ТАВРІЙСЬКИЙ ДЕРЖАВНИЙ АГРОТЕХНОЛОГІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ ІМЕНІ ДМИТРА МОТОРНОГО

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ

Кваліфікаційна наукова

праця на правах рукопису

КОВАЛЬОВ ОЛЕКСАНДР ОЛЕКСАНДРОВИЧ

УДК 637.134

ДИСЕРТАЦІЯ

ОБГРУНТУВАННЯ ПАРАМЕТРІВ СТРУМИННО-ЩІЛИННОГО ГОМОГЕНІЗАТОРА МОЛОКА З РОЗДІЛЬНОЮ ПОДАЧЕЮ ВЕРШКІВ

05.05.11 – машини і засоби механізації сільськогосподарського виробництва

Подається на здобуття наукового ступеня кандидата технічних наук

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

_____ О.О. Ковальов

Ідентичність усіх примірників дисертації
ЗАСВІДЧУЮ
Учений секретар спеціалізованої вченої ради

_____О. Ю. Вовк

Науковий керівник – **Самойчук Кирило Олегович**

доктор технічних наук, професор

Мелітополь – 2021

АНОТАЦІЯ

Ковальов О.О. Обґрунтування параметрів струминно-щілинного гомогенізатора молока з роздільною подачею вершків. – Кваліфікаційна наукова праця на правах рукопису.

Дисертація на здобуття наукового ступеня кандидата технічних наук (доктора філософії) за спеціальністю 05.05.11 «Машини і засоби механізації сільськогосподарського виробництва». – Таврійський державний агротехнологічний університет імені Дмитра Моторного Міністерства освіти і науки України, Мелітополь, 2021.

Гомогенізація молока відноситься до нормативних операцій технологічних процесів виробництва питного молока, кисломолочних продуктів і напоїв, йогуртів, сумішей для виробництва морозива тощо. За виключенням стерилізації й пастеризації цей процес є найбільш енерговитратним. Відсоткова частка гомогенізації серед загальних витрат електроенергії молокопереробних підприємств сягає 25–35%, а питомі енерговитрати найбільш поширених у промисловості клапанних гомогенізаторів перевищують 6–7 кВт·год/т. Отже зниження енерговитрат на гомогенізацію при забезпеченні високого ступеня диспергування молочного жиру є актуальною проблемою галузі. Для її вирішення була розроблена значна кількість принципово різних конструктивних рішень гомогенізаторів, яким так і вдалося замінити клапанні. Тому існує народногосподарська проблема, яка полягає у високих енерговитратах процесу гомогенізації молока як сировини молочної промисловості. Для її вирішення необхідно розв’язати науково-технічну проблему, яка полягає в недостатньому теоретичному обґрунтуванні гідродинамічних умов диспергування жирової фази молока в гомогенізаторах.

Згідно останніх досліджень таких вчених як Барановський Н.В., Вайткус В.В., Грановський В.Я., Нужин Є.В., Орешина М.М., Самойчук К.О., Фіалкова Є.О., Bylund G., Innings F., Walstra P. та іншими основний гідродинамічний критерій руйнування жирових кульок молока визначається числом Вебера. Його значення підвищується при збільшенні швидкості руху жирової кульки відносно плазми

молока (швидкості ковзання жирової кульки). Найбільшу швидкість ковзання можливо досягти при використанні струминних гомогенізаторів, з яких найбільший потенціал збільшення енергоефективності має струминно-щілинний гомогенізатор молока з роздільною подачею вершків.

Отже робота присвячена практично важливій для галузі переробки молока задачі – зниженню енергоємності процесу гомогенізації при збереженні високих показників якості процесу. Вирішення цієї задачі ґрунтується на науковій гіпотезі, яка полягає в зниженні енерговитрат гомогенізації молока за рахунок подачі струменя вершків у потік знежиреного молока крізь вузьку кільцеву щілину. Таким чином робота з обґрунтування параметрів струминно-щілинного гомогенізатора молока з роздільною подачею вершків відрізняється високою актуальністю.

Наведено узагальнені дані про фізико–механічні та дисперсні характеристики молочної емульсії як об’єкту для проведення гомогенізації. проведено. аналіз літературних джерел, результати якого дозволяють стверджувати про відсутність енергоефективних конструкцій, які здатні забезпечити зменшення середнього діаметра жирових кульок до технологічно обумовлених показників (0,75–0,80 мкм) при суттєвому зниженні питомих витрат енергії відносно показників клапанних гомогенізаторів. Результати аналізу дозволили виділити критерій Вебера в якості чинника, що відіграє визначальну роль в диспергуванні дисперсної фази молочної емульсії. Протягом останніх десятиріч було досліджено процес та запропоновано до впровадження кілька десятків різних конструкцій. Проведені аналітичні дослідження свідчать, що підвищення енергоефективності гомогенізації можливо досягти за рахунок створення максимальної різниці між швидкостями дисперсійної і дисперсної фаз. Такий принцип найкраще реалізується в гомогенізаторах струминного типу при забезпеченні роздільної подачі знежиреного молока та вершків. Серед них кавітаційний гідродинамічний гомогенізатор, мікрофлюідізатор, протитечійно–струминний та струминний гомогенізатор молока з роздільною подачею вершків. Однак перелічені конструкції мають недоліки, які полягають відповідно у високих значеннях, високих енерговитратах, підвищеному піноутворенні та високій швидкості облітерації каналів для подачі жирової фази. З

метою підвищення енергоефективності при отриманні продукту з середнім діаметром жирових кульок на рівні технологічно обумовлених значень та одночасному суттєвому зниженні енерговитрат необхідно проведення досліджень струминно-щілинного гомогенізатора молока з роздільною подачею вершків (СЩГРВ).

В результаті аналітичних досліджень сил та напружень, які діють на поверхню жирової кульки, основним фактором руйнування визначено силу опору, яка виникає за рахунок різниці швидкостей руху жирової кульки та потоку знежиреного молока. Визнано доцільним використовувати критерій Вебера як узагальнюючу змінну для розрахунку середнього діаметра жирових кульок при диспергуванні молока. Проведено аналіз сил та механізмів руйнування жирової кульки, результати якого дозволяють стверджувати, що визначальний вплив на жирову кульку мають сили Магнуса, Коріоліса, опору, інерції, та турбофореза, а вирішальну роль в процесі диспергування відіграють тангенційні напруження, які розтягують жирову кульку у напрямку потоку, та при перевищенні величини напружень над силами міжфазного натягу призводять до її руйнування.

Проведено моделювання процесу в програмному комплексі ANSYS, що дозволило встановити, що раціональним параметром надлишкового тиску подачі дисперсійної фази з точки зору створення критичного значення критерію Вебера є 12 МПа. Для збільшення різниці швидкостей фаз при одночасному зниженні робочого тиску диспергування внутрішній діаметр конфузору в місці найбільшого звуження в лабораторному зразку струминно–щілинного гомогенізатора молока має бути меншим за 4 мм, тобто довжина кільцевої щілини має бути меншою за $l_щ$ =12,5 мм. Отримані дані відносно раціонального значення ширини щілини, величина якої має складати близько 0,8 мм.

Знайдені математичні залежності для визначення середнього діаметра жирових кульок, потужності, продуктивності та питомих енерговитрат струминно–щілинного гомогенізатора з роздільною подачею вершків. Знайдені залежності, що дозволяють шляхом варіювання ширини кільцевої щілини, жирностей вихідного продукту та вершків і швидкостей подавання жиру та дисперсійної фази

здійснювати в розробленому пристрої кількісне регулювання вмісту жиру в гомогенізованому молоці, тобто проводити нормалізацію одночасно з диспергуванням.

Аналіз отриманих залежностей показав, що для отримання жирових кульок, середній діаметр яких після гомогенізації дорівнює 0,8 мкм питомі енерговитрати процесу складають:

– при $Ж_в$=40–50%, $Ж_{н.м}$=3,2–3,5%, h=0,5–0,6 мм, $l_щ$=8,7мм–8,9мм, питомі витрати енергії складають 0,95–0,97 кВт·год/т;

– робочий тиск подачі знежиреного молока при продуктивності 950–1050 кг/год коливається в межах 0,78–0,9 МПа;

– при енергетичних витратах 0,95–0,97 кВт·год/т, продуктивність СЩГРВ становить 950–1050 кг/год.

Аналітично визначені раціональні значення гідравлічних, технологічних та конструктивних параметрів струминно–щілинного гомогенізатора для досягнення середнього розміру жирових кульок на рівні 0,75–0,80 мкм та мінімальних питомих енерговитратах:

– проведена оптимізація форми внутрішньої поверхні конфузору в зоні подачі жирової фази свідчить про те, що найнижчі витрати енергії забезпечуються при використанні камери, з конічною формою внутрішньої поверхні;

– визначено, що підвищення ефективності струминно–щілинного гомогенізатора можна досягти зменшуючи подачу дисперсійної фази, збільшуючи внутрішній діаметр конфузору в місці найбільшого звуження, збільшуючи ширину кільцевої щілини для подачі вершків, при використанні камери, яка має конічну форму внутрішнього профілю конфузору, виготовленням молока з мінімально можливою жирністю готового виробу при проведенні нормалізації за жирністю.

Отримані дані свідчать, що для зниження енергетичних витрат при забезпеченні однакового середнього діаметра жирових кульок (0,8 мкм) необхідно використовувати камеру, довжина кільцевої щілини в якій змінюється в діапазоні 8,7–8,9мм, де енергетичні витрати мають точку екстремуму (мінімуму), при цьому продуктивність гомогенізатора буде коливатись в діапазоні 950–1050 л/год, а

енергетичні витрати будуть складати близько 0,95–0,97 кВт·год/т.

Розроблено програму проведення теоретичних та експериментальних досліджень, встановлено значущі фактори та межі їх коливання для струминно–щільового гомогенізатора молока. Так, швидкість знежиреного молока має коливатись в діапазоні 30–90 м/с, діаметр конфузора в місці найбільшого звуження має змінюватись в межах 2–4 мм, а ширина кільцевої щілини має складати від 0,1 мм до 0,9 мм. Для проведення експериментальних досліджень процесу гомогенізації молока було розроблено схему камери гомогенізації та виготовлено лабораторну установку струминно–щілинного гомогенізатора молока. Розроблено устаткування та методику визначення коефіцієнта витрат внутрішніх торцевих поверхонь конфузора та дифузора в місці подачі вершків для уточнення його значення при проведенні аналітичних досліджень.

Зроблено аналіз існуючих способів та обґрунтовано вибір раціонального методу визначення якості гомогенізації. Обґрунтовано доцільність використання цифрової камери, приєднаної до оптичного мікроскопа з подальшим визначенням середнього діаметру жирових кульок по мікрофотографіях за допомогою цифрової камери та програми Microsoft Visual Studio. Обґрунтовано вибір вимірювальних пристроїв, встановлені межі варіювання факторів. Визначено послідовність статистичного аналізу характеристик жирових кульок, перевірки на грубі похибки вимірювання, перевірки достовірності теоретичних залежностей. Результати вважаються достовірними при значенні коефіцієнта детермінації більше 0,95.

Проведені експериментальні дослідження підтверджують визначальну роль різниці швидкостей руху дисперсійної та дисперсної фаз в струминно–щілинному гомогенізаторі, що відбувається за критерієм Вебера, критичне значення якого для отримання жирових кульок з середнім діаметром після руйнування 0,75–0,80 мкм складає 29. Були знайдені емпіричні рівняння для визначення коефіцієнта СЩГРВ, що дали змогу стверджувати, що підвищення ефективності гомогенізатора необхідно досягати шляхом зменшення швидкості струменю, при одночасному збільшенні жирності жирової фази і ширини кільцевої щілини для подачі вершків.

Експериментальні дані потужностей насосів подачі жирової фази і

знежиреного молока перевищують розрахункові параметри на 7–15%. Це можна пояснити втратами тиску у патрубках та з'єднувальній арматурі струминно–щілинного гомогенізатора. В цілому, дані, одержані при проведенні експерименту добре узгоджуються з теоретичними залежностями, отриманими для струминно–щілинного гомогенізатора молока. Згідно результатів експериментальних досліджень, питне молоко з жирністю 3,5% та середнім розміром жирових кульок 0,8 мкм можливо отримати при ширині щілини, яка дорівнює 0,6–0,8 мм, швидкості потоку дисперсійної фази 60–90 м/с, використанні вершків жирністю 33–43%, які подаються зі швидкістю 7–11 м/с, при цьому питомі енергетичні витрати процесу гомогенізації не будуть перевищувати 0,88–0,92 кВт·год/т.

Проведено оцінку дисперсних характеристик молочної емульсії, отриманої після обробки в СЩГРВ. Коефіцієнт варіації 15%, а СЖК молочної емульсії 0,79 мкм, що нижче аналогічних показників для клапанного гомогенізатора А1-ОГ2М на 17 і 7 % відповідно. Це доводить високу якість молочної емульсії після обробки в дослідному гомогенізаторі.

На підставі аналітичних та експериментальних досліджень запропонована методика обчислення конструкційних, технологічних, гідравлічних і енергетичних параметрів роботи струминно–щілинного гомогенізатору молока. Розроблений промисловий зразок струминного гомогенізатора молока продуктивністю 1–10 т/год, що має встановлену потужність електродвигуна 8 кВт, дозволяє отримувати молочну емульсію з середнім діаметром жирових кульок 0,8 мкм і має питомі енерговитрати 0,74 кВт·год/т. Розроблена технічна документація передана до ПП ВКФ «Харчоналадка» (м. Мелітополь, Запорізької області).

Порівняльний аналіз найбільш поширених в молокопереробній промисловості і перспективних видів диспергаторів свідчить, що розроблений гомогенізатор забезпечує середній розмір жирових кульок згідно технологічно обумовлених вимог до якості питного молока при в 8–10 разів менших питомих енергетичних витратах процесу відносно клапанних гомогенізаторів молока.

Промисловий зразок струминно–щілинного гомогенізатору молока, був впроваджений на МЖК «Південний» (м. Мелітополь, Запорізької області) замість

клапанного гомогенізатора К5-ОГ2А-1.25. При переробленому об’ємі молока за період випробувань, що склав 1250 тон, отриманий прибуток склав 36750 грн, що дорівнює 29,40 грн/т гомогенізованої емульсії. Економічний ефект, який було досягнуто при заміні клапанної машини К5-ОГ2А-1.25 на струминно–щілинний гомогенізатор молока складає 238350тис. грн. за рік, що обумовлено зниженням експлуатаційних витрат на 40% і питомих витрат на 59%, при терміні окупності витрат, що не перевищує 0,36 роки.

На основі проведених теоретичних та експериментальних досліджень процесу гомогенізації жирової фази молока при струминно-щілинній гомогенізації з роздільною подачею вершків, яка базується на критерії Вебера:

Вперше:

– розроблено математичну модель гомогенізації молока в струминно-щілинному гомогенізаторі з роздільною подачею вершків (СЩГРВ), що дозволило визначити раціональні параметри процесу та підвищити енергоефективність диспергування.

Удосконалено:

– теорію гідродинамічного диспергування молочної емульсії, яка ґрунтується на кореляції відносної швидкості дисперсійної та дисперсної фаз і критерію Вебера за рахунок врахування параметрів впливу кільцевої щілини;

– математичну модель гомогенізації в СЩГРВ за рахунок одночасного проведення диспергування та нормалізації молочної емульсії за жирністю.

