 1-1,5 мкм від початкового розміру, який може перевищувати в середньому 8 мкм [6-9].

Гомогенізація молока – це технологічний процес здрібнення кульок молочного жиру для підвищення технологічних властивостей молока при виготовленні молочних продуктів [2, 7-10].

Використання гомогенізованого молока дозволяє отримати наступні переваги в процесі виробництва молочних продуктів:

- знижується у 8-10 разів втрата молочного жиру із-за видалення разом із сироваткою при виробництві сирів;
- гомогенізоване молоко та вершки значно краще піддаються збиванню, що покращує якісні та смакові якості морозива;
- у питному молоці кульки молочного жиру зменшеного розміру сприяють кращому його засвоєнню дорослим організмом за рахунок збільшення площі контакту із шлунковим соком;
- в процесі гомогенізації збільшується в'язкість молока та покращується його консистенція [2, 10].

Технічні засоби які здійснюють здрібнення кульок молочного жиру називають гомогенізаторами.

Найбільш поширеним способом здрібнення кульок жиру є механічне проштовхування молока через вузьку щілину під високим тиском (рис. 1.1-1.2).

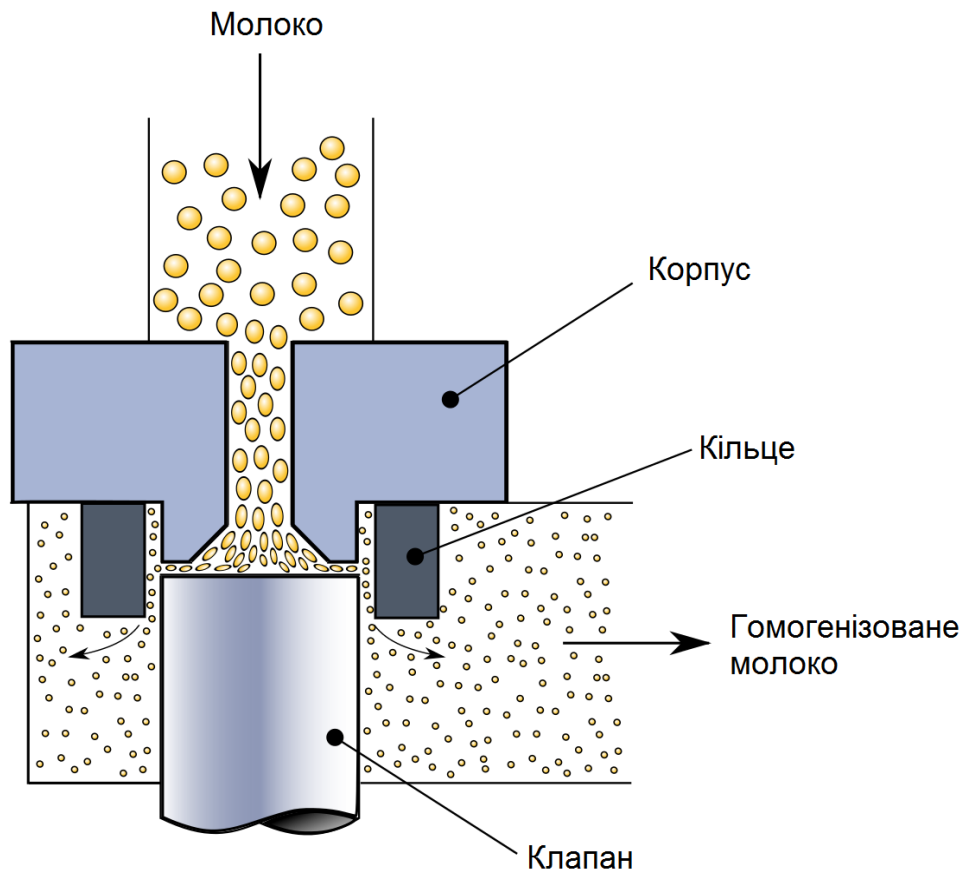


Рис. 1.1. Схема технологічного процесу руйнування молочного жиру механічним способом.

Дослідженнями вчених [5-10] встановлено, що оптимальною величиною тиску проштовхування молока через щілину є 12-14 МПа, оскільки при збільшенні тиску до 20 МПа інтенсивність приросту утворення дрібних кульок зменшується. Саме тому, у більшості механічних гомогенізаторів встановлюється тиск на рівні 14-15 МПа для незбираного або молока із низькою жирністю та 5-7,5 МПа для вершків із жирністю 35 % [2, 11].

Для покращення процесу продукт перед гомогенізацією рекомендують підігрівати до температури 60-65 °С, оскільки за температури нижчої за 30 °С відбувається не здрібнення, а руйнування кульок молочного жиру, що значно погіршує процес переробки такого молока для отримання сирів чи вершкового масла [2, 6].

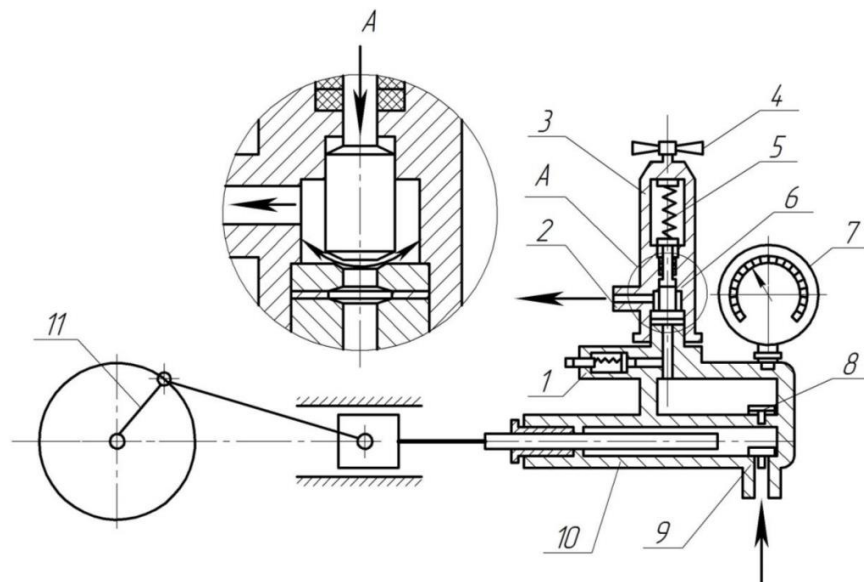


Рис. 1.2. Схема роботи клапанного (плунжерного) гомогенізатора молока:
 1 – запобіжник; 2 – патрубок виходу гомогенізованого молока; 3 – перехідник;
 4 – гвинтовий механізм; 5 – регулювальна пружина; 6 – циліндричний клапан;
 7 – вимірювач тиску; 8 – випускний клапан; 9 – впускний клапан; 10 – корпус
 плунжера; 11 – привод плунжера. [2, 11-13]

Промисловість виробляє широку номенклатуру механічних гомогенізаторів, зокрема плунжерний гомогенізатор фірми FDB S.r.l. (Італія) (рис. 1.3).



Рис. 1.3. Загальний вигляд гомогенізатора молока FBF-037 [14]

Перевагою гомогенізаторів плунжерного (клапанного) типу FBF-037 є отримання готового продукту із високим ступенем здрібнення кульок молочного жиру з високою однорідністю середнього розміру до 0,8-1 мкм та припустима продуктивність від 0,3 до 10 м³/год. [14]

До недоліків клапанних гомогенізаторів відносять: [2, 15]

- досить висока вартість обладнання;
- висока питома енергоємність процесу 6-9 кВт/т продукту;
- високі вимоги чистоти до вхідної сировини;
- низький коефіцієнт корисної дії

Для створення однорідної дисперсної суміші використовують відцентрові гомогенізатори, принцип роботи яких подано на рис. 1.4.