Визначено критичне значення критерія Вебера для гомогенізації молока в струминно-щілинному гомогенізаторі, який дає можливість прогнозувати показники якості струминної гомогенізації;

– встановлено раціональні технологічні, конструктивні, гідравлічні параметри СЩГРВ за умови високої енергоефективності і отримання дрібнодисперсної емульсії;

– розроблено методику розрахунку та промисловий зразок СЩГРВ, питомі енергетичні витрати якого в діапазоні продуктивності СЩГРВ 1–10 т/год складають 0,74 кВт·год/т;

– розроблено технічну документацію на виготовлення промислового зразку, яку передано до впровадження у ПП ВКФ «Харчоналадка» (акт від 26.04.2018р);

– здійснено впровадження макетного зразку до виробництва на МЖК «Південний» (акт від 29.05.2018р);

– результати наукових досліджень використовуються в навчальному процесі Таврійського державного агротехнологічного університету імені Дмитра Моторного (м. Мелітополь, Запорізька обл.) при викладанні дисципліни «Технологічне обладнання переробних і харчових виробництв», «Процеси і апарати харчових виробництв».

Ключові слова: молоко, щілинний гомогенізатор, струминна гомогенізація, диспергування жирової фази, руйнування жирових кульок роздільна подача вершків, середній діаметр жирової кульки.

СПИСОК ОПУБЛІКОВАНИХ ПРАЦЬ ЗА ТЕМОЮ ДИСЕРТАЦІЇ

Наукові праці, в яких опубліковані основні наукові результати дисертації

1. Самойчук К.О., Ковальов О.О. Розробка лабораторного зразка струминного гомогенізатору з роздільною подачею вершків. *Праці ТДАТУ*. Мелітополь. 2011. 77–84 с. *Особистий внесок*: здобувачем проведено аналіз недоліків існуючих конструкцій, розроблено конструктивну схему камери гомогенізатора.

2. Самойчук К.О., Ковальов О.О., Івженко А.О. Аналіз методів оцінювання якості гомогенізації молока. *Праці ТДАТУ*. Мелітополь. 2012. Вип.12. Т.4. С. 222–229. *Особистий внесок*: здобувачем проведено аналіз методів оцінювання якості гомогенізованого молока, запропоновано використовувати метод микрофотографування та обробляти результати у програмі Microsoft Visual Studio

3. Самойчук К.О., Ковальов О.О. Використання нормалізації у струминному гомогенізаторі молока з роздільною подачею вершків. *Праці ТДАТУ*. Мелітополь. 2014. Вип.14. Т.1. С. 37–45. *Особистий внесок*: здобувачем розроблені математичні залежності процесу нормалізації в гомогенізаторі.

4. Самойчук К.О., Ковальов О.О. Механізми диспергування жирових кульок в струминному гомогенізаторі молока. Наукові праці ОНАХТ. 2016. Т.80. Вип. 1. С. 103–107. Особистий внесок: здобувачем проведені аналітичні дослідження величин шляху змішування та дотичних напружень.

5. Леженкін О. М., Самойчук К.О., Ковальов О.О., Паляничка Н.О., Верхоланцева В.О. Визначення шляху змішування та дотичних напружень в струминному гомогенізаторі молока. *Вісник Українського відділення Міжнародної академії аграрної освіти* Херсон: ОЛДІ-ПЛЮС. 2017. Вип. 5. 129–142 с. *Особистий внесок*: здобувачем проведені аналітичні дослідження величин шляху змішування та дотичних напружень.

6. Kovalyov A., Samoichuk K., Palyanychka N., Verkholantseva V., Yanakov V. Experimental investigations of the parameters of the jet milk homogenizer with separate cream supply. Technology audit and production reserves. 2017. № 3/3 (35). pp 33–39. Особистий внесок: здобувачем здійснено планування та проведення експериментів, обробку статистичних даних та аналіз літературних джерел за темою.

7. Самойчук К.О., Ковальов О. О.,Лубко Д.В. Моделювання параметрів струминного гомогенізатора молока щілинного типу. Праці ТДАТУ. 2018. Вип 18, т. 2. С. 286–294. Особистий внесок: здобувачем обрано діапазон варіювання змінних факторів, проведене дослідження параметрів у обраних діапазонах та аналіз отриманих даних.

8. Самойчук К.О., Ковальов О.О., Борохов І. В., Паляничка Н.О. Аналітичні дослідження енергетичних показників і параметрів якості струминно-щільового гомогенізатора молока. Праці ТДАТУ. 2019. Вип.19. Т.1.С. 3–18. *Особистий внесок*: здобувачем проведені аналітичні дослідження, запропоновані залежності для обчислення середнього діаметра жирових кульок та енерговитрат гомогенізатора.

9. Самойчук К. О., Ковальов О. О., Колодій О. С., Сєрий І. О. Оптимізація експериментальних параметрів та визначення експериментального значення критерію Вебера струминно-щілинного гомогенізатора молока. Праці ТДАТУ. 2019. Вип.19. Т.3. С 78–85. *Особистий внесок*: здобувачем проведено оптимізацію параметрів, отриманих в ході проведення експериментальних досліджень.

10. Самойчук К.О., Ковальов О.О., Паляничка Н.О., Колодій О. С., Лебідь М. Р. Експериментальні дослідження параметрів струминного гомогенізатора молока з роздільною подачею вершків щільового типу. Праці ТДАТУ. 2019. Вип.19. Т.2. С 117 – 129. *Особистий внесок:* здобувачем обґрунтовано діапазон коливання змінних факторів, здійснено планування та реалізація експериментальних досліджень.

11. Самойчук К. О., Сєрий І. С., Ковальов О. О. Розробка промислового зразку та оцінка економічної ефективності впровадження струминно-щілинного гомогенізатора молока. Праці ТДАТУ. 2020. Вип.20. Т.1. С 15–25. *Особистий внесок*: здобувачем розроблено конструктивну схему промислового зразка СЩГРВ.

12. S. Kiurchev, K. Samoichuk, O. Kovalyov, R. Leshchij. Method of calculation of an industrial model of jet-slot milk homogenizer. TEKA. QUARTERLY JOURNAL OF AGRI-FOOD INDUSTRY – 2020, Vol. 19, No. 4, 23–30pp. Особистий внесок: здобувачем розроблено методику розрахунку параметрів промислового зразка гомогенізатора.

13. K. Samoichuk, A. Kovalyov, V. Oleksiienko, N. Palianychka, D. Dmytrevskyi, V. Chervonyi, D. Horielkov, I. Zolotukhina, A. Slashcheva. Elaboration of the research method for milk dispersion in the jet slot type homogenizer. EUREKA: Life Sciences». 2020. No. 5. 51–59 pp. Особистий внесок: розроблено структурну схему проведення теоретичних та експериментальних досліджень та структурну схему взаємозв’язку факторів процесу.

14. K. Samoichuk, A. Kovalyov, V. Oleksiienko, N. Palianychka, D. Dmytrevskyi, V. Chervonyi, D. Horielkov, I. Zolotukhina, A. Slashcheva. Determination of fat milk dispersion quality in the jet-slot type milk homogenizer. Eastern-European Journal of Enterprise Technologies. 2020. № 5/11 (107). pp 16–24. *Особистий внесок:* здобувачем здійснено аналіз існуючих конструкцій гомогенізаторів, проведення експериментів, обробку статистичних даних.

Праці, які засвідчують апробацію матеріалів дисертації

15. Самойчук К.О., Ковальов О.О. Теоретичні основи диспергування в струминному гомогенізаторі молока. Тези доповідей Міжнародної науково-практичної конференції, присвяченої 75-річчю з дня народження ректора університету (1988-1991рр.), д.т.н., проф., член-кореспондента ВАСГНІЛ Бєляєва М.І. Харків. 2013. Ч. І. С. 382–383. *Особистий внесок*: здобувачем описано теоретичні залежності процесу.

16. Самойчук К.О., Ковальов О.О. Струминний гомогенізатор – нормалізатор молока. Тези доповідей міжнародної конференції "Інноваційні аспекти розвитку обладнання харчової і готельної індустрії в умовах сучасності". Харків: ХДУХТ. 2015. С. 93–94. *Особистий внесок*: здобувачем розглянуто особливості роботи струминного гомогенізатора при одночасному проведенні нормалізації, наведено та обґрунтовано діапазони коливання змінних факторів процесу.

17. Ковальов О.О., Лебідь М.Р. Теоретичні основи диспергування в щілинному гомогенізаторі молока. Розвиток харчових виробництв,ресторанного та готельного господарств і торгівлі:проблеми, перспективи, ефективність матеріали міжнар. наук.-практ. конф, присвяченої 80-річчю з дня народження ректора університету. Харків: ХДУХТ. 2018. С. 327–328. Особистий внесок: здобувачем представлені аналітичні залежності при проведенні диспергування в струминно–щілинному гомогенізаторі молока.

18. Самойчук К.О., Ковалев А.А. Перспективы использования струйно-щелевого диспергатора для создания тонкодисперсных эмульсий в сельском хозяйстве. Техническое и кадровое обеспечение инновационных технологий в сельском хозяйстве: материали междунар. науч.-практ. конф. Минск: БГАТУ, 2019 Ч2. С 188-190. Особистий внесок: здобувачем проведено оцінку перспектив використання струйно–щільового гомогенізатора в різних галузях сільського господарства.

19. Самойчук К. О., Ковалев А. А. Струйно-щелевой гомогенизатор для переработки молока. Переработка и управление качеством сельскохозяйственной

продукции: Сб. статей 4–й междунар. науч.-практ. конф. Минск: БГАТУ, 2019. С. 118–120. Особистий внесок: здобувачем представлено математичну модель струминно–щілинного гомогенізатора молока.

20. Самойчук К.О., Ковальов О.О. Струминно-щілинний гомогенізатор молока з роздільною подачею вершків. Інноваційні аспекти розвитку обладнання харчової і готельної індустрії в умовах сучасності матеріали 3-ї міжнар. наук.-практ. конф. Харків: ХДУХТ, 2019. 77-78 с. Особистий внесок: здобувачем зроблено аналіз існуючих теорій диспергування, розроблено конструкцію струминно–щілинного гомогенізатора.

21. Самойчук К.О. Ковальов О. О. Економічна ефективність впровадження струминного гомогенізатора молока щілинного типу. Розвиток харчових виробництв ресторанного та готельного господарств і торгівлі: проблеми, перспективи, ефективність: тези доповідей міжнар. наук.-практ. конф. Харків: ХДУХТ, 2019. С. 249–251. Особистий внесок: здобувачем проведено оцінку економічної ефективності впровадження та зроблені розрахунки згідно прийнятої методики.

22. Ковалев А.А. Перспективы струйно-щелевого гомогенизатора молока Інноваційні технології в агропромисловому комплексі: матеріали І Всеукраїн. Наук.-практ. Інтернет-конференції (Мелітополь, 01-30 вересня 2020 р.) / ТДАТУ: ред.. кол. В.М. Кюрчев, В.Т. Надикто. – Мелітополь: ТДАТУ, 2020. – С. 66-69.

Праці, які додатково відображають наукові результати дисертації

23. Струминний гомогенізатор молока з роздільною подачею вершків. Пат. 94041, Україна: МКИ^5 A01J 11/00. № u201405239; заявл. 19.05.2014; опубл. 27.10.2014. Бюл. № 20. *Особистий внесок*: здобувачем обрано прототип та аналог винаходу, зроблено опис особливостей та запропоновано конструкцію зразку.

24. Спосіб гомогенізації та нормалізації молока. Пат. 94048, Україна: МКИ^5 A01J 11/00. № u201405343; заявл. 19.05.2014; опубл. 27.10.2014. Бюл. № 20. 4 с. *Особистий внесок*: здобувачем обрано прототип та аналог винаходу, зроблено опис

особливостей та запропоновано математичний вираз, що пов’язує площу каналів з параметрами жирності та розмірами камери гомогенізатора.

25. Струминний гомогенізатор молока з роздільною подачею вершків. Пат. 106522, Україна: МКИ5 A01J 11/16. № u201511244; заявл. 16.11.15; опубл. 25.04.2016. Бюл. № 8. 4 с. *Особистий внесок*: здобувачем обрано прототип та аналог винаходу, зроблено опис особливостей та запропоновано конструкцію зразку.

26. Струминний гомогенізатор молока з роздільною подачею вершків. Пат. 122548, Україна: МКИ^5 A01J 11/16. № u 122548 (13); опубл 10.01.2018 Бюл №1. 4 с. *Особистий внесок здобувача:* здобувачем прийнято участь у розробці експериментального пристрою.

27. Струминний гомогенізатор молока з зустрічною подачею вершків. Пат. 131217, Україна, МПК A01J 11/16. № u201807061; заявл. 23.06.2018; опубл. 10.01.2019. Бюл. № 1. *Особистий внесок здобувача:* здобувачем обрано прототип та аналог винаходу, зроблено опис особливостей та запропоновано конструкцію зразку.

28. Струминний гомогенізатор молока з роздільною подачею вершків. Пат. 131218, Україна, МПК A01J 11/16. № u201807062; заявл. 23.06.2018; опубл. 10.01.2019. Бюл. № 1. *Особистий внесок здобувача:* здобувачем обрано прототип та аналог винаходу, зроблено опис особливостей та запропоновано конструкцію зразку.

ABSTRACT

Kovalyov. A. **Substantiation of parameters of jet-slit homogenizer of milk with separate supply of cream.** - Qualification of research work as a manuscript

The dissertation for competition of the degree of candidate of technical sciences, speciality 05.05.11 - Machines and mechanization of agricultural production. Dmytro Motornyi Tavria State Agrotechnologicalical University, Melitopol, Ministry of Education and science of Ukraine. 2021.

Homogenization of milk refers to the regulatory operations of technological processes for the production of drinking milk, fermented milk products and beverages,

yogurts, mixtures for the production of ice cream and more. With the exception of sterilization and pasteurization, this process is the most energy consuming. The percentage of homogenization among the total electricity consumption of dairy enterprises reaches 25–35%, and the specific energy consumption of the most common valve homogenizers in the industry exceeds 6–7 kWh/t. Therefore, the reduction of energy consumption for homogenization while ensuring a high degree of dispersion of milk fat is an urgent problem of the industry. To solve it, a significant number of fundamentally different design solutions of homogenizers were developed, which managed to replace the valves. Therefore, there is a national economic problem, which is the high energy consumption of the process of homogenization of milk as a raw material for the dairy industry. To solve it, it is necessary to solve a scientific and technical problem, which consists in insufficient theoretical substantiation of the hydrodynamic conditions of dispersion of the fat phase of milk in homogenizers.

According to the latest research of such scientists as Baranovsky N. V., Vaitkus V. V., Granovsky V. Y., Nuzhin E.V., Oreshina M. M., Samoichuk K. O., Fialkova E. A., Bylund G., Innings F., Walstra P. and others the main hydrodynamic criterion for the destruction of fat globules of milk is determined by the number of Weber. Its value increases with increasing speed of the fat ball relative to the milk plasma (the speed of sliding the fat ball). The highest sliding speed can be achieved with the use of jet homogenizers, of which the greatest potential for energy efficiency has a jet-slit homogenizer of milk with a separate supply of cream.

Thus, the work is devoted to a practically important task for the milk processing industry - reducing the energy consumption of the homogenization process while maintaining high quality indicators of the process. The solution of this problem is based on a scientific hypothesis, which is to reduce the energy consumption of milk homogenization by supplying a stream of cream in the flow of skim milk through a narrow annular slit. Thus, the work on substantiation of the parameters of the jet-slit homogenizer of milk with separate supply of cream is highly relevant.

The generalized data on physical-mechanical and dispersed characteristics of milk emulsion as an object for homogenization are given. conducted. analysis of literature

sources, the results of which suggest the absence of energy-efficient structures that can reduce the average diameter of fat globules (ADFG) to technologically determined indicators (0.75-0.80 μm) with a significant reduction in specific energy consumption relative to valve homogenizers. The results of the analysis allowed to identify the Weber criterion as a factor that plays a decisive role in the dispersion of the dispersed phase of the milk emulsion. Over the last decades, the process has been studied and several dozen different structures have been proposed for implementation. Analytical studies show that the increase in energy efficiency of homogenization can be achieved by creating the maximum difference between the rates of dispersion and dispersed phases. This principle is best implemented in jet type homogenizers while providing a separate supply of skim milk and cream. Among them are cavitation hydrodynamic homogenizer, microfluidizer, countercurrent-jet and jet milk homogenizer with separate cream supply. However, these designs have disadvantages, which are, respectively, high values, high energy consumption, increased foaming and high obliteration of the channels for feeding the fat phase. In order to increase energy efficiency in obtaining a product with an average diameter of fat globules at the level of technologically determined values and at the same time significantly reduce energy consumption, it is necessary to conduct studies of jet-slit homogenizer of milk with separate cream supply (JSHSC).

As a result of analytical studies of forces and stresses acting on the surface of the fat ball, the main factor of destruction is determined by the force of resistance, which arises due to the difference between the speed of the fat ball and the flow of skim milk. It is considered expedient to use Weber's criterion as a generalizing variable to calculate the average diameter of fat globules during milk dispersion. An analysis of the forces and mechanisms of destruction of the fat ball, the results of which suggest that the decisive influence on the fat ball are Magnus, Coriolis, resistance, inertia, and turbophoresis, and the decisive role in the dispersion process is played by tangential stresses stretching the fat ball in the direction , and when the value of stresses exceeds the forces of interfacial tension lead to its destruction.

The process was simulated in the ANSYS software package, which allowed us to establish that the rational parameter of the excess pressure of the dispersion phase in terms

of creating a critical value of the Weber test is 12 MPa. To increase the phase velocity difference while reducing the working dispersion pressure, the inner diameter of the confuser at the site of greatest narrowing in the laboratory sample of jet-slit milk homogenizer should be less than 4 mm, ie the length of the annular slit should be less than l_{sj}=12.5 mm. The data obtained regarding the rational value of the slit width, the size of which should be about 0.8 mm.

Mathematical dependences were found to determine the average diameter of fat globules, power, productivity and specific energy consumption of jet-slit homogenizer with separate supply of cream. Dependences are found that allow by varying the width of the annular gap, the fat content of the source product and cream and the feed rates of the fat and the dispersion phase to carry out in the developed device quantitative control of fat content in homogenized milk, ie normalize simultaneously with dispersion.

Analysis of the obtained dependences showed that to obtain fat globules, the average diameter of which after homogenization is equal to 0.8 μm, the specific energy consumption of the process is:

- at F_c=40–50%, F_{sk}=3,2–3,5%, h =0,5–0,6mm, l_{sj}=8,7mm–8,9mm, specific expenses of energy make 0,95 –0.97 kW·h/t;

- working pressure of skim milk supply at productivity of 950–1050 kg/h fluctuates within 0,78–0,9 MPa;

- at energy costs of 0.95–0.97 kW·h/t, the productivity of JSHMSCS is 950–1050 kg/h.

Rational values of hydraulic, technological and structural parameters of the jet-slit homogenizer for achievement of the average size of fat balls at the level of 0,75–0,80 microns and the minimum specific energy consumption are analytically determined:

- the optimization of the shape of the inner surface of the confuser in the supply zone of the fat phase indicates that the lowest energy consumption is provided when using the camera, with a conical shape of the inner surface;

- it is determined that increasing the efficiency of the jet-slit homogenizer can be achieved by reducing the supply of the dispersion phase, increasing the inner diameter of the confuser at the site of greatest narrowing, increasing the width of the annular slit for

feeding cream, using a chamber having a conical shape of the inner profile possible fat content of the finished product during normalization of fat content.

The obtained data show that to reduce energy costs while providing the same average diameter of fat globules (0.8 μm) it is necessary to use a chamber in which the length of the annular gap varies in the range of 8.7–8.9 mm, where energy costs have an extremum point (minimum), while the productivity of the homogenizer will fluctuate in the range of 950–1050l/h, and energy costs will be about 0.95–0.97 kW·h/t.

The program of theoretical and experimental researches is developed, significant factors and limits of their fluctuations for a jet-slit homogenizer of milk are established. Thus, the speed of skim milk should fluctuate in the range of 30-90 m/s, the diameter of the confuser at the site of greatest narrowing should vary within 2–4 mm, and the width of the annular gap should be from 0.1 mm to 0.9 mm. To conduct experimental studies of the process of homogenization of milk, a scheme of the homogenization chamber was developed and a laboratory installation of a jet-slit homogenizer of milk was made. The equipment and a technique of definition of a factor of expenses of internal end surfaces of the confuser and the diffuser in a place of giving of cream for specification of its value at carrying out analytical researches are developed.

The analysis of existing methods is made and the choice of a rational method of definition of quality of homogenization is substantiated. The expediency of using a digital camera connected to an optical microscope with subsequent determination of the average diameter of fat globules by microphotographs using a digital camera and Microsoft Visual Studio is substantiated. The choice of measuring devices is substantiated, the limits of variation of factors are established. The sequence of statistical analysis of the characteristics of fat globules, checks for gross measurement errors, checks of reliability of theoretical dependences is determined. The results are considered reliable when the value of the coefficient of determination is greater than 0.95.

Experimental studies confirm the decisive role of the difference in velocities of the dispersion and dispersed phases in the jet-slit homogenizer, which occurs according to Weber's test, the critical value of which for obtaining fat globules with an average diameter after destruction of 0.75–0.80 μm is 29. Found empirical equations to determine

the coefficient of JSHSC, which allowed to claim that increasing the efficiency of the homogenizer should be achieved by reducing the flow rate, while increasing the fat content of the fat phase and the width of the annular slit for feeding cream.

Experimental data on the capacity of pumps for the supply of fat phase and skim milk exceed the calculated parameters by 7–15%. This can be explained by the pressure loss in the nozzles and the connecting fittings of the jet-slit homogenizer. In general, the data obtained during the experiment are in good agreement with the theoretical dependences obtained for the jet-slit homogenizer of milk. According to the results of experimental studies, drinking milk with a fat content of 3.5% and an average size of fat globules of 0.8 μm can be obtained at a slit width of 0.6–0.8 mm, the flow rate of the dispersion phase 60-90 m / s, using cream with a fat content of 33–43%, which is fed at a speed of 7–11m/s, while the specific energy costs of the homogenization process will not exceed 0.88–0.92 kW·h/t.

The dispersed characteristics of the milk emulsion obtained after treatment in JSHSC were evaluated. The coefficient of variation is 15%, and the ADFG of milk emulsion is 0.79 μm, which is lower than similar values for the valve homogenizer A1-OG2M by 17 and 7%, respectively. This proves the high quality of the milk emulsion after processing in the experimental homogenizer.

On the basis of analytical and experimental researches the technique of calculation of design, technological, hydraulic and power parameters of work of the jet-slit homogenizer of milk is offered. The developed industrial sample of a jet homogenizer of milk with a capacity of 1–10t/h, which has an installed motor power of 8 kW, allows to obtain a milk emulsion with an average diameter of fat globules of 0.8 μm and has a specific energy consumption of 0.74 kW·h/t. The developed technical documentation was transferred to the PP VKF «Kharchonaladka» (Melitopol, Zaporizhye region).

A comparative analysis of the most common in the dairy industry and promising types of dispersants shows that the developed homogenizer provides an average size of fat globules according to technologically determined requirements for drinking milk quality at 8-10 times lower specific energy costs of the process relative to valve milk homogenizers.

The industrial sample of jet-slit homogenizer of milk was introduced at OFK

«Pivdennyi» (Melitopol, Zaporizhye region) instead of the valve homogenizer K5-OG2A-1.25. With the processed volume of milk for the test period, which amounted to 1250 tons, the profit amounted to UAH 36,750, which is equal to UAH 29.40/t of homogenized emulsion. The economic effect that was achieved when replacing the valve machine K5-OG2A-1.25 with a jet-slit homogenizer of milk is 238350 thousand. UAH per year, due to a reduction in operating costs by 40% and unit costs by 59%, with a payback period not exceeding 0.36 years.

On the basis of the conducted theoretical and experimental researches of process of homogenization of a fatty phase of milk at jet-slit homogenization with separate giving of cream which is based on Weber's criteria:

For the first time:

- a mathematical model of homogenization of milk in a JSHSC was developed, which allowed to determine the rational process parameters and increase the energy efficiency of dispersion.

Improved:

- the theory of hydrodynamic dispersion of milk emulsion, which is based on the correlation of the relative velocity of the dispersion and disperse phases and Weber's criterion by taking into account the parameters of the influence of the annular gap;

- mathematical model of homogenization in JSHSC due to simultaneous dispersion and normalization of milk emulsion by fat content.

The critical value of Weber's criterion for homogenization of milk in a jet-slit homogenizer is determined, which makes it possible to predict the quality indicators of jet homogenization;

- rational technological, constructive, hydraulic parameters of JSHSC under the condition of high energy efficiency and reception of fine emulsion are established;

- the method of calculation and industrial design of JSHSC is developed, the specific energy costs of which in the range of productivity of JSHSC of 1–10 t/h make 0,74 kW·h/t;

- developed technical documentation for the manufacture of industrial design, which was transferred to the implementation of PP VKF «Kharchonaladka» (act of 04/26/2018);

- implementation of a mock-up sample for production at OFK «Pivdennyi» (act dated May 29, 2018);

- the results of scientific research are used in the educational process of Tavriya State Agrotechnological University named after Dmitry Motorny (Melitopol, Zaporizhye region) in teaching the discipline «Technological equipment of processing and food production», «Processes and apparatus of food production».

Key words: milk, slit homogenizer, jet homogenization, fat phase dispersion, destruction of fat balls, separate cream supply, average diameter of fat ball.

LIST OF PUBLISHED WORKS ON THE THIRD DIRECTORY

Scientific papers, in which the main scientific results of the dissertation are published:

1. Samoichuk K. O., Kovalyov O. O. Development of a laboratory sample of a jet homogenizer with a permissive cream feed. Labor TDATA. 2011. pp. 77-84.

2. Samoichuk K. O., Kovalyov O. O., Ivzhenko A. A. Analysis of methods for evaluating the quality of milk homogenization. Labor TDATA. 2012. Issue 12. Vol. 4. pp. 222-229.

3. Samoichuk K. O., Kovalyov O. O. Using normalization in a jet milk homogenizer with a permissive cream feed. Labor TDATA. 2014. Issue 14. Vol. 1. pp. 37-45.

4. Samoichuk K.A., Kovalev A.A. Mechanisms for dispersing fat globules in a jet milk homogenizer. Scientific works ONAFT. 2016.Vol. 80. Issue 1.S. 103-107.

5. Lezhenkin O. M., Samoichuk K. O., Kovalyov O. O., Palyanichka N. O., Verkholantseva V. O. Determination of the mixing path and contact stresses in a jet milk homogenizer. Bulletin of the Ukrainian branch of the International Academy of agricultural education. 2017. Issue 5. pp.129-142.

6. Kovalyov A., Samoichuk K., Palyanychka N., Verkholantseva V., Yanakov V. Experimental investigations of the parameters of the jet milk homogenizer with separate cream supply. Technology audit and production reserves. 2017. no. 3/3 (35). pp. 33-39. doi: 10.15587 / 2312-8372. 2017.103240.

7. Samoichuk K. O., Kovalyov O. O., Lubko D. V. Modeling of parameters of a jet homogenizer of slotted milk. Labor TDATA. 2018. Issue 18, vol. 2. pp. 286-294.

8. Samoichuk K. O., Kovalyov O. O., Borokhov I. V., Palyanichka N. O. analytical studies of energy indicators and quality parameters of a jet-dense milk homogenizer. Labor TDATA. 2019. Issue 19. Vol. 1. pp. 3-18.

9. Samoichuk K. O., Kovalyov A. A., Kolodiy A. S., Seryi I. A. Optimization of experimental parameters and determination of the experimental value of the Weber criterion for a jet-slit milk homogenizer. Labor TDATA. 2019. Issue 19. Vol. 3. pp. 78-85.

10. Samoichuk K. O., Kovalyov O. O., Palyanichka N. O., Kolodiy O. S., Lebed M. R. Experimental studies of parameters of a jet milk homogenizer with a permissive supply of dense cream. Labor TDATA. 2019. Issue 19. Vol. 2. pp. 117-129.

11. Samoichuk K. O., Seriy I. S., Kovalyov A. A. Development of an industrial design assessment of the economic efficiency of the introduction of a jet-slot milk homogenizer. Labor TDATA. 2020. Issue 20. Vol. 1. pp. 15-25.

12. S. Kiurchev, K. Samoichuk, O. Kovalyov, R. Leshchij. Method of calculation of an industrial model of jet-slot milk homogenizer. TECA. QUARTERLY JOURNAL of AGRI-FOOD INDUSTRY-2020, Vol. 19, No. 4, pp. 23-30.

13. Samoichuk, A. Kovalyov, V. Oleksiienko, N. Palianychka, D. Dmytrevskyi, V. Chervonyi, D. Horielkov, I. Zolotukhina, A. Slashcheva. Elaboration of the research method for milk dispersion in the jet slot type homogenizer. EUREKA: Life Sciences». 2020. No. 5. pp.51–59.

14. Samoichuk, A. Kovalyov, V. Oleksiienko, N. Palianychka, D. Dmytrevskyi, V. Chervonyi, D. Horielkov, I. Zolotukhina, A. Slashcheva. Determination of fat milk dispersion quality in the jet-slot type milk homogenizer. Eastern-European Journal of Enterprise Technologies. 2020. № 5/11 (107). pp. 16–24.

Works certifying the approbation of dissertation materials:

15. Samoichuk K. O., Kovalyov O. O. Theoretical foundations of dispersion in a jet homogenizer of milk: theses of reports of the international scientific-practical conference dedicated to the 75th anniversary of the birth of the University rector (1988-1991g.),

doctor of technical Sciences, prof., corresponding member of VASKHNIL Belyaeva M. I. Kharkiv: KHSUPT, 2013. P. I. pp. 382-383.

16. Samoichuk K. O., Kovalyov O. O. Jet homogenizer-milk Normalizer. Innovative aspects of equipment development in the food and hotel industry in modern conditions: abstracts of the international conference. Kharkiv: KHGUPT, 2015. pp. 93-94.

17. Kovalyov O. O., Lebed M. R. Theoretical bases of dispersion in a slotted milk homogenizer. Development of food production, restaurant and hotel facilities and trade: problems, prospects, efficiency materials of the international scientific-practical conference dedicated to the 80th anniversary of the birth of the University rector. Kharkiv: KHDUKHT. 2018. pp. 327-328.

18. Samoichuk K. O., Kovalyov A. A. Prospects of using a jet-slot dispersant for creating fine-dispersed emulsions in agriculture. Technical and personnel support of innovative technologies in agriculture: materials of the international conference. scientific-practical conf. Minsk: bgatu, 2019 P2. pp. 188-190

19. Samoichuk K. O., Kovalyov A. A. The jet slit homogenizer for milk processing. Processing and quality management of the artel of products: Collection of articles of the 4th international congress. scientific-practical conf. Minsk: bgatu, 2019. pp. 118-120.

20. Samoichuk K. O., Kovalyov O. O. Jet-slot homogenizer of milk with separate cream feeding. Innovative aspects of equipment development in the food and hotel industry in modern conditions: materials of the 3rd international science-practical Conf. Kharkiv: KHGUPT, 2019. pp. 77-78.

21. Samoichuk K. O. Kovalyov O. O., Lebed M. R. Economic efficiency of introduction of a jet homogenizer of slotted type milk. Development of food production in the restaurant and hotel industry and trade: problems, prospects, efficiency: abstracts of reports of international science-practical conf. Kharkiv: KHGUPT, 2019. pp. 249-251.