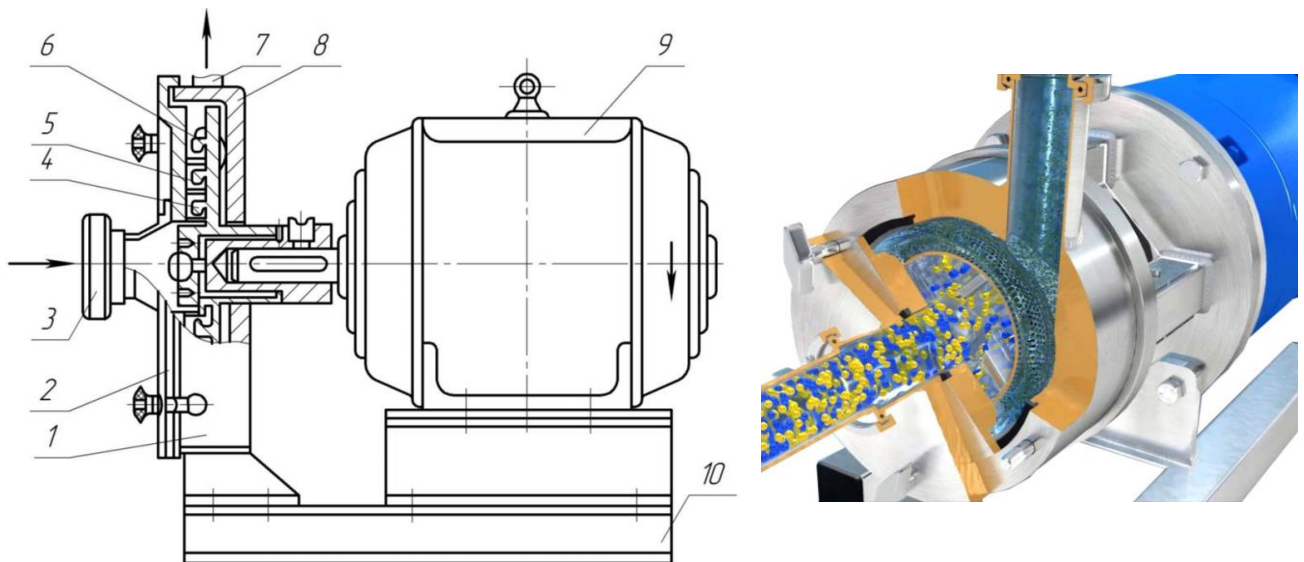


Рис. 1.4. Схема відцентрового гомогенізатора: 1 – основа; 2 – диск притискний; 3 – вхідний патрубок; 4-6 – кільцеві отвори; 7 – патрубок вихідний; 8 – корпус рухомого диску; 9 – електропривод; 10 – фундамент. [2]

Гомогенізатори відцентрового типу мають меншу питому енергоємність та металоємність, що підвищує їх економічну доцільність. Але відцентрові машини не забезпечують достатню ступінь гомогенізації (середній розмір жирової кульки більше 2 мкм), вимагають особливого технічного догляду. Це пояснюється тим, що руйнування молочного жиру відбувається внаслідок кавітаційного процесу, тому зростає руйнівне навантаження на металеві

елементи конструкції, а постійне обертання вимагає додаткового мащення робочих органів для захисту від налипання молочного жиру. [2, 12-16]

Використання механічних гомогенізаторів досить поширене, але із-за значної питомої витрати енергії на отримання одиниці готової продукції та особливостей конструкції потребують постійного належного технічного обслуговування.

1.2. Оцінка шляхів реалізації потенціалу способів отримання гомогенізованого молока

З метою зниження енергоємності гомогенізації молока пропонується ультразвуковий принцип руйнування жирових кульок молока (рис. 1.5).

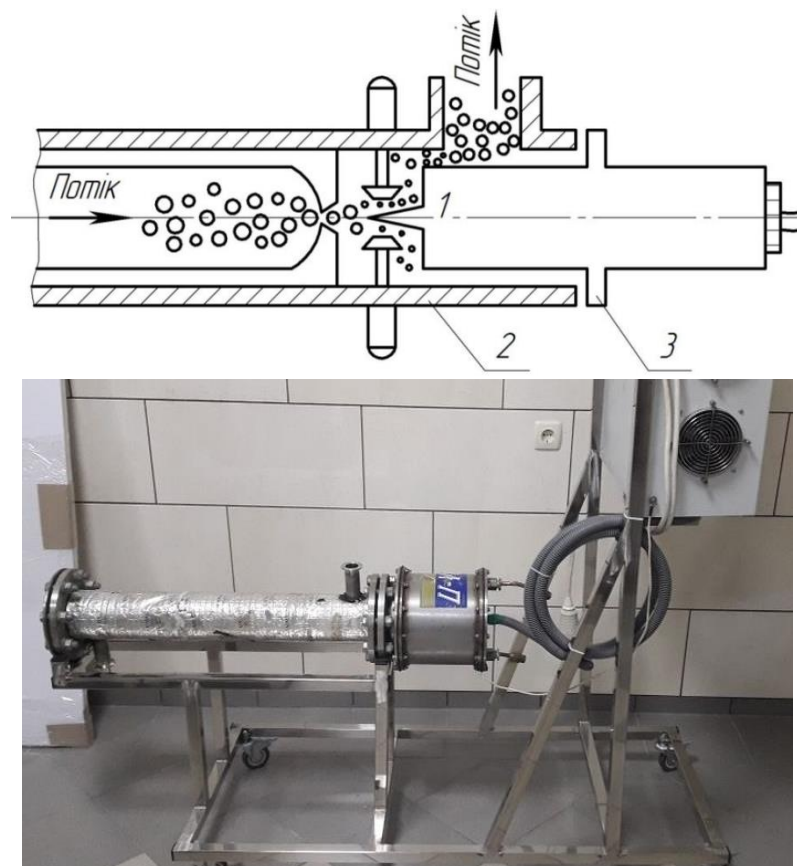


Рис. 1.5. Схема роботи та загальний вигляд ультразвукового гомогенізатора: 1 – вібруючий елемент; 2 – регулюючий механізм; 3 – резонатор. [2, 14-16]

Основною перевагою ультразвукового гомогенізатора є нижчі, порівняно із механічними, питомі витрати енергії на виробництво одиниці готового продукту (3-4 кВт/т). Окрім цього, під дією кавітаційних руйнувань спричинених віброуючою частиною пристрою, підлягають зниженню деякі бактерії. [2, 16]

Проте, із-за недостатньої вивченості процесу ультразвуковий принцип не набув широкого використання для гомогенізації молока та вершків. Окрім цього, даний пристрій не забезпечує здрібнення менше за 1,5 мкм, має складну електромеханічну конструкцію, вимогливий до постійності швидкості потоку молока, що сповільнює його поширення.

Вакуумний гомогенізатор використовує інший принцип руйнування жирових кульок молока (рис. 1.6).



Рис. 1.6. Гомогенізатор молока вакуумний VMG фірми FoodTechProcess (Словаччина) [17]

Принцип роботи вакуумного гомогенізатора базується на руйнуванні кульок молочного жиру під дією високої температури 80-95 °С та низького тиску 10-20 кПа. Продукт, який надходить у вакууму камеру із зазначеною

температурою під дією низького тиску перегрівається, що викликає вибухове руйнування кульок молочного жиру. [14-17]

Перевагою такого способу гомогенізації є додаткове знезараження молока під дією високої температури, нижчі ніж у плунжерних питомі витрати енергії, отримується досить однорідна за консистенцією суміш, якщо додатково використовувати змішувальний механізм. [2, 10-17]

Проте, вакуумні машини не забезпечують високого ступеню гомогенізації, середній розмір кульок молочного жиру становить не менше 2,5 мкм, що недостатньо для отримання якісних продуктів переробки молока, але цілком підходить для отримання суспензій з високою однорідністю. [2]

Струменева гомогенізація полягає у руйнуванні кульок молочного жиру за рахунок зіткнення із перешкодою, при введенні у місткість із продуктом, при перепадах тисків, у зустрічному потоці (проти-потік) (рис. 1.7). [7, 10-11]

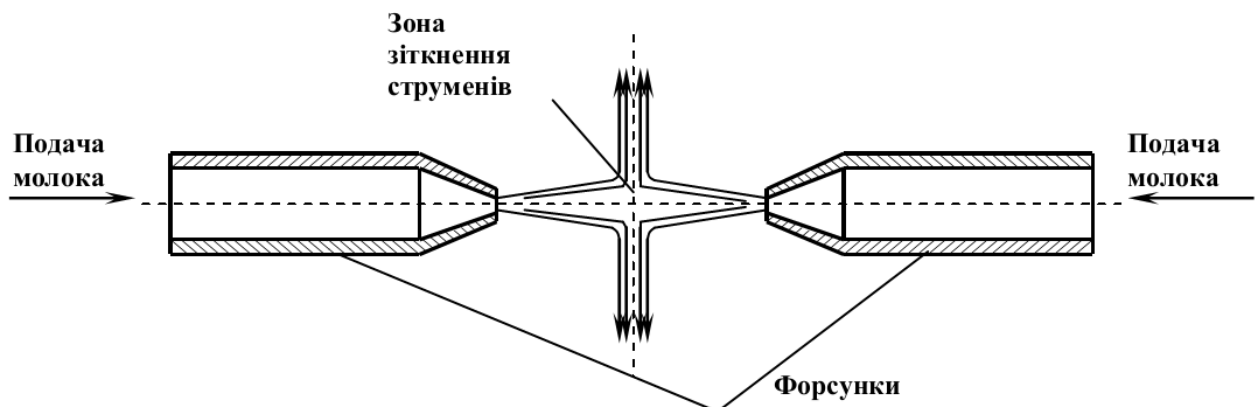


Рис. 1.7. Схема дії зустрічних потоків струменевого гомогенізатора

За дослідженнями [7, 10-11] струменевий спосіб гомогенізації молока у зустрічному потоці (рис. 1.7) дозволяє отримати високий ступінь гомогенізації із середнім розміром часточок жиру 0,7-0,8 мкм при створенні тиску потоку 4-6 МПа. Такий розмір часточок відповідає клапанному способу гомогенізації при нижчих питомих витратах потужності 4-5 кВт/т продукту.

Недоліком гомогенізації із використанням зустрічних потоків є значне спінювання молока, що викликає руйнування оболонок кульок молочного

жиру, а може призвести до втрат молока та погіршення його технологічної спроможності у створенні деяких продуктів молочної промисловості. [7]

Дослідження способів та технічних засобів гомогенізації молока вказали на використання широкого спектру можливих рішень. Найбільшого поширення набули механічні гомогенізатори клапанного типу із-за можливості отримання часточок із мінімальним розміром. Використання вакуумних, відцентрових та ультразвукових гомогенізаторів для отримання гомогенізованого молока обмежене із-за недостатності вивчення таких процесів. Більш перспективним вбачається використання струменевого способу гомогенізації, оскільки досягається мінімальний розмір здрібнених кульок молочного жиру при незначних витратах енергії. [18]

Проте, притаманні кожному із розглянутих способів та технічних засобів гомогенізації притаманні свої переваги та недоліки, що спонукає до пошуку раціональних рішень отримання якісного гомогенізованого молока.

1.3. Висновки до розділу 1.

1. Механічні гомогенізатори молока клапанного типу отримали найбільше поширення оскільки характеризуються високим ступенем гомогенізації та забезпечують здрібнення кульок молочного жиру до розміру 0,8-1 мкм. До недоліків відносять високу питому витрату енергії на отримання одиниці готової продукції, чутливість до якості очищення молока та необхідність належного технічного обслуговування.

2. Виконана оцінка вакуумних, відцентрових та ультразвукових гомогенізаторів молока, яка вказує низький ступінь гомогенізації та отриманням кульок молочного жиру більшим від 2,5 мкм. Встановлено, що із-за недостатності вивчення вказаних процесів гомогенізатори вказаного типу не набули широкого використання для гомогенізації молока.

РОЗДІЛ 2

ВСТАНОВЛЕННЯ ТЕОРЕТИЧНИХ ПЕРЕДУМОВ ВИКОРИСТАННЯ СТРУМЕНЕВОГО ГОМОГЕНІЗАТОРА МОЛОКА

2.1. Розроблення конструкційно-технологічної схеми струменевого гомогенізатора молока

Оцінки відомих технічних рішень гомогенізаторів молока вказала, що найбільш перспективним є струменевий спосіб гомогенізації. Оскільки при способі зустрічної гомогенізації виникає значне спінювання молока, застосування такого типу обладнання не рекомендується. Але струменеві гомогенізація дозволяє отримати високу ступінь здрібнення кульок молочного жиру до 1 мкм і менше із незначними витратами енергії.

Нами пропонується використовувати прямопотік двох різних за властивостями середовищ які зустрічаються у місці із найбільшою швидкістю основного потоку (рис. 2.1).

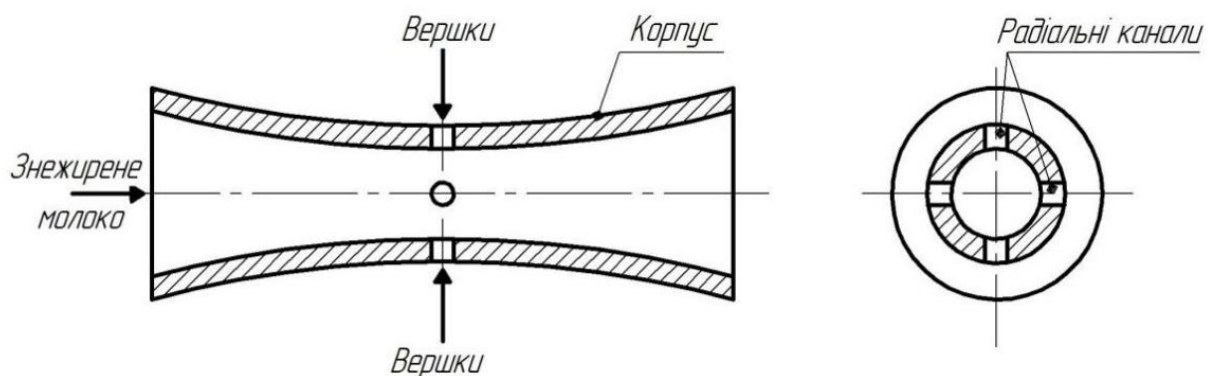


Рис. 2.1. Схема конструкції прямопоточного гомогенізатора молока

Принцип роботи розробленого гомогенізатора молока (рис. 2.1) полягає в наступному. Молоко з нижчою жирністю подається під тиском вздовж осі запропонованого гомогенізатора. У місці звуження, де швидкість потоку молока зниженої жирності має найбільше значення, перпендикулярно до осі

потоків подаються вершки (жирністю 25-30 %) або молоко із більшою жирністю. Таким чином, два потоки різні за густиною зустрічаються у точці найбільшої швидкості – тобто звуженні. З попередніх досліджень [19] відомо що середовища різної жирності мають різні швидкісні характеристики.

Руйнування кульок молочного жиру відбувається за рахунок різниці швидкостей двох потоків (рис. 2.2). При цьому утворюється режим турбулентного потоку, на кульку жиру будуть діяти притискаючі та розтягуючі зусилля що перевищують сили поверхневого натягу.

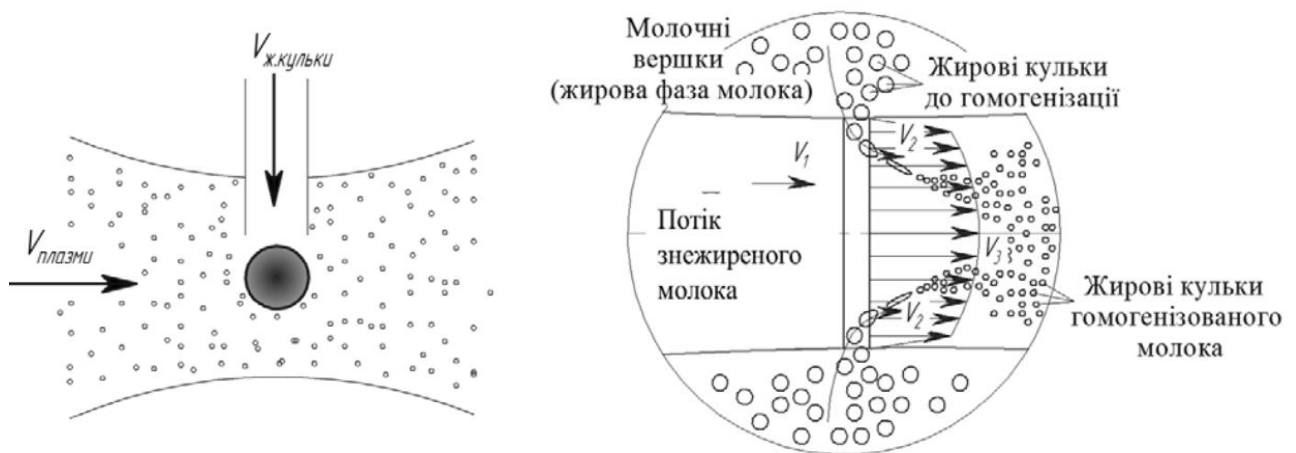


Рис. 2.2. Схема взаємодії частинок потоків у місці звуження.

Відповідно до запропонованої схеми руху потоків рідин із різною густиною (рис. 2.2) та відомих теоретичних викладів [19], для ефективного руйнування кульок молочного жиру необхідно забезпечити різницю швидкостей потоків. Причому, чим більша різниця швидкостей молока та вершків, тим більша швидкість проковзування, що сприяє збільшенню ступеня гомогенізації молока.

Для підвищення ефективності гомогенізації молока необхідно забезпечити підігрівання рідин до температури 55-60 °С. Така температура покращить умови текучості вершків при збереженні їх технологічних властивостей.

Те, що молоко зниженої жирності та вершки подаються окремо немає нічого дивного, оскільки на підприємствах з переробки молока процес сепарування та наступний процес з нормалізації є нормативними, що не вимагає спеціальних дій для цього. Перевагою запропонованого гомогенізатора є можливість отримання молока із нормалізованими за жирністю характеристиками, а окрема подача повинна зменшити витрати енергії під час здрібнення кульок молочного жиру. [20]

2.2. Встановлення конструкційно-технологічних параметрів розробленого гомогенізатора

Основними параметрами розробленого гомогенізатора, звичайно є його продуктивність відповідно до заданих режимів роботи. Схема конструкційного виконання розробленого гомогенізатора наведена на рис. 2.3