22. Kovalev A.A. Prospects of the jet-slit milk homogenizer Innovation technologies in the agricultural complex: materials I All-Ukrainian. Science and practice Internet conferences (Melitopol, 01-30 Veresnya 2020)/TDATU: ed. Col. V.M. Kurchev, V.T. Nadikto. - Melitopol: TDATU, 2020. pp. 66-69.

Papers which additionally reflect the scientific results of the dissertation:

23. Jet milk homogenizer with separate cream feed. Pat. 94041, Ukraine: MKI5 A01J 11/00. no. u201405239; declared 19.05.2014; published 27.10.2014. Byul. no. 20. 4 p.

24. Method of homogenization and normalization of milk. Pat. 94048, Ukraine: MKI5 A01J 11/00. no. u201405343; declared 19.05.2014; published 27.10.2014. bul. no. 20. 4 p.

25. Jet milk homogenizer with separate cream feed. Pat. 106522, Ukraine: MKI5 A01J 11/16. no. u201511244; declared. 16.11.15; published 25.04.2016. bul . no. 8.

26. Jet milk homogenizer with separate cream feed. Pat. 122548, Ukraine: MKI5 A01J 11/16. u 122548 (13); published 10.01.2018 bul . no. 1.

27. Jet milk homogenizer with counter feed of cream. Pat. 131217, Ukraine, IPC A01J 11/16. no. u201807061; declared. 23.06.2018; published. 10.01.2019. bul. no. 1.

28. Jet milk homogenizer with separate cream feed. Pat. 131218, Ukraine, IPC A01J 11/16. no. u201807062; declared. 23.06.2018; published 10.01.2019. bul. no. 1.

ЗМІСТ

ПЕРЕЛІК УМОВНИХ ПОЗНАЧЕНЬ, СИМВОЛІВ, ОДИНИЦЬ ВИМІРЮВАННЯ ТА СКОРОЧЕНЬ 28
ВСТУП 31
РОЗДІЛ 1 СТАН ПИТАННЯ І ЗАДАЧІ ДОСЛІДЖЕННЯ 37
1.1. Характеристика та фізико-хімічні властивості молока 37
1.2. Гомогенізація та стабільність молочної емульсії 42
1.3. Технологія роздільної гомогенізації та замінники молочного жиру 44
1.4. Теоретичні основи процесу гомогенізації 47
1,5. Огляд існуючих конструкцій гомогенізаторів молока 55
Висновки за розділом 1 66
РОЗДІЛ 2 ТЕОРЕТИЧНІ ОСНОВИ ПРОЦЕСУ СТРУМИННО–ЩІЛИННОЇ ГОМОГЕНІЗАЦІЇ 67
2.1. Програма теоретичних та експериментальних досліджень 67
2.2. Аналіз сил, факторів і механізмів, які обумовлюють диспергування молочного жиру в струминно–щілинному гомогенізаторі молока 68
2.2.1. Характеристика сил, які діють на жирову кульку 69
2.2.2. Опис процесу струминно–щілинної гомогенізації молока з роздільною подачею вершків 79
2.3. Визначення відносної швидкості дисперсної та дисперсійної фаз при струминно-щілинній гомогенізації молока 82
2.3.1. Ширина щілини 84
2.3.2. Жирність вершків 85
2.3.3. Швидкість вершків 87
2.4. Моделювання параметрів процесу в програмному комплексі ANSYS 91
2.5. Визначення продуктивності гомогенізатора 93

2.6. Енерговитрати гомогенізатора 95
2.7. Питомі енерговитрати струминно–щілинного гомогенізатора 97
2.8. Визначення раціональних параметрів струминного гомогенізатора молока 99
Висновки за розділом 2 101
РОЗДІЛ 3 РОЗРОБКА ТА ОБГРУНТУВАННЯ ПРОГРАМИ ТА МЕТОДИКИ АНАЛІТИЧНИХ ТА ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНИХ ДОСЛІДЖЕНЬ 103
3.1. Основні фактори процесу диспергування 104
3.2. Обґрунтування схеми та конструкції пристрою для експериментальних досліджень струминно–щілинного гомогенізатора молока 107
3.3. Методика визначення коефіцієнта витрат кільцевої щілини на початковій ділянці всмоктування вершків 110
3.4. Планування експериментальних досліджень 112
3.5. Оцінювання якості гомогенізації 115
Висновки за розділом 3 122
РОЗДІЛ 4 ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНІ ДОСЛІДЖЕННЯ ПРОЦЕСУ СТРУМИННО–ЩІЛИННОЇ ГОМОГЕНІЗАЦІЇ МОЛОКА 123
4.1. Визначення впливу швидкості знежиреного молока та діаметру конфузору в місці найбільшого звуження на дисперсність молочної емульсії 123
4.2. Визначення впливу коефіцієнту щілинної гомогенізації на середній діаметр жирових кульок молока 125
4.3. Енерговитрати струминного гомогенізатора молока 129
4.4. Питомі енерговитрати і оптимізація параметрів гомогенізатора 130
4.5.Експериментальне визначення критерію Вебера 132
4.6. Дисперсні показники струминно–щілинного гомогенізатора молока 134
Висновки за розділом 4 137
РОЗДІЛ 5 ПРАКТИЧНА РЕАЛІЗАЦІЯ РЕЗУЛЬТАТІВ

ДОСЛІДЖЕНЬ 138
5.1. Методика розрахунку параметрів струминно–щілинного гомогенізатора молока з проведенням нормалізації молока за жирністю 138
5.2. Розробка промислового зразка струминно–щілинного гомогенізатора для гомогенізації молока 143
5.3 Економічна ефективність впровадження струминно–щілинного гомогенізатора молока 147
Висновки за розділом 5 150
ВИСНОВКИ 151
СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ 153
ДОДАТКИ 172
Додаток А. Гомогенізація та стабільність молочної емульсії 173
Додаток Б. Технологія роздільної гомогенізації та замінники молочного жира 176
Додаток В. Огляд існуючих конструкцій клапанних гомогенізаторів молока та основних факторів процесу диспергування в клапанній щілині 185
Додаток Г. Механізми, за рахунок яких відбувається руйнування жирових кульок в струминно–щілинному гомогенізаторі молока 191
Додаток Д. Розрахунок економічної ефективності впровадження струминно–щілинного гомогенізатора молока з роздільною подачею вершків 199
Додаток Ж. Акт впровадження результатів науково-дослідної роботи у навчальний процес 205
Додаток З. Акт передачі науково-технічної документації 206
Додаток К. Патенти за результатами досліджень 208
Додаток Л. Акт впровадження у виробництво 220
Додаток М. Сертіфікати учасника конференцій 222

ПЕРЕЛІК УМОВНИХ ПОЗНАЧЕНЬ, СИМВОЛІВ, ОДИНИЦЬ ВИМІРЮВАННЯ ТА СКОРОЧЕНЬ

СЩГРВ – струминно–щілинний гомогенізатор молока з роздільною подачею вершків (вершків);

ДФ – дисперсна фаза (вершки);

СЖК – середній діаметр жирової кульки після диспергування;

ОЖК – оболонка жирової кульки;

We – критерій Вебера;

u – швидкість ковзання жирової кульки відносно молочної плазми, м/с;

υ_1 – швидкість руху жирової кульки при входженні у клапанну щілину, м/с;

υ_0 – швидкість руху жирової кульки до входження у клапанну щілину, м/с;

$d_{ср}$ – середній діаметр жирової кульки після гомогенізації, мкм;

Δp – перепад тисків в камері гомогенізатора, Па;

$\Delta \upsilon$ – різниця між швидкостями руху жирової кульки та вершків, м/с;

$K_{ст}$ – коефіцієнт стійкості жирової фази;

$\mu_к$ – коефіцієнт подачі конфузора в місці його найбільшого звуження;

$\varepsilon_к$ – гідравлічний коефіцієнт стиснення конфузора в місці його найбільшого звуження;

$u_с$ – середня швидкість руху потоку знежиреного молока, м/с;

δ – товщина граничного шару, мм;

$r_к$ – радіус жирової кульки, мкм;

du/dy – градієнт швидкості;

d – середній діаметр жирової кульки до гомогенізації, мкм;

$\mu_в$ – гідравлічний коефіцієнт щілини подачі вершків;

$\upsilon_{зн}$ – швидкість подачі знежиреного молока, м/с;

h – ширина кільцевої щілини, мм;

$d_к$ – діаметр камери в місці найбільшого звуження конфузора, мм;

$\upsilon_в$ – швидкість подачі вершків, м/с;

$Q_в$ – подача жирової фази м^3/год, кг/год;

$Q_г$ – продуктивність гомогенізатора, м^3/год, кг/год;

S – площа каналу подачі жирової фази;

σ – поверхневий натяг на межі розділу фаз «жир–плазма», Н/м;

Δp_σ – перепад тиску, обумовлений дією сил поверхневого натягу, Па;

Δp_k – перепад тиску між внутрішньою та зовнішньою частинами кульки, який призводить до її деформації та подальшого руйнування, Па;

F_0 – сила опору руху жирової частки в потоці знежиреного молока, Н;

$E_{пит}$ – питомі енергетичні витрати струминно–щілинного гомогенізатора молока, кВт·год/т;

Δu_y – різниця швидкостей знежиреного молока, які діють на відстані y, м/с;

Re – число Рейнольдса;

$k_щ$ – коефіцієнт щілинної гомогенізації з поперечним подаванням вершків;

D_{max} – максимальний діаметр жирової кульки, яка залишається стабільною в турбулентному потоці, мкм;

$\Delta p_{зн}$ – надлишковий тиск подачі знежиреного молока, Па;

$\Delta p_в$ – надлишковий тиск подачі вершків, Па;

$Ж_{н.м}$ – жирність нормалізованого молока, %;

$Ж_{зн}$ – жирність знежиреного молока, %;

$Ж_в$ – жирність вершків, %;

$Q_{зн}$ – подача знежиреного молока, м^3/год, кг/год;

$\rho_м$ – густина молока, кг/м^3

$\rho_{пл}$ – густина плазми молока, кг/м^3

$\rho_в$ – густина молочного жиру, кг/м^3

$We_к$ – критичне значення критерію Вебера для струминно–щілинної гомогенізації;

l_δ – довжина ділянки, на яку розповсюджується граничний шар, мм;

$l_{зм}$ – довжина шляху змішування, мм;

τ –дотичні напруження, Н

$P_{зн}$ – потужність, яка витрачається на подачу (привод в дію насосів) знежиреного молока, Па;

$P_{в}$ – потужність, яка витрачається на подачу (привод в дію насосів) вершків, Па;

P – загальна потужністьструминно–щілинного гомогенізатора молока, Па;

$\mu_{пл}$ – динамічна в’язкість молочної плазми, г/(см·с);

$\nu_{пл}$ – кінематична в’язкість молочної плазми, см²/с.

$l_{щ}$ – довжина кільцевої щілини, мм.

ВСТУП

Актуальність роботи. Гомогенізація молока відноситься до нормативних операцій технологічних процесів виробництва питного молока, кисломолочних продуктів і напоїв, йогуртів, сумішей для виробництва морозива тощо. За виключенням стерилізації й пастеризації цей процес є найбільш енерговитратним. Відсоткова частка гомогенізації серед загальних витрат електроенергії молокопереробних підприємств сягає 25–35%, а питомі енерговитрати найбільш поширених у промисловості клапанних гомогенізаторів перевищують 6–7 кВт·год/т. Отже зниження енерговитрат на гомогенізацію при забезпеченні високого ступеня диспергування молочного жиру є актуальною проблемою галузі. Для її вирішення була розроблена значна кількість принципово різних конструктивних рішень гомогенізаторів, яким так і вдалося замінити клапанні. Тому існує **народногосподарська проблема**, яка полягає у високих енерговитратах процесу гомогенізації молока як сировини молочної промисловості. Для її вирішення необхідно розв’язати **науково-технічну проблему**, яка полягає в недостатньому теоретичному обґрунтуванні гідродинамічних умов диспергування жирової фази молока в гомогенізаторах.

Згідно останніх досліджень таких вчених як Барановський Н.В., Вайткус В.В., Грановський В.Я., Нужин Є.В., Орешина М.М., Самойчук К.О., Фіалкова Є.О., Bylund G., Innings F., Walstra P. та іншими основний гідродинамічний критерій руйнування жирових кульок молока визначається числом Вебера. Його значення підвищується при збільшенні швидкості руху жирової кульки відносно плазми молока (швидкості ковзання жирової кульки). Найбільшу швидкість ковзання можливо досягти при використанні струминних гомогенізаторів, з яких найбільший потенціал збільшення енергоефективності має струминно-щілинний гомогенізатор молока з роздільною подачею вершків.

Отже робота присвячена вирішенню практично важливої для галузі переробки молока **науково-технічної задачі** – зниженню енергоємності процесу гомогенізації при збереженні високих показників якості емульсії. Вирішення цієї задачі

ґрунтується на *науковій гіпотезі*, яка полягає в зниженні енерговитрат гомогенізації молока за рахунок подачі струменя вершків у потік знежиреного молока крізь вузьку кільцеву щілину. Таким чином, робота з обґрунтування параметрів струминно-щілинного гомогенізатора молока з роздільною подачею вершків відрізняється високою актуальністю.

Зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами. Робота містить результати досліджень, виконаних автором у межах науково-дослідної роботи кафедри обладнання переробних і харчових виробництв Таврійського державного агротехнологічного університету імені Дмитра Моторного відповідно до програми науково-дослідних робіт на 2010–2015 рр. «Розробка технологій і технічних засобів для переробки і зберігання сільськогосподарської продукції» державний реєстраційний номер №0111U002551 і програми науково-дослідних робіт на 2016–2020 рр. «Розробка технологій і технічних засобів для переробки і зберігання сільськогосподарської продукції та процесів і обладнання харчових виробництв» державний реєстраційний номер №0116U002730.

Мета і завдання дослідження. *Метою дисертаційних досліджень* є зниження енергетичних витрат процесу при забезпеченні високої якості гомогенізації молока шляхом обґрунтування конструктивно-технологічних та гідравлічних параметрів струминно-щілинного гомогенізатора молока з роздільною подачею вершків. У відповідності до зазначеної мети, було поставлено та вирішено такі *задачі*:

1. Провести аналіз гіпотез руйнування жирових кульок при гомогенізації та існуючих конструкцій гомогенізаторів молока і визначити основні механізми, за якими відбувається диспергування дисперсної фази молочної емульсії для струминно-щілинного гомогенізатора молока з роздільною подачею вершків;

2. Розробити математичну модель гомогенізації жирової фази молока, яка пов'язує гідравлічні, конструктивні, технологічні параметри з критерієм Вебера, енергетичними та якісними показниками процесу в струминно-щілинному гомогенізаторі молока;

3. Встановити закономірності, які пов'язують середній діаметр жирових кульок після диспергування та критерій Вебера з параметрами кільцевої щілини;

4. Розробити методику для розрахунку та обґрунтування конструктивного рішення промислового зразку струминно-щілинного гомогенізатора молока;

5. Здійснити впровадження результатів досліджень у виробництво і оцінити техніко-економічну ефективність використання струминно-щілинного гомогенізатора молока.

Об'єктом дослідження є процес струминно-щілинної гомогенізації молока з роздільним подаванням вершків.

Предметом дослідження є закономірності впливу технологічних, конструктивних та гідравлічних параметрів струминно-щілинного гомогенізатора молока з роздільною подачею вершків на його якісні та енергетичні показники.

Методи дослідження. Поставлені задачі вирішувались з використанням теоретичного інструментарію, серед якого: залежності класичної гідродинаміки, теорії затоплених струменів, граничного шару Шліхтінга, локальної ізотропної турбулентності Колмогорова-Обухова, моделювання процесу в програмному комплексі кінцево-елементного аналізу ANSYS з попереднім створенням геометричної моделі в програмі Solid Works. Експериментальні дані оброблювались за допомогою методів екстраполяції з використанням програми Microsoft Excel, статистичного аналізу даних, мікрофотографування з використанням цифрової камери та обробки отриманих результатів за допомогою комп'ютерної програми аналізу зображень програми Microsoft Visual Studio.

Наукова новизна одержаних результатів. На основі проведених теоретичних та експериментальних досліджень процесу гомогенізації жирової фази молока при струминно-щілинній гомогенізації з роздільною подачею вершків, яка базується на критерії Вебера:

Вперше:

– розроблено математичну модель гомогенізації молока в струминно-щілинному гомогенізаторі з роздільною подачею вершків (СЩГРВ), що дозволило визначити раціональні параметри процесу та підвищити енергоефективність диспергування.

Удосконалено:

– теорію гідродинамічного диспергування молочної емульсії, яка ґрунтується на кореляції відносної швидкості дисперсійної та дисперсної фаз і критерію Вебера, за рахунок врахування параметрів впливу кільцевої щілини;

– математичну модель гомогенізації в СЩГРВ за рахунок одночасного проведення диспергування та нормалізації молочної емульсії за жирністю.

Практичне значення одержаних результатів:

1. Визначено критичне значення критерію Вебера для гомогенізації молока в струминно-щілинному гомогенізаторі, який дає можливість прогнозувати показники якості струминної гомогенізації;

2. Встановлено раціональні технологічні, конструктивні, гідравлічні параметри СЩГРВ за умови високої енергоефективності і отримання дрібнодисперсної емульсії;

3. Розроблено методику розрахунку та промисловий зразок СЩГРВ, питомі енергетичні витрати якого в діапазоні продуктивності СЩГРВ 1–10 т/год не перевищують 0,80 кВт·год/т;

4. Розроблено методику розрахунку та здійснено обґрунтування конструктивного рішення на виготовлення макетного промислового зразку, які передано до впровадження у ПП ВКФ «Харчоналадка» (акт від 26.04.2018р);

5. Здійснено впровадження макетного зразку до виробництва на МЖК «Південний» (акт від 29.05.2018р);

6. Результати наукових досліджень використовуються в навчальному процесі Таврійського державного агротехнологічного університету імені Дмитра Моторного (м. Мелітополь, Запорізька обл.) при викладанні дисципліни «Технологічне обладнання переробних і харчових виробництв», «Процеси і апарати харчових виробництв».

Особистий внесок здобувача. Дисертантом особисто проведено аналіз літературних джерел і існуючих теорій руйнування жирових кульок молока [1, 3–9, 15–20], запропоновано конструкцію [22], технологічну схему [1, 3,]та конструктивне рішення пристрою для проведення гомогенізації жирової фази молочної емульсії в

СЩГРВ [24–28], взято участь у визначенні методики оцінки якості гомогенізації [2], проведенні експериментальних досліджень [11, 13, 20], здійснена математична обробка отриманих результатів [10] і здійсненні заходи, щодо впровадження результатів у виробництво [14, 18]. Разом з науковим керівником було здійснено постановку завдань, проведені аналітичні дослідження [5–8, 12, 21, 23] з аналізом їх результатів, обґрунтовано методику проведення експериментальних досліджень, їх аналіз і узагальнення результатів. Основні положення дисертації та висновки сформульовані дисертантом особисто.

Апробація результатів дисертації. Результати досліджень були представлені на конференції «Проблеми якості, стандартизації, сертифікації та метрологічного забезпечення» (Херсон, 2013), міжнародній науково-практичній конференції «Прогресивна техніка та технології харчових виробництв, ресторанного та готельного господарств і торгівлі. Економічна стратегія і перспективи розвитку сфери торгівлі та послуг» (Харків, 2013), III та V науково–практичних конференціях «Інноваційні енерготехнології» (Одеса, 2013, 2015), міжнародній науково-практичній конференції «Розвиток харчових виробництв, ресторанного та готельного господарстві торгівлі: проблеми, перспективи, ефективність» (Харків, 2016), I, II та III міжнародних конференціях «Інноваційні аспекти розвитку обладнання харчової і готельної індустрії в умовах сучасності» (Мелітополь–Кирилівка 2015, 2017 та 2019р), міжнародній науково-практичній конференція вчених, аспірантів і студентів «Наукові здобутки у вирішенні актуальних проблем виробництва та переробки сировини, стандартизації і продовольства» (Київ, 2017), міжнародної науково-практичної конференції «Агроекологічні аспекти виробництва та переробки продукції сільського господарства» (Мелітополь–Кирилівка, 2018), міжнародній науково-практичній конференції «Розвиток харчових виробництв ресторанного та готельного господарств і торгівлі: проблеми, перспективи, ефективність» (Харків, 2019), международной научно-практической конференции «Техническое и кадровое обеспечение инновационных технологий в сельском хозяйстве» (Минск, 2019), 4–й международной научно-практической конференция «Переработка и управление качеством сельскохозяйственной

продукции» (Минск, 2019), та на науково-технічних конференціях професорсько-викладацького складу ТДАТУ 2011–2020 рр.

Публікації. Основні результати досліджень за темою дисертації викладені у 28 опублікованих роботах, загальним обсягом 16,9 ум. друк. арк., у тому числі 8 – у фахових виданнях України, 3 – у закордонних, 3 – в інших виданнях, 6 патентів України, 8 – тез доповідей (в тому числі закордонних). Із надрукованих праць одна написана автором особисто.

Структура та обсяг дисертації. Дисертація складається зі вступу, п’яти розділів, висновків, списку використаних джерел та додатків. Загальний обсяг дисертації становить 228 сторінок. З них основна частина дисертації складає 115 сторінок друкованого тексту, де розміщено 37 рисунків та 6 таблиць. Бібліографічний список складається з 208 найменувань літературних джерел.

РОЗДІЛ 1
СТАН ПИТАННЯ І ЗАДАЧІ ДОСЛІДЖЕННЯ

1.1 Характеристика та фізико–хімічні властивості молока

Молоко являє собою натуральну полідисперсну емульсію в якій дисперсійним середовищем є вода, а дисперсною фазою–речовини, які знаходяться в ній в молекулярному, колоїдному та емульгованому стані.

Молочний цукор та мінеральні солі утворюють молекулярні та іонні розчини. Білки знаходяться в розчиненому (альбуміни та глобуліни) та колоїдному (казеїн) стані, молочний жир – у вигляді емульсії. Молочний жир, основу якого складають тригліцеріди знаходиться у молоці в вигляді дрібних кульок: в охолодженому–в вигляді суспензії, в нагрітому – емульсії. Властивості молочного жиру визначаються складом та структурою більш ніж 100 жирних кислот тригліцеридів, присутніх в ньому, з яких кількісно переважають 10–12. Серед насичених жирних кислот у великій кількості містяться пальмітинова, мірістинова, стеаринова, з ненасичених переважає олеїнова [164, 202]. Температура застигання молочного жиру складає 18–23ºС, температура плавлення 27–36ºС, його густина при температурі 20ºС складає 0,930–0,938 г/см^3.

Середній діаметр жирових кульок (СЖК), згідно досліджень, представлених різними авторами знаходиться в межах 2–4 мкм з коливаннями від 0,1 до 10 мкм і більше [13, 27, 204]. Їх кількість складає 1,5–3,5 млрд. в 1 мл молока. При цьому кількість жирових кульок, які мають розмір більш 2 мкм складає більш 50%, вона залежить від породи та індивідуальних особливостей корови. Кількість жирових кульок в одиниці об’єму молока є величиною більш постійною, ніж їх розміри, які залежать від породи корів, часу лактації, якості кормів, здоров’я тварини, умов утримання, часу доїння [59, 68, 141]. Зовнішній шар оболонки жирової кульки має складну будову та складається з фосфоліпідів, оболонкового білка та гідратної води.

Теплофізичні характеристики молочного жиру (питома теплоємність, теплопровідність та гутина) помітно впливають на зміну властивостей молока при

переробці. В твердому стані питома теплоємність жиру практично константна та складає від 1046 до 1758 Дж/(кг К). При плавці жиру питома теплоємність зростає, але свого максимального значення досягає поступово, відповідно до плавлення різних груп тригліцерідів [155, 177, 190].

При виробництві, оцінці складу та якості молока прийнято виділяти вміст жирової фази та молочної плазми. Плазма являє собою вільну від жиру молочну рідину, в якій присутні всі інші складові частини молока в незмінному вигляді. Білки молока знаходяться в розчиненому та колоїдному стані, тому легко засвоюються (до 98%) при взаємодії з ферментами шлункового тракту людини. Основну частину білків молока складають казеїн–до 82% з розміром часток 40–300 нм та сферичну форму в стані суспензії, шароподібну форму в стані емульсії та сироваткові білки. Останні представлені альбумінами – до 12% від загальної кількості з розміром часток 15–20 нм, глобулінами–до 6% з розмірами часток 25–50 нм та протеозопептонами, іонами калію та натрію–0,5 [97, 141, 182].

Поживна цінність молока в значному ступені визначається розмірами часток жиру в молоці. В деяких роботах [146, 154, 195] показано, що руйнування жирових кульок молока до менших ніж в вихідному стані розмірів майже на третину підвищує харчову цінність молока. Молочний жир, який є джерелом надходження до організму β-каротину, вітамінів А та D характеризується високою засвоюваністю, оскільки має низьку температуру плавлення та є тонко диспергованим в об’ємі молока. Його біологічна цінність має високі значення завдяки наявності поліненасиченої арахідонової кислоти, лецитину та холестерину. Висока дисперсність, наявність оболонки та електричного заряду, низька температура плавлення забезпечують часткам жира проникнення до організму людини та його засвоєння в нативній формі, без попереднього розкладу під дією ліполітичних ферментів. Енергетична цінність молока та молочного жира складає 37,7 МДж/кг, засвоюваність–до 98% [13, 68, 93].

В процесі засвоєння молочного жиру утворюються складні за составом та будовою частки натуральних жирових емульсій – хіломікрони, що включають речовини, які знижують гідрофобність вершків. Така природна емульсія

синтезуючись в організмі, характеризується високою стабільністю та мікроскопічним розміром жирових кульок, який не перевищує 1 мкм. Внаслідок цього за рахунок переносу жиру до кровотока забезпечується краща засвоюваність компонентів молочної емульсії. Отже, для підвищення засвоюваності та біологічної цінності продуктів розмір часток дисперсної фази повинен наближуватись до розміру хіломікронів [94, 182].

Жири, які присутні в жіночому молоці засвоюються дитиною на 90%, в коров'ячому на 60–70%. На цей показник впливає різноманітний жирно-кислотний склад, більш висока дисперсність жирової фази та більш висока в (10–15 разів) концентрація активної ліпази в жіночому молоці [52, 97]. Жир жіночого молока містить більше фосфоліпідів, ніж жир коров'ячого, тому жирові кульки в жіночому молоці мають більш дрібний середній розмір, що складає 2–3 мкм, в коров'ячому 3–4 мкм [13, 97, 162]. Для підвищення засвоюваності коров´ячого молока дитиною, слід прагнути до зменшення СЖК в ньому, що підвищить засвоюваність продукту. При штучному виготовленні годувальних сумішей вміст жирів в замінниках при складанні сумішей в процесі нормалізації наближують до показників жіночого молока, який в залежності від віку дітей знаходиться на рівні 3,5–3,8%, що відповідає енергетичній цінності 132–143 кДж на 100 г молока [59, 94, 155].

Білки жіночого и коров'ячого молока володіють видовою специфічністю та розрізняються за амінокислотним складом. Казеїн–головний білок коров'ячого молока, його концентрація складає біля 80% кількості білків. В білках жіночого молока казеїну менше (біля 35%), переважають сироваткові білки (їх приблизно 65%). β-лактоглобулін–специфічний білок молока тварин. В жіночому молоці він відсутній; в коров'ячому складає приблизно 50% усіх сироваткових білків. За високих температур β-лактоглобулін піддається тепловій денатурації, змінює термостійкість суміші, утворює з χ-казеїном шляхом дісульфідних зв'язків комплекси [97, 139, 144].

Вміст вітамінів в молоці залежить від породи тварини, якості кормів, пори року, умов зберігання та режимів обробки молока. Теплова обробка молока призводить до втрати вітамінів, особливо вітаміну С–від 10 до 30%; втрати вітамінів

А та B_2 мають при цьому невеликі значення. В молоці міститься 0,7–0,8% мінеральних речовин (Ca, P, K, Na, Cl), причому більшу частину складають солі кальцію та фосфору. Мікроелементи пов’язані з білками та оболонками жирових кульок (ОЖК), а також входять до складу біологічно активних з’єднань, вітамінів, гормонів, активізуючи їх. Кальцій має велике значення в технології переробки молока, наприклад, збільшення його концентрації викликає згортання білків молока при тепловій обробці [154, 177, 199].

Поверхневий натяг після доїння має підвищене значення, при зберіганні та охолодженні його показник знижується. Він залежить від температури молока, хімічного складу білка, жиру, активності ліпази, тривалості зберігання, режиму технологічної обробки. Піноутворення в процесі обробки обумовлено поверхневими явищами, що виникають на межі розділу рідина–повітря. Поверхневий натяг свіжого молока більше, ніж після зберігання, що обумовлено зміною колоїдного стану білків. Поверхневий натяг прагне вернути рідині форму шару–мінімум поверхні при заданому об’ємі, його значення при температурі 10ºС складає 0,045 Н/м та зменшується з підвищенням температури. При підвищенні температури до 60ºС поверхневий натяг зменшується на 11%, отже для підвищення ефективності диспергування температура молочної плазми має бути не нижче 60°С [2, 18, 59, 199]. Гомогенізація призводить до руйнування жирових кульок та їхніх зв’язків з молекулами білків під впливом механічної обробки обумовлює зниження поверхневого натягу [69, 86].

В’язкість молока обумовлюється видом білкових компонентів, які входять до його складу. Динамічна в’язкість молока при температурі 8ºС складає 2,72 10^{-3}Па·с, при підвищенні температури молока до 80ºС знижується в 5,2 рази. Зниження в’язкості при підвищенні температури–процес незворотній, так як після охолодження молока до початкової температури його в’язкість буде вищою за первинне значення. Вона залежить від вмісту казеїну та жиру, дисперсності міцел казеїну та жирових кульок, ступеню їх гідратації та агрегування, сироваткові білки та лактоза несуттєво впливають на в’язкість. Жирова фаза істотного впливу на в'язкість не має, тому в'язкість цільного молока не дуже відрізняється від цього

показнику для знежиреного молока. Збільшена поверхня контакту фаз жир–плазма здатна частково зв'язувати білки та воду, тобто структурувати усю систему зі зростанням її в'язкості [25, 138, 179, 204].

Властивості молока та складових компонентів молочної емульсії, які безпосередньо впливають на процес гомогенізації і використані у подальших аналітичних та експериментальних дослідженнях струминно–щілинного гомогенізатору молока з роздільною подачею вершків, зведені до таблиці 1 [97, 155, 182].

Таблиця 1

Фізико-хімічні властивості молока

Показник	Середнє значення	Границя коливання
1	2	3
Густина, кг/м^3: молока плазми молочного жиру	1030 1035 923	1027…1033 1033…1038 918…927
В'язкість молока, Па·с	0,00179	0,0011…0,0025
Поверхневий натяг на границі фаз, Н/м: – плазма–повітря – молоко–повітря – рідкий жир–повітря	 0,054 0,044 0,030	 0,0424…0,051
Температура розплавлення молочних жирів, ^{0}С: – легкоплавких – тугоплавких	 27 35	 25…29 30…37

Підвищені кислотність, в'язкість та густина молока знижують ефективність гомогенізації, що свідчить про необхідність використання технології обробки, яка мінімально дестабілізує початкові показники продукта, вплив кожної з операцій на які розглянуто у п 1.3 дисертаційної роботи та додатку А [69, 155, 182].