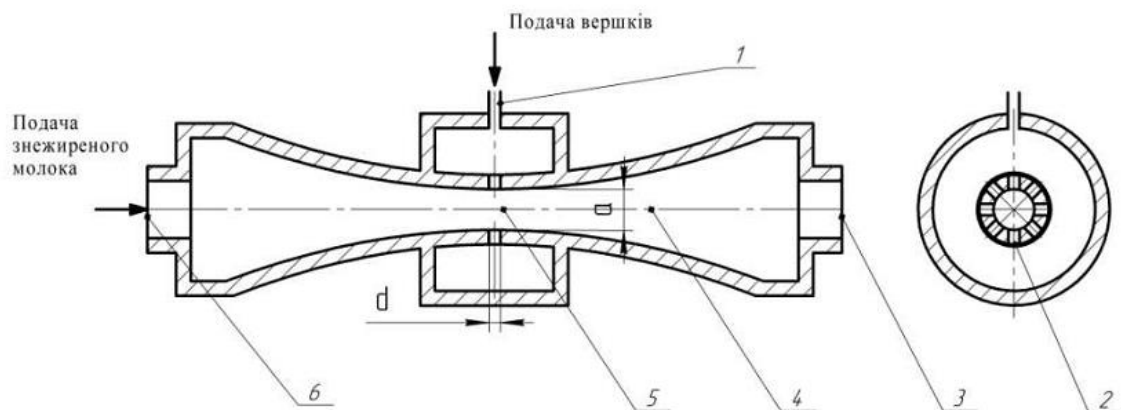


Рис. 2.3. Розрахункова конструкційна схема розробленого гомогенізатора:
1 – патрубок для вершків; 2 – отвір радіальний; 3 – патрубок готового продукту;
4 – вісь потоку; 5 – зона контакту потоків; 6 – патрубок для молока

Для визначення пропускної спроможності розробки скористаємося рівнянням:

$$Q_{2m} = Q_m + Q_{вр}, \quad (2.1)$$

де $Q_{зм}$ – пропускна спроможність гомогенізатора, м³/год;

Q_m – подача молока низької жирності, м³/год;

$Q_{вр}$ – подача жирних вершків, м³/год.

З врахуванням рівняння швидкості нестисненого середовища, а також рівняння нерозривності потоку [11, 16, 19] отримаємо залежність для визначення інтенсивності подачі молока:

$$Q_m = 3600 \cdot \mu_m \cdot S_m \cdot \rho_m \cdot \sqrt{\frac{2}{\rho_m} \cdot p_m}, \quad (2.2)$$

де S_m – площа потоку молока у звуженні, м²;

μ_m – коефіцієнт, який враховує втрати тиску [19];

ρ_m – об'ємна густина молока, кг/м³;

p_m – тиск для подачі молока, Па.

Для визначення подачі кульок молочного жиру в потоці вершків, скористаємося залежністю, яка отримана виходячи із аналогічних до рівняння (2.2) та аналітичних передумов [11, 16, 19]:

$$Q_{вр} = 3600 \cdot \mu_{вр} \cdot S_{вр} \cdot \rho_{вр} \cdot \sqrt{\frac{2}{\rho_{вр}} \cdot p_{вр}}, \quad (2.3)$$

де $S_{вр}$ – площа отвору подачі вершків, м²;

$\mu_{вр}$ – коефіцієнт, який враховує втрати тиску в отворі для вершків [19];

$\rho_{вр}$ – об'ємна густина жирного молока, кг/м³;

$p_{вр}$ – тиск для подавання вершків, Па.

Розмір кульки молочного жиру після процесу гомогенізації визначається швидкісними характеристиками потоку молока та гідродинамічними критеріями при врахуванні втрат із-за конструкційних особливостей. Відповідно до наведеного, а також із врахуванням досліджень [7, 13, 19],

отримали аналітичне рівняння встановлення розміру кульки молочного жиру ($d_{вк}$) після гомогенізації (рис. 2.4):

$$d_{вк} = \frac{k_w \cdot \sigma_n \cdot \zeta^2 \cdot S_m^2}{2 \cdot \rho_m \cdot k_{вр}^2 \cdot Q_m^2}, \quad (2.4)$$

де k_w – критерій гідродинамічного процесу затопленого струменя, приймається в межах 85-100 [19];

$k_{вр}$ – коефіцієнт, який враховує конструкційно-геометричні параметри процесу подачі вершків (діаметр каналу, швидкість подачі і т.д.) [19];

σ_n – пружність поверхневого натягу кульки молочного жиру;

ζ – коефіцієнт звуження потоку молока [19].

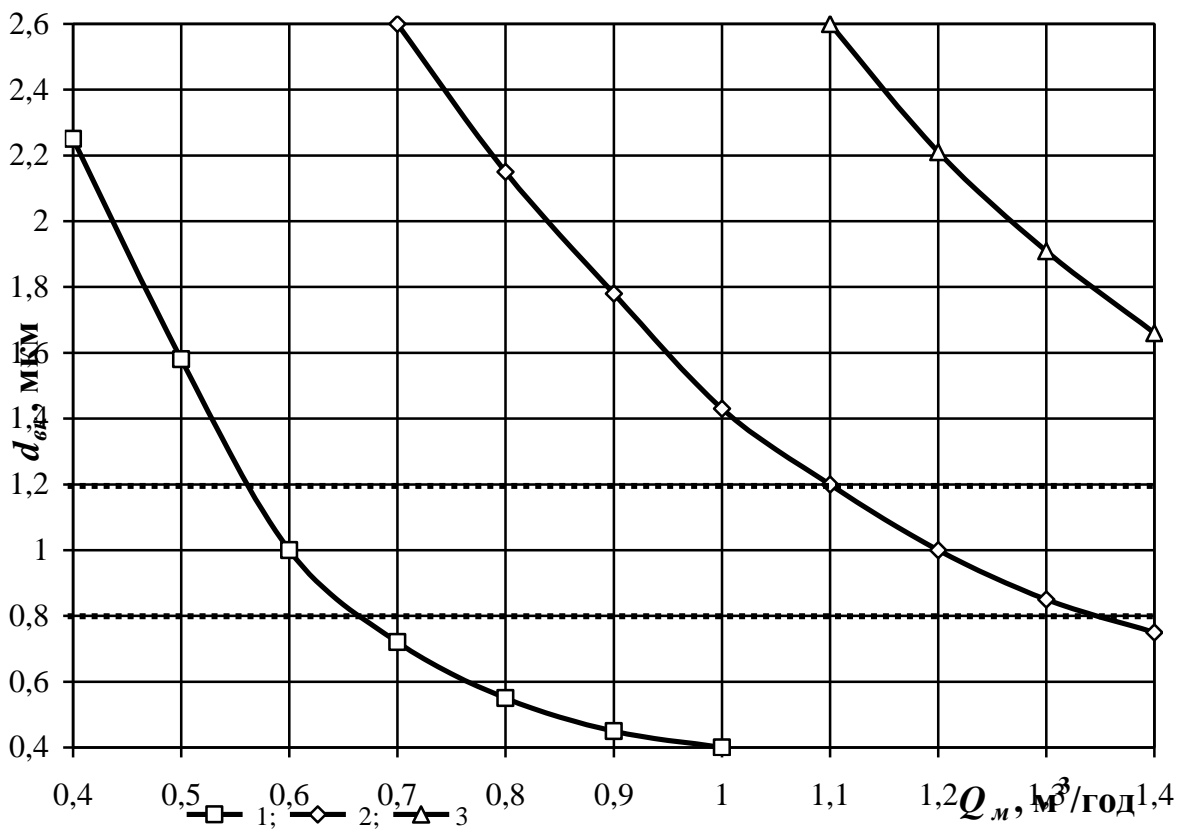


Рис. 2.4. Залежність розміру кульки молочного жиру ($d_{вк}$) від інтенсивності потоку молока (Q_m) та площі поперечного перерізу каналу (S_m) у місці зустрічі потоків: 1 – 3 мм²; 2 – 6 мм²; 3 – 9 мм².

Відповідно до графічних залежностей (рис. 2.4), розмір кульки молочного жиру зменшується при збільшенні інтенсивності потоку молока не залежно від

розміру каналу у найвужчому місці. Це підтверджує припущення, що зі збільшенням інтенсивності потоку молока розмір кульок молочного жиру має зменшуватись.

Вища ступінь зменшення розмірів кульок спостерігається при найменшому розмірі площі поперечника каналу в 3 мм^2 . Так при збільшенні інтенсивності потоку молока від $0,4$ до $1,0 \text{ м}^3/\text{год}$ (приріст $0,6 \text{ м}^3/\text{год}$) розмір кульок зменшується від $2,25$ до $0,4 \text{ мкм}$, тобто на $1,85 \text{ мкм}$. За умови площі поперечника каналу в 6 мм^2 спостерігається більш полого зменшення розміру кульок при зростанні інтенсивності потоку молока від $0,7$ до $1,4 \text{ м}^3/\text{год}$ (приріст $0,7 \text{ м}^3/\text{год}$). Це можна пояснити справедливою дією закону неперервності потоку. Бажаний діапазон розміру молочних кульок жиру $0,8$ - $1,2 \text{ мкм}$ можна отримати при інтенсивності потоку молока в межах $0,56$ - $0,67 \text{ м}^3/\text{год}$ при $S_m=3 \text{ мм}^2$, та в межах $1,1$ - $1,35 \text{ м}^3/\text{год}$ при $S_m=6 \text{ мм}^2$. За умови розміру площі перерізу в 9 мм^2 отримати бажаний розмір кульок молочного жиру неможливо.

Вплив форми каналу на розмір кульок молочного жиру подано на рис. 2.5.