1.2. Гомогенізація та стабільність молочної емульсії

Гомогенізація дозволяє отримувати високоякісні, однорідні емульсії та суспензії, підвищує дисперсність жирової фази (додаток А). Гомогенізація являє собою зменшення розмірів (диспергування) жирових кульок, що здійснюється шляхом впливу на молоко та вершки значних зовнішніх гідродинамічних або механічних зусиль. При проведенні операції спостерігається зменшення величини жирових кульок та швидкості їх спливання, відбувається перерозподіл речовини ОЖК, при цьому жирова кулька набуває стабільності. Одночасно з диспергуванням жирових кульок під час гомогенізації відбувається й зворотній процес–утворення конгломератів з окремих часток і злиття їх в більш великі сфери. Цей факт обмежує жирність вершків, які використовуються при проведенні нормалізації, оскільки без додаткової гомогенізації, вершки з відсотком жиру більше 50% мають більшу схильність до утворення конгломератів [69, 199, 205].

В процесі гомогенізації частки подрібнюються до одного мікрону та менше, рівномірно розподіляючись в об’ємі продукта, при цьому розміри жирових кульок зменшуються в 10 разів, а швидкість спливання у відповідності до закону Стокса знижується в 100 разів. Покращення смакових якостей продуктів при гомогенізації пов’язано зі зменшенням розмірів жирових кульок вершків та відповідному збільшенні сумарної площі їх поверхні. Кількість білку в ОЖК при гомогенізації зростає в 2–5 разів. Разом з цим, підвищення однорідності, тобто досягнення рівномірного розподілу дисперсної фази в дисперсійному середовищі потребує застосування більш ефективних методів диспергування та гомогенізації [69, 141].

Стійкість емульсії та її консистенція визначаються як фізико–механічними властивостями компонентів так і способом їх обробки [150]. З відстоюванням жиру пов’язане не тільки погіршення харчової якості та енергетичної цінності продуктів, але й втрати продукта з тарою та при зберіганні [154, 164, 199].

Фізична стабільність дисперсної фази в молоці та молочних виробах залежить від складу та властивостей оболонок білкової та жирової складових молока.

Механічний та тепловий вплив може призвести до перерозподілу речовин між шарами знежиреного молока та вершків в емульсії. Оболонка жирової кульки складається з двох різних шарів різного складу – внутрішнього тонкого, який щільно прилягає до кристалічного шару високоплавких тригліцерідів жирової глобули та зовнішнього дифузного, що легко десорбує в процесі технологічної обробки молока. Це викликає структурну зміну оболонок, зниження їх міцності та часткове порушення цілісності. Зниження стійкості молочної емульсії може бути причиною окиснення, гідролізу, прогоркання при виробництві та зберіганні молочних виробів. Білки складають близько 60% складу оболонок та характеризуються тим, що приєднуються до оболонки з різною міцністю. Отже, дестабілізація емульсії може відбуватись при перемішуванні, сепарації або при зміні температури молока [13, 185, 195].

Підвищення масової частки жиру в емульсії знижує її стабільність, оскільки при цьому спостерігається недостатня кількість оболонкової речовини, необхідної для покриття поверхні знов утворених жирових кульок. Враховуючи це, при виробництві продуктів необхідно використовувати вершки, жирність яких складає менше 50% та емульгатори (казеїнат натрію, казецит або дистильований моногліцерид), які разом з фосфатидами плазми молока приймають участь в утворенні ОЖК, що забезпечує стабільність емульсії [26, 52, 99].

На ступінь дестабілізації значно впливає температура. Наприклад, після заморожування при подальшому відстоюванні вершків молочний жир значною мірою дестабілізується, що пов’язано з пошкодженням ОЖК при утворенні кристалів льода. Стабільність жирової фази молочних сумішей після гомогенізації значно підвищується, а білкової – знижується, особливо при високому вмісті жиру в продукті та підвищеному тиску диспергування [99, 138]. Зважаючи на важливу роль технології в забезпеченні стабільності емульсії після гомогенізації, розглянемо технологічні процеси, які обумовлюють погіршення цієї характеристики.

1.3. Технологія роздільної гомогенізації та замінники молочного жиру

Гомогенізація належить до одного з найбільш енергоємних техпроцесів у молочній промисловості, оскільки при тиску 10 МПа необхідно збільшити поверхню розділу фаз на 500 тис $м^2$/т, а питомі витрати енергії на здійснення цієї операції сягають понад 8 кВт·год/т. Оскільки вибір способу та параметрів процесу диспергування не є науково обґрунтованими, процеси обробки сировини повинні бути розроблені на основі оптимізації параметрів типового техпроцесу [140, 155, 182]. Згідно технологічних вимог, що висуваються до якості молока після гомогенізації, СЖК після диспергування має складати 0,75 мкм. Загальноприйнятою величиною, що визначає верхній діапазон достатнього рівня диспергування представляє емульсія з середнім діаметром жирових кульок на рівні 0,80 мкм. Отже, при проведенні гомогенізації СЖК після диспергування має знаходитись в діапазоні 0,75–0,80 мкм [29, 139, 157].

Нормалізація є одним з нормативних процесів, який виконується для приведення до відповідністі вмісту жира в молоці, вирівнювання балансу компонентів в емульсії та усунення сезонних коливань складу молока. При нормалізації встановлюється необхідне співвідношення компонентів, що дозволяє отримувати молоко заданої харчової та енергетичної цінності при забезпеченні високої якості продукту. За вмістом жиру молоко нормалізують шляхом змішування: або періодичним способом, або безперервним в потоці з використанням сепаратора – нормалізатора. З метою зниження ресурсоємності переробки молочної продукції для заміни молочного жиру (або його частини) деякі молокопереробні підприємства використовують жири рослинного походження [3, 69, 185]. На ринку України є велика кількість замінників молочного жиру, серед яких присутні спеціальні суміші та дешеві рослинні масла невисокої якості. Використовують кокосовий, пальмовий, соєвий жири, кукурудзяну та рослинну олію, а також суміші, наприклад «Акобленд», «Олмикс» [14, 105, 148].

Для підвищення емульсійної стійкості жира можливо використання природного емульгатору–речовини ОЖК коров’ячого молока. Проведенні

дослідження показали, що емульгатор зберігає свої поверхнево-активні властивості та на 70–80% переходить до ОЖК при емульгуванні молочного жира. При додаванні сухого препарату в кількості 1,5–2% ваги жирової фази, стійкість емульсії збільшується вдвічі. Робота, яка витрачається при гомогенізації на створення одиниці нової поверхні жирової фази при цьому знижується вдвічі. Отже, тиск гомогенізації може бути знижено приблизно в 1,5 рази для отримання жирових кульок, СЖК у яких відповідає показникам дисперсності жіночого молока. Використання препарату ОЖК дозволяє наблизити склад замінників до жіночого молока за вмістом фосфоліпідів [6, 97, 142].

Одним з можливих шляхів зниження питомих витрат процесу диспергування є використання роздільної гомогенізації, яка дозволяє отримати продукт з необхідним вмістом жиру, підвищити стабільність ДФ та білків та обмежити небажаний механічний вплив на молочний білок при виробництві питного молока, кисломолочних продуктів та сирів. Проведений аналіз операцій, які складають технологію виробництва питного молока з роздільною подачею вершків свідчить, що на дестабілізацію білкової та жирової фази впливають такі операції, як

– механічне доїння, в результаті якого відбувається пошкодження ОЖК, агрегація жирових кульок та утворення агломератів [13, 59];

– охолодження до температури нижче 0°С, внаслідок чого відбувається розрив ОЖК [13, 99];

– тривала витримка молока, в результаті якої відбувається частковий перехід фосфоліпідів з ОЖК до плазми [25, 52];

– перекачування молока в процесі подачі на переробку або у проміжні ємності [27, 201];

– підвищення температури очищення вище 50°С, що створює сприятливі умови до розчинення механічних забруднень в молоці [68, 88];

– сепарування при високій температурі, що призводить до дестабілізації білкової фази та утворення піни [13, 154];

– теплова обробка, що призводить до денатурації сироваткових білків, при зменшенні дисперсності емульсії це може призвести до коагуляції часток ДФ [26, 202].

Подальший аналіз факторів та режимів, технології обробки ,що призводять до дестабілізації та погіршення якості емульсії надано у додатку Б.

Для запобігання дестабілізації емульсії, на основі аналізу технології, наданого у додатку Б, рекомендується

– виготовляти трубопроводи та комунікації по яких подається молоко більш короткими та такими, які не мають місць екстремальної зміни швидкості [25, 199];

– обирати раціональні режими теплової обробки, які будуть забезпечувати відновлення порушенних ОЖК, за рахунок абсорбції на їх поверхнях сироваткових білків та казеїну [13, 155];

– проводити очищення молока після його підігріву до 35–45°С [13, 155, 199];

– виключати тепловий вплив на молоко при проведенні сепарації, що забезпечить мінімізацію втрат вершків [61, 70, 202];

– виключати проведення сепарації для вершків з масовою часткою жиру більше 35%, що забезпечить стабільність жирової фази емульсії [59, 70, 88];

–додавати емульгатор у вигляді природної речовини, який забезпечить підвищення стійкості емульсії [14, 28, 148].

Ефективність та інтенсивність гомогенізації зростає з підвищенням температури, оскільки при цьому жир переходить повністю до рідкого стану, що призводить до зменшення в’язкості продукту. За температур нижче 50ºС посилюється відстоювання вершків, що призводить до погіршення якості продукту, внаслідок утворення та відстоювання скупчень молочного жиру. Найбільш оптимальною вважають температуру гомогенізації 55–65°С, за якої утворюється тонка міцна адсорбційна оболонка жирової кульки, яка не має поверхнево-активних ділянок та не схильна до коалесценції [13, 27, 69, 139]. При розробці нових енергоефективних конструкцій для зниження питомих витрат енергії на здійснення диспергування бажано реалізовувати принцип роздільної подачі знежиреного молока та вершків.

1.4. Теоретичні основи процесу гомогенізації

На даний час не існує єдиної теорії диспергування жирових кульок молока при гомогенізації. Ускладненість спостереження процесу руйнування жирової фази пояснюється високими швидкостями її руху, що складають 100–150 м/с та мікроскопічним розмірів жирових часток (0,75–0,80 мкм). Запропоновано багато гіпотез гомогенізації та пристроїв для диспергування, заснованих на основі цих гіпотез, однак жоден з них не може перевершити клапанний гомогенізатор за показниками якості. Теоретичні уявлення процесу гомогенізації містять багато суперечностей, парадоксів та не є загальними, вичерпно пояснюючими теоретичні основи процесу.

Основними гіпотезами гомогенізації є [86, 146, 205]:

– руйнування під впливом дії повздовжнього градієнта швидкості потоку при вході у клапанну щілину (М.В. Барановського);

– руйнування під впливом поперечного градієнту швидкості потоку у клапанній щілині (Ребіндера і Віттінга);

– руйнування за рахунок відцентрової сили при обертальному русі жирової кульки у градієнтному полі швидкостей (В.Д. Суркова);

– руйнування за рахунок кавітації;

– руйнування здуванням мікрочасток з поверхні жирової кульки (М.М. Орешиної);

– гіпотеза субкавітаційної гомогенізації (Є.А. Фіалкової);

– гіпотеза руйнування при створенні максимальної різниці швидкостей дисперсійної і дисперсної фаз (К. О. Самойчука).

Існують також альтернативні гіпотези, що на даний момент не мають вичерпного обґрунтування або не знайшли широкого розповсюдження: вибух у рідині, удар струменю, ультразвукова гомогенізація, утворення мікрольода [86, 140]. Не є виключеним подальший розвиток цих теорій на основі парадоксів гідродинаміки.

Клапанні гомогенізатори, які були одними з перших пристроїв для диспергування досі не втратили домінуючих позицій в промисловості. Дія гомогенізаторів клапанного типу заснована на тому, що молоко нагнітається під тиском до 30 МПа в щілину між сідлом та клапаном. Барановським запропоновано наступну схему механізма руйнування жирової фази емульсії при її проходженні крізь вузьку щілину між клапаном і сідлом. Під тиском продукту клапан утворює з сідлом вузьку кільцеву щілину, висота якої залежить від продуктивності гомогенізатору та робочого тиску диспергування. При цьому висота щілини h1 не перевищує декількох часток міліметру [9, 25, 140, 169]. В гомогенізуючому клапані (рис. 1.1) є місце різкої зміни перетину потока на переході з каналу сідла до клапанної щілини, а, звідси, й місце різкої зміни швидкості.

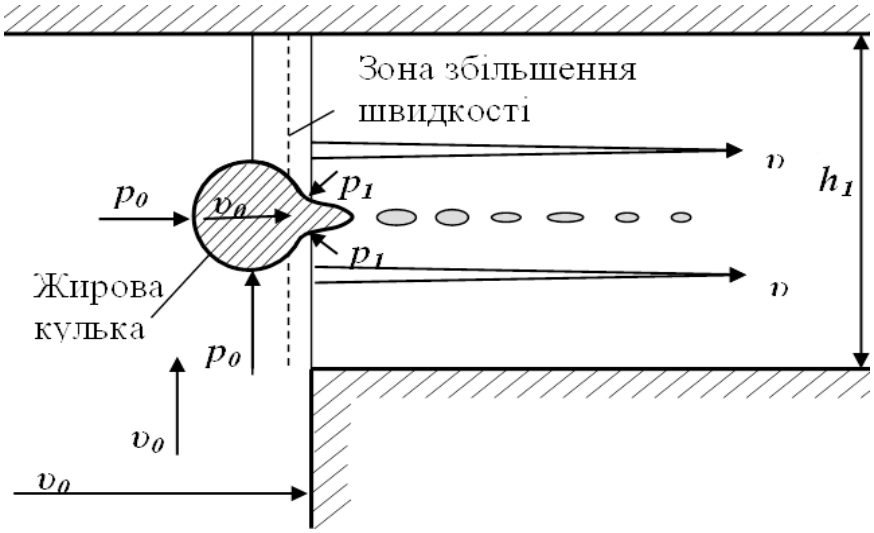


Рис. 1.1. Схема гомогенізації за Барановським.

На підході до щілини швидкість потоку дорівнює v_0, а при вході – v_1, причому перша являє собою величину порядку декількох метрів в секунду, а друга–декількох сотень метрів на секунду [70, 80, 84].

При переході жирової краплі з зони низьких до зони високих швидкостей передні частини жирової кульки включаються до потока в щілині з високою швидкістю v_1, витягуються та відриваються від неї. При цьому інша частина, що знаходиться у потоці та рухається зі швидкістю v_0, продовжує проходити крізь пограничний перетин та поступово віддає свій матеріал знову утвореним часткам. За

великої різниці $\boldsymbol{v_1}$ та $\boldsymbol{v_0}$ крапля може подрібнюватись послідовним відривом часток без проміжкового розтягування всієї краплі в циліндр або шнур. За малої різниці швидкостей $\boldsymbol{v_1}$ та $\boldsymbol{v_0}$ вся крапля може пройти граничний перетин, не встигнув поділитись, але буде деформованою до нестійкого стану, тому повернення її до первинного виду в умовах руху в гідродинамічному потоці в щілині буде неможливим. Під механічною дією потоку та сил поверхневого натягу відбудеться руйнування краплі на дрібні кульки [99, 140].

Така інтерпретація механізму руйнування крапель пояснює експериментальну залежність ступеню дисперсності емульсії від швидкості руху рідини на початку клапанної щілини. Чим вище швидкість $\boldsymbol{v_1}$, тим інтенсивніше витягується рідка нитка з краплі в пограничній зоні, тим тонше ця нитка та дрібніше діаметр частки після її руйнування. Таким чином подрібнюючий ефект гомогенізатора та ефективність процесу залежить від швидкості потоку, що є функцією надлишкового тиску, та визначається згідно гідравлічної залежності $\boldsymbol{\Delta p = p_1 - p_0}$ [139, 155, 202].

Залежність дисперсності від швидкості $\boldsymbol{v_1}$ пояснює зв’язок, встановлений на практиці між ефектом гомогенізації та тиском, оскільки для будь-яких умов швидкість руху молока визначається тиском гомогенізації. Це виражається практично для будь – якого гомогенізатора залежністю дисперсності гомогенізованої емульсії від перепаду тиску $\Delta \boldsymbol{p}$, яка є дійсною для інших гомогенізаторів того ж типу при використанні продукта, який має такі ж властивості.

В клапанах гомогенізаторів продукт піддається механічним впливам, які характеризуються градієнтом швидкості в повздовжньому перетині потоку. Швидкість потоку в напрямку цієї вісі має більш високі значення та зменшується при наближені до стінок. При цьому в тонкому шарі, який безпосередньо прилягає до стінок клапана, градієнт швидкості має високі значення, що обумовлює ефективне диспергування в цій зоні. Однак, враховуючи те, що товщина цього граничного шару може складати десяті або навіть соті долі міліметру, в цій зоні подрібнюється незначний відсоток часток ДФ. Жирові кульки, які знаходяться в зоні високих швидкостей в рідкому стані можуть розтягуватись в нитки та

подрібнюватись на дрібні кульки переважно на вході до клапанної щілини [140, 202].

За гіпотезою Суркова (рис. 1.2) жирові кульки, під дією швидкостей потоку, здійснюють обертальний рух, внаслідок чого виникають відцентрові сили, під впливом яких кульки розриваються на більш дрібні. Для досягнення ефективного руйнування необхідно збільшити швидкість руху рідини за рахунок зменшення величини гомогенізуючої щілини та підвищення тиску диспергування. За таких умов турбулентність потоку буде відсутня, отже не буде впливати на процес диспергування. Суперечності, що містяться в гіпотезах Барановського і Суркова були теоретично спростовані у багатьох наукових працях на підставі парадоксів гідродинаміки [86, 140, 146, 180].

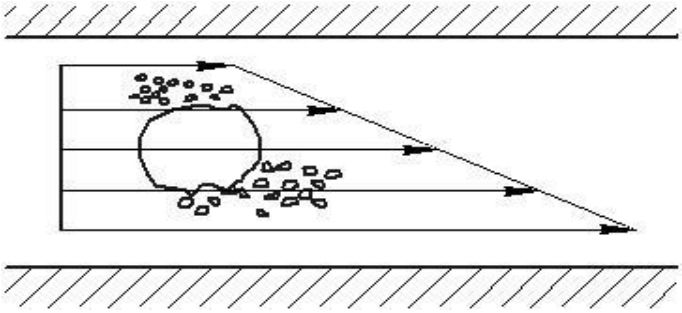


Рис. 1.2. Схема гомогенізації по Суркову

Турбулентність є рухом рідини, яка виникає для перерозподілу її кінетичної енергії під дією сил в'язкості, за твердженнями деяких авторів саме це явище обумовлює руйнування жирових кульок в молоці. За великих чисел Рейнольдса турбулентність розглядають як сукупність вихорів різних розмірів, коли мають місце пульсації швидкості потоку від більших до менших значень, в них швидкість часток, температура та густина мають різні значення в різних точках потоку. Існуючі теорії турбулентності поділяють на дві групи – в першій оперують осередненими властивостями потоку, зокрема такою як шлях змішування Прандтля; у другій використовують статистичні особливості турбулентності (теорія Колмогорова) [50, 65, 147, 166].

Картина руйнування згідно теорії локальної ізотропної турбулентності буде мати такий вигляд. Якщо крапля має діаметр ***d***, то на неї можуть ефективно

впливати пульсації з масштабом $\lambda=d$. Деформація та руйнування краплі відбувається за рахунок кінетичної енергії дисперсійного середовища $E=\rho_м \Delta u_y^2/2$, обумовлена різницею пульсаційних швидкостей Δu_y, що діють на відстані y. Пульсації великого масштабу $(\lambda>y)$, внаслідок малої різниці швидкостей на відстані $y_к$ не можуть бути причиною її деформації. На краплі не можуть впливати й пульсації з масштабами $\lambda<y_к$. Оскільки при розмірах вихорів, які дорівнюють діаметру жирової кульки відбувається збільшення сил в’язкості, які перешкоджають руйнуванню, хибно розглядати цей механізм диспергування як основний [161, 197].

Спираючись на теорію Колмогорова Вальстра [158] запропонував залежність, згідно до якої максимальний діаметр краплі стабільної у турбулентному потоці пов'язаний зі швидкістю підведення енергії до одиниці маси. Розподіл жирових кульок в молоці після руйнування приблизно можна описати законом Гаусу [20, 180], де максимальний розмір жирової кульки буде дорівнювати D_{max} (максимальний діаметр частки, яка може рухатися в потоці без руйнування). Середній діаметр [80, 84, 182] жирової кульки молока після диспергування $d_{ср}$ буде пропорційним D_{max} (1.1):

$$d_{ср}=0,65\, D_{max}\,. \qquad (1.1)$$

Вагомий внесок до теорії розвиненої турбулентності зробив Л.Ричардсон. Згідно з результатами його досліджень в'язкість діє на течію тим сильніше, чим менші значення мають характерні розміри течії, що призводить до збільшення градієнту швидкості. Вихори поступово подрібнюються на більш дрібні та за малих масштабів згасають під дією сил в'язкості. Структури дрібного масштабу забезпечують перенесення руху в потоці та турбулентне перемішування рідини. В цьому випадку спостерігається перенесення об’ємів рідини з мінімальним руйнуванням крапель у потоці [71, 161, 203]. Отже цей механізм також не може бути визнаний як основний фактор, що забезпечує руйнування жирових кульок до менших значень СЖК.

За гіпотезою Ребіндера та Віттінга сутність диспергування полягає в тому, що жирові кульки під дією високих градієнтів швидкостей руху рідини у вузькій щілині витягаються в циліндри і при співвідношенні довжини до діаметру, рівному або

більшому 11, стають нестійкими та розриваються на сферичні краплі дрібного розміру (рис. 1.3). Але одночасно зі зменшенням СЖК відбувається і коалесценція, тобто з'єднання дрібних крапель в конгломерати, діаметром до 1 мкм; при цьому жирові кульки, діаметр яких перевищує 1 мкм, стабілізуються [5, 187, 188].

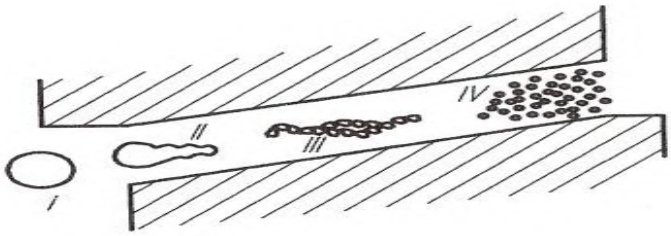


Рис. 1.3. Гіпотеза гомогенізації Ребіндера і Віттінга

За гіпотезами Суркова і Віттінга рушійною силою диспергування є градієнт швидкості потока, який в клапанній щілині тим більше, чим ближче до стінок клапана знаходиться жирова кулька. Основний потік продукту в клапанному гомогенізаторі рухається близько до середини щілини, де градієнт швидкості має невеликі значення, відповідно більша частина кульок при русі в щілині не повинна подрібнюватись, що не відповідає дійсності.

Фіалковою запропонована гіпотеза склювання жирових кульок молока в процесі субкавітаційного руйнування (рис. 1.4).

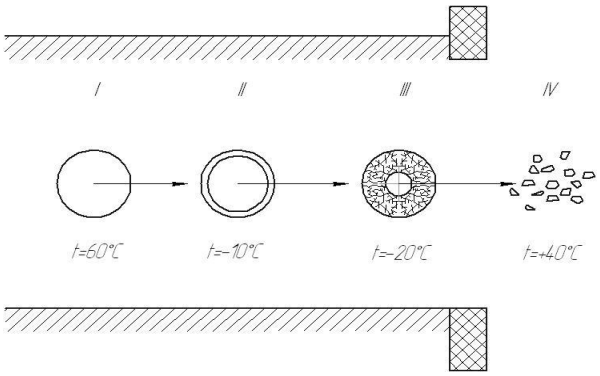


Рис. 1.4. Схема гомогенізації Фіалкової

Згідно до гіпотези Фалкової у зоні великих швидкостей гомогенізатора тиск знижується до значень при яких відбувається застигання кульки та утворення більш дрібних часток за рахунок зіткнення жирових кульок між собою та зі стінками клапанної щілини [145, 146]. Наведені нею поля швидкостей в зазорі клапанного

гомогенізатора із зниженням тиску свідчать про відсутність достатніх значень температури для швидкого застигання жиру, оскільки тривалість гомогенізації в клапанних конструкціях складає 10^{-5} с.

Конструкції ударної дії базуються на обчисленні відносних швидкостей краплі з дисперсійним середовищем та подальше обчислення критерію Вебера. Час, який проходить від досягнення критичного значення числа Вебера до повного руйнування являє собою час індукції [16, 68]. Представлена теорія визначає час дії руйнуючих зусиль як фактор, що обумовлює зміну СЖК дисперсної фази. Але оскільки він складає незначну частину загального часу руйнування, тому в дослідженнях він не виявлений як окремий фактор. Виключенням є теорія дроблення крапель без вдару яка виникла на підставі досліджень, які дозволяють стверджувати, що руйнування може відбуватись в дисперсійному середовищі за відсутності впливів хвиль тиску. Згідно цієї теорії зменшення СЖК може відбуватись у випадку подачі крапель жиру в напрямку перпендикулярному до руху потоку знежиреного молока у вигляді струменю кінцевого діаметру. Теорія також визначає час руйнування як фактор та позначає, що для крапель, які рухаються в дисперсійному середовищі рідини справедливим є імпульсне або імпульсно-квазістатичне руйнування часток. Руйнування крапель відбувається під дією гідродинамічних сил, обумовлених рівністю часу дії навантаження, періодів деформації та власних коливань краплі [24, 72].

Орешина висунула гіпотезу дроблення краплі здуванням дрібних часток, що за принципом руйнування нагадує руйнування в потоці повітря (рис. 1.5). Досліджуючи процеси руйнування крапель олії в рідині при впливі ультразвукових хвиль інтенсивністю 0,5–0,7 МПа при використанні швидкісної кінозйомки дозволили сформувати уявлення відносно стадій процесу руйнування.

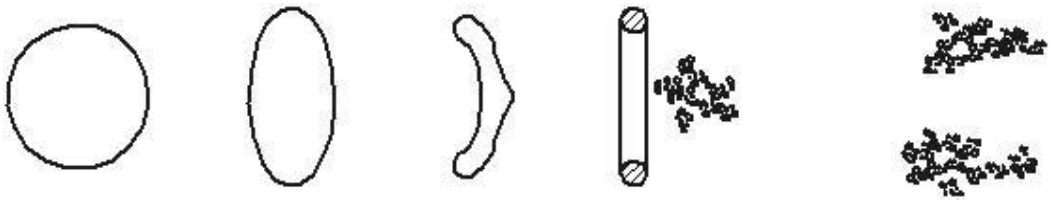


Рис. 1.5. Схема гомогенізації Орешиної

При малих значеннях імпульсів руйнування не відбувається, в той час як при більших значеннях інтенсивності потоку під дією динамічних напорів середовища та різниці швидкостей крапля деформується в дископодібне утворення. Згодом його центральна частина витягується у «парашут», поверхня якого руйнується з утворенням дрібних крапель. Але якщо переносити одержані дані на мікрочастки жиру розмірами на 3 порядки менше крапель, руйнування яких візуально спостерігалось – то тут є труднощі, які пов'язані з вкрай високим втягненням крапель жиру оточуючим дисперсійним середовищем. Тому одержані результати не можуть бути перенесені методами моделювання на руйнування жирових кульок молока. Про це свідчать експериментальні дані значень числа Вебера ($\boldsymbol{We}$), які для диспергуванні молока на 2 порядки більше ніж критичне значення $\boldsymbol{We}$ одержаного для руйнування крапель води у потоці повітря. Це відбувається внаслідок більш інтенсивного втягнення крапель жиру до руху дисперсійного середовища, відносні швидкості мають менші значення внаслідок чого руйнування жирових кульок ускладнюється [86, 87].

Таким чином, останнім часом дослідниками було накопичено величезну кількість експериментальних матеріалів досліджень процесу диспергування. Але безпосередньо спостерігати руйнування часток ДФ науковцям поки що не вдавалось. Ситуацію в цьому напрямі змінили дослідження компанії Alfa Laval, при проведенні яких в гомогенізуючу голівку встановлювались пульсуючі лазери, завдяки чому стало можливо крок за кроком спостерігати послідовність процесу руйнування жирових кульок молока та фіксувати результати за допомогою швидкісної кінозйомки. В результаті отримано висновок, який переважним чином підтверджує гіпотезу Ребіндера і Віттінга, за тією різницею, що в якості фактора, що обумовлює руйнування була виділена різниця швидкості руху різних часток краплі в потоці. Однак, слід зауважити, що отримані дані процесу так і не були представлені широкому колу науковців. З цього моменту не з'явились і нові типи диспергаторів, ефективність яких значно перевищує показники відомих конструкцій [180, 188, 204].

Аналізуючи наведені теорії диспергування і експериментальні дані можливо стверджувати, що визначальним в процесі диспергування жирової фази молока є різниця швидкостей між жировою кулькою та оточуючою дисперсійною фазою ($\Delta \boldsymbol{v}$). Підвищувати цю величину намагались створюючи високі значення поперечного градієнту швидкостей потоку молока, реалізуючи цей принцип наприклад в роторному апараті, але енерговитрати процесу так і не вдалося знизити на значну величину. Основна причина цих невдач полягає у втягуванні жиру потоком плазми, яке викликане малою різницею густини молочного жира і плазми. Тому підвищити енергоефективність диспергаторів можливо створюючи конструкції з роздільною подачею знежиреного молока та вершків, принцип дії яких спрямований на досягнення максимального $\Delta \boldsymbol{v}$, а не на створення максимального градієнту швидкості потоку [105, 118, 124, 126].

1.5. Огляд існуючих конструкцій гомогенізаторів молока

Для рішення задач з диспергування, емульгування полідисперсних рідин використовують диспергатори, гомогенізатори, емульсори. В молочній промисловості прийнято наступну класифікацію між різними видами диспергуючих пристроїв: якщо СЖК складає більше 2 мкм-такий апарат називають емульсором або диспергатором, якщо менше 2 мкм-це гомогенізатор [30, 80, 146].

Мішалки, які створюють умови для руйнування жирової фази, шляхом інтенсивного перемішування, досягнення турбулізації та виникнення вихорів можна відносити до класу гомогенізаторів [14, 30, 202]. Емульсори призначені для розпилювання сумішей двох нерозчинних рідин. Робочий орган має вигляд деякої кількості дисків, які насаджують на трубу, до якої надходить продукт. Деяка кількість дисків, на поверхні яких можуть бути виконані кільцеві та радіальні канали можуть складатись у блоки [70, 140]. Такі види обладнання як емульсори або вібратори, які використовуються для руйнування жирових кульок в потоці є менш ефективними порівняно з конструкціями, заснованими на активних гідродинамічних впливах. Малоефективним (22%) вважається використання високошвидкісного

міксеру (Німеччина), хоча процес гомогенізації в ньому є технічно можливим за умов створення високої частоти обертання робочого органу [33].