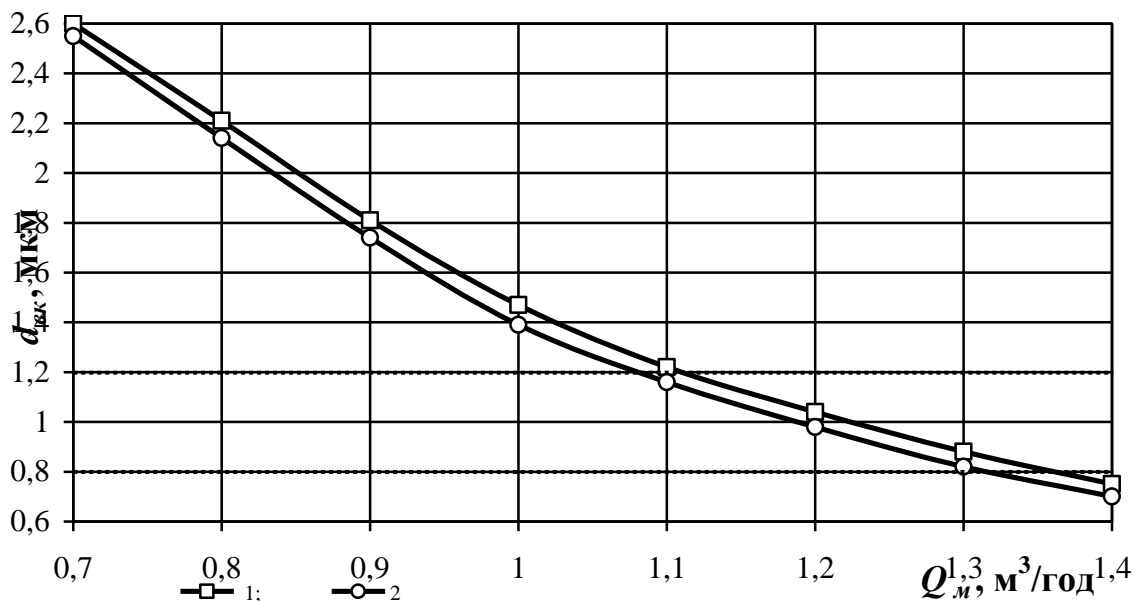


Рис. 2.5. Залежність розміру кульки молочного жиру ($d_{жк}$) від інтенсивності потоку молока (Q_m) та форми поперечного перерізу каналу у місці зустрічі потоків: 1 – прямокутний; 2 – круглий.

Оцінка графічних залежностей на рис. 2.5 вказує, що форма каналу не має впливу на формування розміру кульок молочного жиру при зміні інтенсивності потоку молока. З конструкційної точки зору обирається форма найбільш зручна у виготовленні та подальшому використанні. Це стосується технічного обслуговування, контролю параметрів та очищення.

Діапазон зміни інтенсивності потоку молока обрано для площі поперечного перерізу каналу $S_m=6 \text{ мм}^2$, а розмір отвору для вершків $d_{ep}=0,8 \text{ мм}$. Це пояснюється можливістю отримати вищу продуктивність спроектованого гомогенізатора при бажаному розмірі кульок молочного жиру.

На основі рівнянь (2.1-2.4) можна визначити геометричні параметри системи подачі молока та вершків у струменевому гомогенізаторі. Відповідно до сказаного, параметр каналу (d_m) подачі молока у найвужчому місці визначається за аналітичною залежністю:

$$d_m = \sqrt{\frac{Q_{zm} \cdot (B_{ep} - B_{nm})}{900 \cdot \mu_m \cdot \pi \cdot \rho_m \cdot (B_{ep} - B_m)}} \sqrt{\frac{\rho_m}{2 \cdot p_m}}, \quad (2.5)$$

де d_m – діаметр каналу потоку молока, м;

Q_{zm} – пропускна спроможність запропонованого гомогенізатора, м³/год;

B_{ep} – вершки заданої жирності, %;

B_{nm} – жирність продукту на виході із гомогенізатора, %;

B_m – жирність молока на вході у гомогенізатор, %;

Діаметр отвору для вершків, визначається з врахуванням необхідного потоку для задоволення бажаної продуктивності розробки:

$$d_{ep} = \sqrt{\frac{Q_{zm} \cdot (B_{nm} - B_m)}{900 \cdot \mu_{ep} \cdot \pi \cdot \rho_{ep} \cdot (B_{ep} - B_{nm})}} \sqrt{\frac{\rho_{ep}}{2 \cdot p_{ep}}}, \quad (2.6)$$

де d_{ep} – діаметр отвору потоку вершків, м;

Для визначення інтенсивності потоку молока зниженої жирності та потоку вершків можна скористатись аналітичними залежностями, які враховують їх технологічні властивості:

$$Q_{вр} = \frac{Q_{зм} \cdot (B_{нм} - B_{м})}{(B_{вр} - B_{нм})},$$

$$Q_{м} = \frac{Q_{зм} \cdot (B_{вр} - B_{нм})}{(B_{вр} - B_{м})},$$
(2.7)

За умови отримання готового продукту із бажаною жирністю $B_{нм}=2,5\%$ необхідно дотримуватись співвідношення $Q_{м}=932,2$ м³/год, $Q_{вр}=67,8$ м³/год, при $B_{м}=0,5\%$, а $B_{вр}=30\%$.

Для проведення досліджень використали дослідну установку схема дослідження та загальний вигляд якої подано на рис. 2.6-2.7.

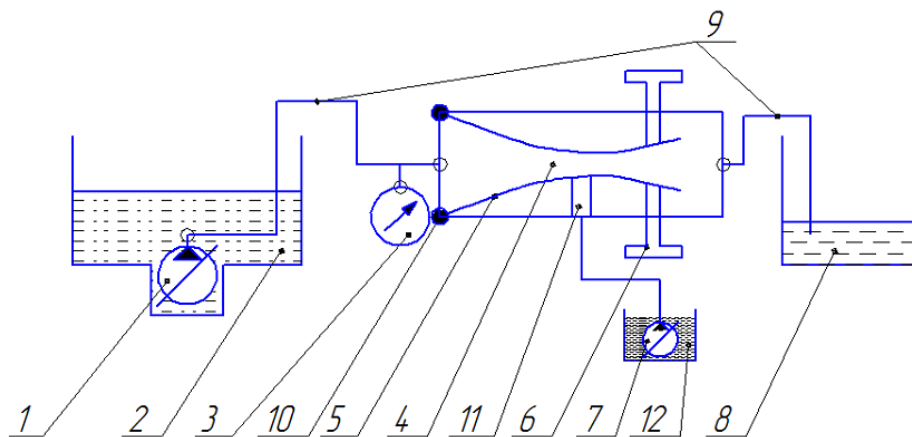


Рис. 2.6. Схема складових дослідження запропонованого гомогенізатора:
 1 – гідронасос для молока; 2 – молочна місткість; 3 – вимірювач тиску; 4 – звужений канал; 5 – стінки канала; 6 – механізм регулювальний; 7 – гідронасос вершків; 8 – місткість суміші молока і вершків; 9 – гідропроводи; 10 – кріплення стінок канала; 11 – отвір для вершків; 12 – місткість вершків

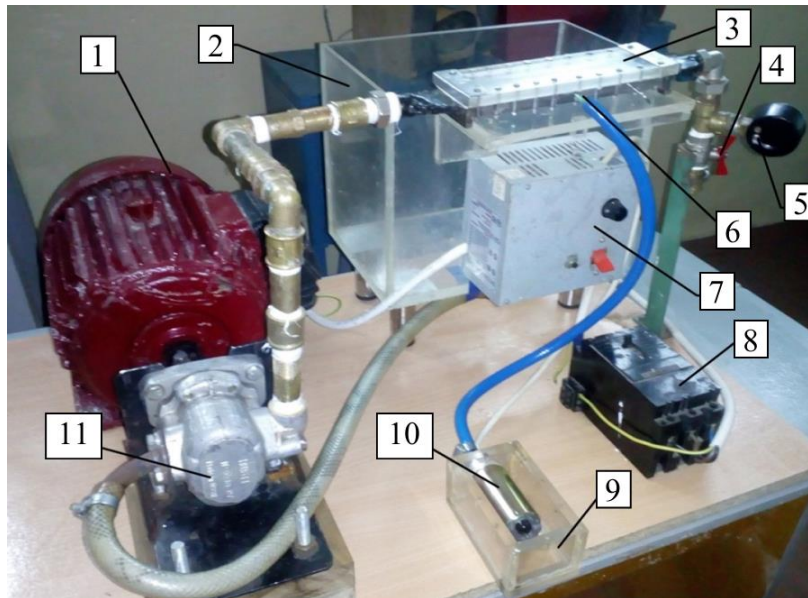


Рис. 2.7. Загальний вигляд складових дослідної установки: 1 – двигун приводу; 2 – молочна місткість; 3 – запропонований гомогенізатор; 4 – регулятор потоку; 5 – вимірювач тиску; 6 – отвір верхків; 7 – пульт керування; 8 – автомат електричний; 9 – місткість верхків; 10 – гідронасос верхків (тип роторний); 11 – гідронасос молока (тип НШ).

Під час проведення досліджень змінювали подачу молока зниженої жирності (0,5 %) та подачу верхків (30 %). Для покращення процесу виконували процес за температури яка регламентована технологією гомогенізації при використанні клапанних гомогенізаторів. Окрім зміни інтенсивності потоків виконували змінні регулювання розмірів отвору для надходження верхків та розмірів зони зустрічі двох середовищ.

Результати обробки отриманих дослідних даних викладені та подані для доступній формі у наступному розділі.

2.3. Висновки до розділу 2

1. Розроблена конструкція гомогенізатора молока особливістю якого є використання потоків двох різних за властивостями середовищ які

зустрічаються у місці із найменшою площею поперечного перерізу каналу. Таким чином, два потоки різні за густиною зустрічаються у точці найбільшої швидкості. Руйнування кульок молочного жиру відбувається за рахунок різниці швидкостей потоку вершків, які подаються перпендикулярно до поздовжньої осі гомогенізатора, та потоку молока зниженої жирності.

2. Отримане аналітичне рівняння визначення розміру кульок молочного жиру після процесу гомогенізації. Встановлено, що розмір кульки молочного жиру залежить від інтенсивності потоку молока та площі поперечного перерізу каналу у найвужчому місці. Так, за умови площі поперечника каналу в 6 мм^2 можна отримати максимальну продуктивність розробленого гомогенізатора молока при бажаному діапазоні розмірів молочних кульок жиру $0,8-1,2 \text{ мкм}$.

3. Форма каналу не має суттєвого впливу на розмір кульок молочного жиру. З конструкційної точки зору обирається форма найбільш зручна у виготовленні та подальшому використанні.

РОЗДІЛ 3

ДОСЛІДЖЕННЯ ГЕОМЕТРИЧНИХ ТА ТЕХНОЛОГІЧНИХ ПАРАМЕТРІВ РОЗРОБЛЕНОГО СТРУМЕНЕВОГО ГОМОГЕНІЗАТОРА МОЛОКА

3.1. Встановлення впливу параметрів гомогенізатора на розмір кульок молочного жиру

Теоретичні дослідження дозволили встановити, що на кінцевий розмір кульок молочного жиру впливають як геометричні параметри найвужчого перерізу розробленого гомогенізатора, так і режими потоку молока та вершків. В процесі досліджень отримані дослідні дані на основі яких побудовані графічні залежності (рис. 3.1).

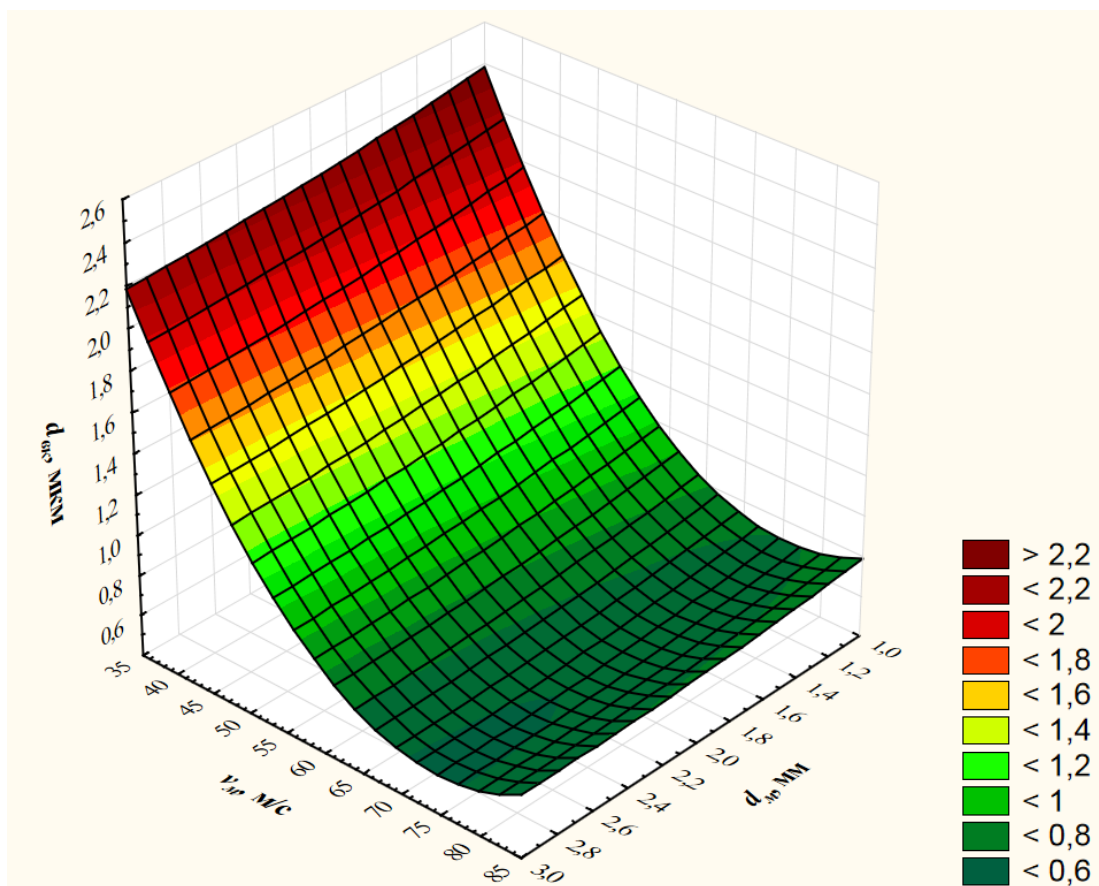


Рис. 3.1. Залежність діаметра кульок молочного жиру ($d_{жк}$) гомогенізованого молока від швидкості потоку молока (v_m) та діаметра найвужчого проходу (d_m) у зоні потоку вершків

Відповідно до отриманої поверхні відгуку (рис. 3.1) встановлено, що зі збільшенням швидкості потоку молока зниженої жирності зменшується розмір кульок молочного жиру. При використанні більшого діаметра прохідного отвору $d_m=3$ мм у найвужчому місці спостерігається покращення інтенсивності гомогенізації. При використанні менших параметрів прохідного перерізу виникає надмірна турбуленція, що погіршує процес гомогенізації. Оптимальними є швидкості потоку молока в межах 60-65 м/с для діапазону розміру кульок $d_{вк}=0,8-1$ мкм.

Отримане рівняння регресії яке пов'язує швидкісні параметри потоку молока із кінцевим розміром кульок молочного жиру після гомогенізації:

$$d_{вк} = 6,807 - 0,247 \cdot v_m - 0,1574 \cdot d_m + 0,0267 \cdot v_m^2 + 0,0011 \cdot v_m \cdot d_m + 0,001 \cdot d_m^2, \quad (3.1)$$

Вплив розміру каналу (d_{ep}) для потоку вершків на процес гомогенізації подано на рис. 3.2.

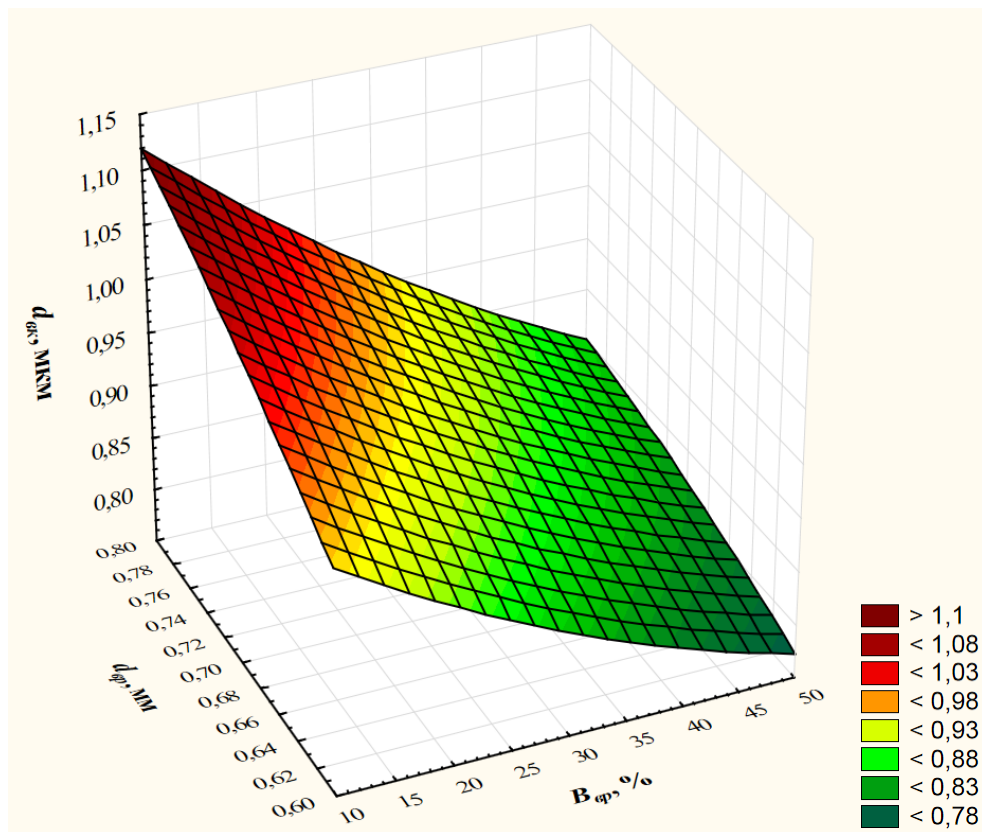


Рис. 3.2. Залежність діаметра кульок молочного жиру ($d_{вк}$) гомогенізованого молока від потоку вершків жирністю ($B_{вп}$) через отвір діаметром (d_{ep})

Відповідно до графічних залежностей на рис. 3.2, меншому діаметру отвору для потоку вершків відповідає менший діаметр отриманих кульок молочного жиру після гомогенізації. Але для забезпечення безтурбулентного потоку вершків із оптимальною швидкістю 80 м/с, діаметр отвору у конструкції розробленого гомогенізатора повинен становити 0,8-1 мм. З врахуванням того, що для вершків жирність яких перевищує 30-40 % інтенсивність зменшення розміру кульок молочного жиру знижується, не доцільно використовувати для сумішоутворення вершки більшої жирності.

Отримане рівняння регресії, яке пов'язує геометричні та технологічні параметри потоку вершків із розміром кульок молочного жиру після гомогенізації:

$$d_{ек} = 0,095 - 0,0012 \cdot B_{ер} + 2,035 \cdot d_{ер} + 0,00004 \cdot B_{ер}^2 - 0,015 \cdot B_{ер} \cdot d_{ер} - 0,8 \cdot d_{ер}^2, \quad (3.2)$$

де $B_{ер}$ – вершки заданої жирності, %;

$d_{ер}$ – діаметр отвору потоку вершків, мм.

Дослідження впливу на розмір кульок молочного жиру вершків різної жирності від 10 до 40 % та швидкості потоку вершків у місці зустрічі із потоком молока вказали на відсутність характерного взаємозв'язку. Тому, як раціональний параметр для розробленого гомогенізатора обираються вершки жирністю 30-40 %.

3.2. Встановлення витрат потужності для функціонування розробленого гомогенізатора молока

Для функціонування розробленого гомогенізатора молока необхідно забезпечити окремо потоки молока зниженої жирності та вершків. З цією метою використовують два насоси із необхідними характеристиками, тому витрати потужності є сумою потужності електродвигунів приводу гідронасосів.

За результатами проведених досліджень отримали рівняння регресії та поверхню відгуку (рис. 3.3).

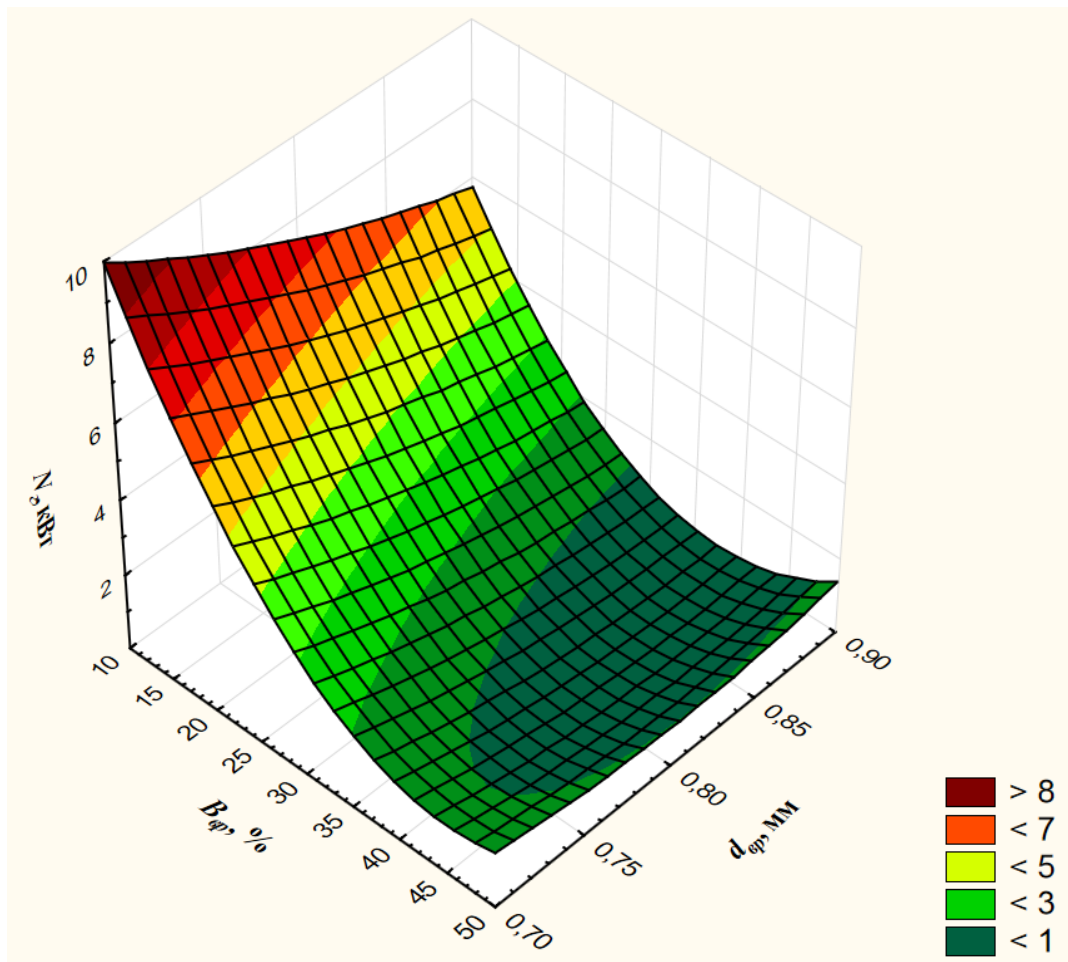


Рис. 3.3. Залежність потужності (N_z) на привод насосів гомогенізатора молока від потоку вершків жирністю ($B_{вр}$) через отвір діаметром ($d_{вр}$)

Аналіз поверхні відгуку на рис. 3.3 вказує на суттєве зниження потужності гомогенізатора зі збільшенням жирності потоку вершків з одночасним збільшенням діаметра отвору для вершків. Витрати потужності стабілізуються в діапазоні жирності для вершків 30-40 %, тому використання вершків вищої жирності не впливатимуть на зниження потужності гомогенізації.

Так, при діаметрі отвору 0,7 мм в діапазоні вершків із жирністю 30-40 % потужність на функціонування гомогенізатора знижується від 2,7 до 1,8 кВт, а

за умови використання діаметра отвору 0,9 мм потужність знижується від 1,1 до 0,95 кВт. Таким чином, потужності функціонування при використанні отвору для потоку вершків із діаметром 0,9 мм знижується в 1,9-2,5 рази порівняно із використанням отвору із діаметром 0,7 мм.

Дослідження проводились за умови отримання кульок молочного жиру із середнім розміром 0,8 мкм. При цьому молоко зниженої жирності подавалось із швидкістю 60-65 м/с (тиск в каналі 1,2-2,0 МПа), а вершки – 80 м/с (тиск в отворі 2,0-2,5 МПа).

Дослідні дані отримані при встановленій продуктивності розробленого струменевого гомогенізатора 1 м³/год при отриманні готового гомогенізованого молока із жирністю 3,5 %. За умови збільшення продуктивності розробленого гомогенізатора буде зростати потужність на привод насосів для молока та вершків. Але питома потужність на рівні мінімального значення (0,95 кВт) буде залишатися незмінною, як і у гомогенізатора меншої продуктивності (табл. 3.1).

$$N_z = 59,43 - 0,99 \cdot B_{ep} - 90,925 \cdot d_{ep} + 0,0071 \cdot B_{ep}^2 + 0,512 \cdot B_{ep} \cdot d_{ep} + 40,5 \cdot d_{ep}^2, \quad (3.3)$$

де B_{ep} – вершки заданої жирності, %;

d_{ep} – діаметр отвору потоку вершків, мм.

Таблиця 3.1. Характеристики розробленого гомогенізатора

Пропускна спроможність Q_{zm} , м ³ /год	Діаметр потоку молока, d_m , мм	Діаметр отвору для вершків, d_{ep} , мм	Кількість отворів, n_{ep} , шт	Потужність приводу насосів, кВт	Питома потужність, кВт×год/ м ³
1	2,2	1,4	2	0,95	0,95
2,5	3,6	2,2	2	2,4	0,95
5	5,0	3,0	2	4,8	0,95
10	4,4	2,8	2	9,5	0,95

Для порівняльної оцінки використали серійний клапанний гомогенізатор типу К5 із аналогічним ступенем гомогенізації. За рахунок значно менших витрат енергії на одиницю отриманого продукту, $0,95 \text{ кВт} \times \text{год} / \text{м}^3$ порівняно із $7,3 \text{ кВт} \times \text{год} / \text{м}^3$, можна отримати економічний ефект в розмірі 42,17 грн/м³.

3.3. Висновки до розділу 3

1. Встановлено, що при використанні діаметра прохідного отвору $d_m=3$ мм у найвужчому місці зустрічі потоків зростає інтенсивність гомогенізації, менші параметри прохідного перерізу сприяють надмірній турбулентності, що погіршує процес гомогенізації. Доведено, що оптимальною є швидкість потоку молока в межах 60-65 м/с для діапазону розміру кульок молочного жиру $d_{вк}=0,8-1$ мкм.

2. Встановлено, що безтурбулентний потік вершків буде при швидкості 80 м/с та діаметрі отвору в діапазоні 0,8-1 мм. При цьому жирність вершків не повинна перевищувати 30-40 % із-за сповільнення інтенсивності дроблення кульок молочного жиру. Отримане рівняння регресії, яке пов'язує геометричні та технологічні параметри потоку вершків із розміром кульок молочного жиру після гомогенізації.

3. Встановлено, що потужність гомогенізатора суттєво знижується зі збільшенням жирності потоку вершків з одночасним збільшенням діаметра отвору для вершків. Витрати потужності стабілізуються в діапазоні жирності для вершків 30-40 %, тому використання вершків вищої жирності не впливатимуть на зниження потужності гомогенізації. Доведено, що потужність функціонування розробленого гомогенізатора знижується в 1,9-2,5 рази за умови використання отвору для потоку вершків із діаметром 0,9 мм, порівняно із використанням отвору із діаметром 0,7 мм.

ВИСНОВКИ

1. Гомогенізатори молока клапанного типу отримали найбільше поширення оскільки характеризуються високим ступенем гомогенізації та забезпечують здрібнення кульок молочного жиру до розміру 0,8-1 мкм. До недоліків відносять високу питому витрату енергії на отримання одиниці готової продукції, чутливість до якості очищення молока та необхідність належного технічного обслуговування. Виконана оцінка вакуумних, відцентрових та ультразвукових гомогенізаторів молока вказує на низький ступінь гомогенізації та неможливість отримання кульок молочного жиру розміром меншим від 2,5 мкм. Одним із шляхів зниження витрат енергії при гомогенізації є використання струменевого принципу гомогенізації. Проте відомі конструкційні рішення струменевих гомогенізаторів мають ряд недоліків, а саме, значне спінювання молока під час гомогенізації.

2. Розроблена конструкція гомогенізатора молока особливістю якого є використання потоків двох різних за властивостями середовищ які зустрічаються у місці із найменшою площею поперечного перерізу каналу. Завдяки зустрічі двох перехресних потоків молока зниженої жирності та вершків у точці найбільшої швидкості відбувається інтенсивне здрібнення кульок молочного жиру. Руйнування кульок молочного жиру відбувається за рахунок різниці швидкостей потоку вершків та потоку молока зниженої жирності.

3. Отримане аналітичне рівняння визначення розміру кульок молочного жиру після процесу гомогенізації. Встановлено, що розмір кульки молочного жиру залежить від інтенсивності потоку молока та площі поперечного перерізу каналу у найвужчому місці. Так, за умови площі поперечника каналу в 6 мм² можна отримати максимальну продуктивність розробленого гомогенізатора молока (1,1-1,3 м³/год) при бажаному діапазоні розмірів кульок молочного жиру 0,8-1,2 мкм. Доведено, що форма каналу не має суттєвого впливу на

розмір кульок молочного жиру. З конструкційної точки зору обирається форма найбільш зручна у виготовленні та подальшому використанні – циліндрична.

4. Отримане рівняння регресії яке пов'язує швидкісні параметри потоку молока із кінцевим розміром кульок молочного жиру після гомогенізації. Встановлено, що оптимальною є швидкості потоку молока в межах 60-65 м/с для діапазону розміру кульок $d_{ск}=0,8-1$ мкм.

5. Отримане рівняння регресії, яке пов'язує геометричні та технологічні параметри потоку вершків із розміром кульок молочного жиру після гомогенізації. Встановлено, що безтурбулентний потік вершків буде при швидкості 80 м/с та діаметрі отвору в діапазоні 0,8-1 мм. При цьому жирність вершків не повинна перевищувати 30-40 %.

6. Встановлено, що витрати потужності розробленого гомогенізатора стабілізуються в діапазоні жирності для вершків 30-40 %. Доведено, що потужність функціонування розробленого гомогенізатора знижується в 1,9-2,5 рази за умови використання отвору для потоку вершків із діаметром 0,9 мм, порівняно із використанням отвору із діаметром 0,7 мм. При цьому молоко зниженої жирності подавалось із швидкістю 60-65 м/с, а вершки – 80 м/с.

7. Порівняльна оцінка розробленого струменевого гомогенізатора із серійним клапанним гомогенізатором типу К5 вказала на значно менші витрати енергії на одиницю отриманого продукту, $0,95$ кВт×год/м³ порівняно із $7,3$ кВт×год/м³. Завдяки економії енергоресурсів та меншій вартості розробки можна отримати річний економічний ефект в розмірі 42,17 грн/м³.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Молочні продукти. *Вікіпедія* : веб-сайт. URL : uk.wikipedia.org/wiki/Молочні_продукти
2. Машкин М. І., Париша Н. М. Технологія молока і молочних продуктів: навч. видання. К.: Вища освіта, 2006. 351 с.
3. Росоха В. В., Петриченко О. А. Розвиток ринку молока та молокопродукції в Україні. *Економіка АПК*. 2018. № 8. С. 43–54.
4. Стан продовольчого забезпечення України під час війни. *Національний інститут стратегічних досліджень* : веб-сайт. URL : <https://niss.gov.ua/news/komentari-ekspertiv/stan-prodovolchoho-zabezpechennya-ukrayiny-pid-chas-viynu>
5. Хомик Н. І., Олекюк В.П., Цьон О. П. Механізація переробки та зберігання сільськогосподарської продукції : курс лекцій. Тернопіль: ФОП Паляниця В. А., 2016. 288 с.
6. Червко О. І., Попречний А. М. Процеси і апарати харчових виробництв : підручник. Х.: Світ Книг, 2014. 495 с.
7. Мікульонок І. О. Механічні, гідромеханічні і масообмінні процеси та обладнання хімічної технології : підруч. К.: НТУУ «КПІ», 2014. 340 с.
8. Богомолова О. В. Технологія переробки продукції тваринництва; за ред. О. В. Богомолова та Ф. В. Перцевого. Харків: Вид-во навч.-метод. центру заочн. навч. с.-г. вузів України, 2001. 241 с.
9. Бернік П. С. Механічні процеси і обладнання переробного та харчового виробництва. / П. С. Бернік та ін. Львів : Львівська політехніка, 2004. 336 с.
10. Харчові технології у прикладах і задачах: підручник / Л. Л. Товажнянський. К.: Центр учбової літератури, 2008. 576 с.
11. Розрахунки обладнання харчових виробництв. / Ялпачик В. Ф та ін. Мелітопіль: ТДАУ, 2014. 188 с.

12. Іващук О. В. Аналіз способів гомогенізації молока. *Студентські читання–2023* : матеріали науково-практичної конференції. 25 жовтня 2023 р. Житомир: Поліський національний університет, 2023. С. 170–173.

13. Єресько Г. О., Шинкарик М. М., Ворщук В. Я. Технологічне обладнання молочних виробництв: навч. посіб. Київ: фірма «Інкос», 2007. 344 с.

14. Гомогенізатор FBF-037: веб-сайт. URL : <http://silence.ua/gomogenizator-fbf-037.html>.

15. Обладнання підприємств переробної і харчової промисловості: підруч./ І. С. Гулий та ін.; за ред. І. С. Гулого. Вінниця: Нова книга, 2001. 576 с.

16. Розрахунки обладнання підприємств переробної і харчової промисловості: навч. посіб. / В. Г. Мирончук та ін. ; за ред. В. Г. Мирончук. Вінниця: Нова книга, 2004. 288 с.

17. Гомогенізатор вакуумний VMG : веб-сайт. URL : https://foodtechprocess.com/ru/gomogeniziruyusshee-oborudovanie/97-50752-vakuumnyj-gomogenizator-vmg-s.html#/419-obem_rabochij_do_1-520_1

18. Медведський О. В., Іващук О. В. Оцінка шляхів реалізації потенціалу способів отримання гомогенізованого молока. *Інженерні процеси та системи* : матеріали I Міжнародної науково-практичної конференції здобувачів вищої освіти та молодих вчених. 14-15 червня 2023 р. Житомир: Поліський національний університет, 2023. С. 99–102.

19. Бойко А. В. Гідро та газодинаміка : підручник. Х. : НТУ «ХП», 2007. 444 с.

20. Медведський О. В., Іващук О. В. Дослідження конструкційно-технологічної схеми струменевого гомогенізатора молока. *Біоенергетичні системи* : матеріали VII Міжнародної науково-практичної конференції. 15-17 листопада 2023 р. Житомир: Поліський національний університет, 2023. С. 94–95.