Вібратори можуть застосовуватись для обробки жирової фази молока та вершків та є різновидами ультразвукової обробки. При тиску обробки вібратора, значення якого дорівнюють 40–50·10^2 кПа СЖК, не перевищує 2 мкм. При впливі на молоко ультразвукових хвиль вібратора спостерігається бактерицидний ефект. Загальна обсемінненість свіжого молока знижується, залежно від температури та тиску в межах 40–70%. Однак обробка на вібраторі здатна інтенсифікувати розвиток молочнокислих бактерій [140, 205].

До щілинних гомогенізаторів відносять клапанні, гвинтові, філ´єрні конструкції. В них руйнування відбувається за рахунок нагнітання продукта крізь щілину, принцип руйнування в яких розглядався в п 1.4 дисертаційної роботи.

Клапанні гомогенізатори, незважаючи на їх розміри, високі енерговитрати та вібрацію при роботі, отримали найбільше розповсюдження в молокопереробній промисловості. Незважаючи на наявність великої кількості клапанних гомогенізаторів, їх основні техніко-економічні та технологічні параметри коливаються у невеликих межах [80, 140, 142]. Серед іноземних виробників гомогенізаторів клапанного типу відомі наступні фірми: Rannie (Данія), Sonik Engineering Co. (США), Manton–Gaulin (США), Alfa–Laval (Швеція), Stork (Нідерланди), Regis (США), Cherry–Burell (США), Imperial Group. Ltd. (Англія), та ін. [25, 70] Вітчизняна промисловість виготовляє гомогенізатори К5-ОГ2А-250, К5-ОГ2А-500, А1-ОГ2М-2,5, А1-ОГ2М, К5-ОГА-10 П8-ГМ, ОГЗМ, ОГВ, МИ-ОГМ. Показники закордонних клапанних гомогенізаторів несуттєво відрізняються від розповсюджених у вітчизняній промисловості [9, 13, 80]. Більш детальний аналіз клапанних гомогенізаторів надано в додатку В.

Незважаючи на високе середнє значення (78%) коефіцієнту корисної дії клапанних гомогенізаторів можливості їхнього вдосконалення є практично вичерпаними. Зважаючи на це велика частина удосконалень клапанних гомогенізаторів орієнтована на зміну параметрів диспергування. Розглянуті в

додатку В додаткові міри та технологічні рішення при їх впровадженні у виробництво можуть забезпечити лише до 20% енергозбереження [70, 80].

Філ´єрні гомогенізатори діють за принципом протискування продукта крізь спрофільовані отвори, розташовані на однаковій відстані з постійним або регульованим перерізом. Гідродинамічне руйнування ДФ відбувається за рахунок інтенсивної турбулентності та кавітаційних ефектів [56, 72, 143]. Ефективність гомогенізації в них складає 17%, а при більш тривалій обробці може сягати 20% [5, 33, 152].

У відцентрових гомогенізаторах під дією кутової швидкості обертання ротора рідина під тиском проходить крізь сопла або щільові отвори [8, 140]. Ефективність гомогенізації в даному типі гомогенізатора залежить від тиску під дією якого рідина виходить з сопел або щільових отворів ротора, що обертається та ударяється в пристосування для зниження швидкості продукта, при цьому ефективність диспергування складає приблизно 35% [80]. Відцентрові гомогенізатори, за принципом дії схожі на клапанні не набули широкого розповсюдження, оскільки для отримання високого ефекта гомогенізації необхідно створювати високі значення тиску на виході з сопел або щільових отворів ротора, що є технічно проблематичним.

Необхідні для диспергування умови можуть бути досягнуті за умови створення високих швидкостей зсуву. Роторно–пульсаційні апарати забезпечують інтенсифікацію процеса перемішування за рахунок використання активних гідродинамічних режимів в широкому діапазоні частоти коливань, що поєднується з одночасним механічним, гідродинамічним, гідроакустичним впливом на частки ДФ [8]. Принцип дії пульсаційних апаратів для гомогенізації заснований на одночасній дії напружень зсуву, сил кавітації та інерції [10, 46, 96]. Інтенсифікувати процес гомогенізації в роторно–пульсаційних апаратах допомагають такі процеси як турбулізація, кавітація, акустичні ($20…2·10^4$ Гц) та пружні коливання, механічна дія на жирові кульки, пульсації, які виникають при зміні перетину потока [15, 41].

На харчових підприємствах в різноманітних технологічних операціях РПА добре зарекомендували себе як ефективні малооб´ємні змішувачі або емульсори.

Менше розповсюдження вони отримали для гомогенізації різних видів молочної продукції [15, 53, 96]. Роторно–пульсаційні установки (РПУ–0,3; РПУ–0,8; РПУ–1,5) забезпечують отримання високодисперсних емульсій та суспензій. Вони характеризується високою температурою обробки продукта (майже 100ºС), високим ступенем гомогенізації (до 60%) та високими енергетичними витратами [41, 169, 174].

Насоси–гомогенізатори серії НГД є пристроями роторно–пульсаційного типу, які поєднують властивості РПА та відцентрового насоса. В гідродинамічному режимі роботи насоса відбувається пульсаційні перетворення акустичного поля на кавітаційну енергію. Ефективність обробки продукту залежить від часу находження в акустичному полі та розклинюючої дії градієнту швидкості, який в свою чергу залежить від швидкості ротора та напора насосу [162, 163, 176].

Ударний пульсаційний гомогенізатор діє за принципом чергування імпульсів високого тиску та вакуума. Вплив гідравлічних ударів та кавітаційних явищ разом з динамічними ефектами забезпечують інтенсифікацію масообмінних та гідромеханічних процесів [15, 200]. Необхідно підкреслити, що при диспергуванні нормальні напруження не є ефективними, на відміну від дотичних напружень або градієнтів тиску достатньої величини. Тому головну роль в руйнуванні дисперсної фази молока при обробці мають пульсації з від’ємними значеннями [31, 55]. Ці впливи які є ефективними за умови збудження кавітації, в зоні процесу сягають величини, меншої за тиск насичення для даного температурного режиму. Дослідження показали, що при перепаді тиску 12–20 кПа максимальний рівень пульсаційного тиску складає 120–200 кПа, тобто спостерігається десятиразове збільшення енергетичного впливу при реалізації принципу дискретно–імпульсного введення енергії [31, 41, 176].

Одним з рішень роздільної гомогенізації може бути застосування апаратів відцентрового типу–кларіфіксаторів [41, 80]. Дисперсність жирової фази в молоці, обробленому на такому апараті відповідає дисперсності жиру в молоці, отриманому на клапанному гомогенізаторі при тиску 5–8 МПа, а ефективність складає біля 40% .

За принципом дії дискові апарати подібні до циліндричних [84, 146]. Деякі розбіжності між ними полягають в тому що дисковий ротор розташований між двома статорами та обертається в площині, яка розташована перпендикулярно до напрямку руху рідини, що виключає виникнення насосного ефекту, а подача рідини відбувається за рахунок перепаду тиску. Циліндричні апарати, зазвичай мають щільові канали прямокутного перетину, в дискових поряд з прямокутними застосовують канали круглого перетину, які мають різну довжину.

Гомогенізатор фірми Skandinavisk Handelskompani A /S складається з ротора та статора, між якими знаходиться зона гомогенізації, ширина якої складає не більше 2 мм. Поверхня статора, яка обернена до ротора виконана зубчастою, поверхня ротора також може бути зубчастою або виготовляється у вигляді мішалки [80, 140].

Відоме авторське свідоцтво, в якому запобігається піноутворення [33], відцентровий гомогенізатор Лук´янова.Н.Я, який має меншу металоємність, характеризується простотою конструкції та дозволяє досягти ступеню гомогенізації до 70% [84]. В цілому, відцентрові гомогенізатори характеризуються меншою металоємністю, але вони дають недостатньо високий ступінь гомогенізації (55–60%) та мають високі витрати потужності [41, 140, 200].

Гомогенізація молока та вплив на молочні емульсії електрогідравлічного удару досліджувались в МАПБ. В підгрунття цього способу покладено ефект, який виникає в результаті створення надвисоких імпульсних тисків рідині (10000 МПа), що викликають ударні хвилі. Недоліком методу є те, що при обробці може відбуватись коалесценція часток ДФ. Ефект, який досягається при такій обробці є високим–руйнування жирових кульок в 7–8 разів (1,5 мкм). Короткочасний вплив не змінює технологічні властивості молока, але тривала дія ударних хвиль може змінювати смакові характеристики продукту [70, 80, 208].

Ультразвукова дезінтеграція–це тонке руйнування твердих речовин під дією ударних хвиль, які виникають в процесі кавітації. В процесі диспергування, головним чином приймають участь частки з великими значеннями СЖК, а дрібні кульки, які утворюються при руйнуванні відштовхуються кавітаційними або

пульсуючими бульбашками, скопичуються та ускладнюють процес диспергування. Тому необхідно підсилювати потоки, що переміщують частки ДФ в об’ємі молочної плазми. Швидкість потоку дисперсійної фази можна збільшити підвищенням надлишкового статичного тиску в робочій рідині, оптимальна величина якого встановлюється в залежності від амплітуди механічних коливань випромінювача [174, 193, 200].

Дослідження гомогенізації, яка відбувається під дією ультразвукових коливань, які генеруються за допомогою перетворювача вібраційного типу дозволили встановити, що в діапазоні низьких частот, де найкраще відбувається емульгування простим та економічним джерелом ультразвуку є гідродинамічний вібратор. На виході з сопла закрученого потока виникають найбільш інтенсивні вихори, які створюють коливання, які ще більше посилюються встановленим на виході трубки–резонатором, який утворює в потоці рідини кавітаційні порожнини [57, 82]. Величина корисного ефекту при цьому залежить від кількості енергії, що витрачається на створення кавітації. Але її значення не можуть бути високими, оскільки за таких умов спостерігається незначне збільшення ефективності диспергування [80, 83].

Сучасна промисловість випускає широку лінійку ультразвукових апаратів [83, 156]. За кордоном розробка гомогенізаторів цього типу здійснюється фірмами Sonic Engineering Corp. (США), Remia BV (Нідерланди) та підприємствами Фінляндії та Франції [14, 70, 162]. Руйнування жирових кульок можна проводити за допомогою багатофункціонального ультразвукового апарату–електронного фотоміксера «АЛЕНА», який дозволяє отримувати більш 80% від загальної кількості жирових кульок з СЖК менше 2 мкм [193, 200].

Ультразвуковий метод емульгування відноситься до ефективних способів диспергування, оскільки ступінь емульгування складає 95%. Метод забезпечує високий ступінь дисперсності (0,1–0,5 мкм) та стійкість емульсії при тривалому зберіганні. Металоємність та енергоємність такого гомогенізатору порівняно з гомогенізатором ОГМ такої ж продуктивності нижче в 5–7 разів. Стійкість таких емульсій значно переважає аналогічний показник для емульсій, отриманих іншими

способами, крім цього, емульсії з таким розміром часток не розшаровуються на протязі тривалого часу при зберіганні [33, 152]. Недоліком використання ультразвуку є той факт, що впровадження акустичних технологій обумовлює необхідність коригування параметрів технологічних процесів. Недостатньо дослідженим є вплив ультразвуку на зміну фізико-хімічних властивостей молока та його компонентів. Відомо, що в молоці може з'явитись присмак топленого молока, спостерігається суттєве зниження в'язкості молока, що вказує на деструкцію білкових сполук [83, 174].

Інститутом технічної теплофізики НАН України на основі методу дискретно–імпульсного введення енергії запропонований новий метод гомогенізації та обладнання для його здійснення: вакуумні гомогенізатори ВГ–5, В–5М та ВГ–10 [43, 80]. Дія вакуумних апаратів заснована на використанні ефекту адіабатичного скипання попередньо перегрітого до температури пастеризації або стерилізації потоку молочної емульсії. При цьому гідродинамічне руйнування жирових кульок здійснюється за рахунок динамічного руху парових пухирців, а також кавітаційних ефектів. Серед факторів, які впливають на показники якості виділяють наступні: температуру перед руйнуванням, значення вакууму, концентрацію жиру в молоці [44, 46, 47, 66].

Проведені досліди показали, що ВГ–5 характеризується дещо більшим, порівняно з А1–ОГМ СЖК 1,7мкм проти 1,2мкм, а широта їх розподілу прирівняна до клапанної. Але при цьому ВГ–5 характеризується в 2,3 рази меншою енергоємністю та в 3 рази меншою металоємністю. Вакуумна гомогенізація дозволяє уникнути недоліків клапанних машин у відношенні забезпечення стабільності продукту. При обробці в машинах цього типу спостерігається зниження кислотності, підвищення термостійкості, дегазація, дезодорація та пригнічування мікрофлори [42, 43, 47].

Кавітаційний змішувач–перетворювач використовується для диспергування в паливній, харчовій, лакокрасочній, нафтовій промисловості. Установка забезпечує рівномірний розподіл СЖК після диспергування в діапазоні 0,5–2 мкм та

стабільність суміші через 30–50 діб після обробки, однак має високі питомі енерговитрати.

Сопловий агрегат марки ОГВ, розроблений Грановським, згідно проведених досліджень забезпечує більший ефект гомогенізації ніж клапанний при більш низькому тиску, та відповідно енерговитратах. При тиску до 10 МПа його ефективність складає не нижче 70%, а СЖК дорівнює 1,2 мкм. Робоча частина гомогенізатору складається з двох камер в кожній з яких часткам надається спочатку обертального руху, потім–поступального. Руйнування відбувається при проходженні продукту крізь калібровані отвори при нагнітанні з однієї камери в іншу [32, 33, 70].

У вихровому гомогенізаторі вихори поділяються на два потоки: основний, який знаходиться у центрі та являється визначальним в процесі гомогенізації та пристінний, що виключає вихід необробленого продукту. Шляхом регулювання відстані в кільцевій щілині встановлюються оптимальні режими роботи пристрою [146]. Аналітичні дослідження вихрової трубки з використанням теорії вихорних та циркуляційних потоків свідчать, що в центральній частині вихрової гомогенізуючої головки має місце протяжна ділянка, розташована вздовж всієї зони наднизьких тисків, де і відбувається процес диспергування [145, 200]. Рушійною силою процесу є наднизькі тиски з наступним явищем низькотемпературної кавітації. Застосування нової гідродинамічної теорії дозволяє встановити, що жирові кульки, попадаючи до зони низькотемпературної кавітації стають твердими, а поверхні стають крихкими та легко подрібнюються при зіткненні з кристалічним льодом, при цьому відбувається руйнування часток ДФ (за гіпотезою висунутою Фіалковою). Дослідники процесу стверджують, що даний спосіб забезпечує високу ефективність руйнування жирових кульок при використанні вихрового ефекта Ранка–Хільша. Однак енерговитрати метода є ще надто високими: при потужності 19 кВт та тиску гомогенізації 12,5 МПа СЖК складає 1,05 мкм [14, 146].

Перспективним шляхом інтенсифікації диспергування та гомогенізації є створення конструкцій, які збільшують турбулізацію та завихрення потоків за зниження енергоємності та металоємності. Пристрої для гомогенізації струминного

типу можуть бути одноструминні та двоструминні. Відомими конструкціями струминних гомогенізаторів є: ударні струминні, струминно–вихрові, струминні в об’ємі протитечійно–струминні, струминні гомогенізатори молока з роздільною подачею вершків. Гомогенізація відбувається за рахунок енергії струменю, частково кавітації, створення інтенсивних турбулентних пульсацій та реалізації принципу максимальної різниці швидкостей дисперсійної та дисперсної фаз [28, 115, 119, 123].

Протитечійно–струменевий гомогенізатор (рис. 1.6 а) складається з енергетичного вузолу та форсунок, куди нагнітається молоко [73]. З метою покращення характеристик процесу гомогенізатор може мати роздільну подачу вершків та знежиреного молока [91 92, 131]. Результати попередніх досліджень свідчили, що гомогенізація в ньому обумовлена виникненням кумулятивного ефекта при зіткненні струменів [115], однак подальші дослідження не підтвердили це [122, 131].

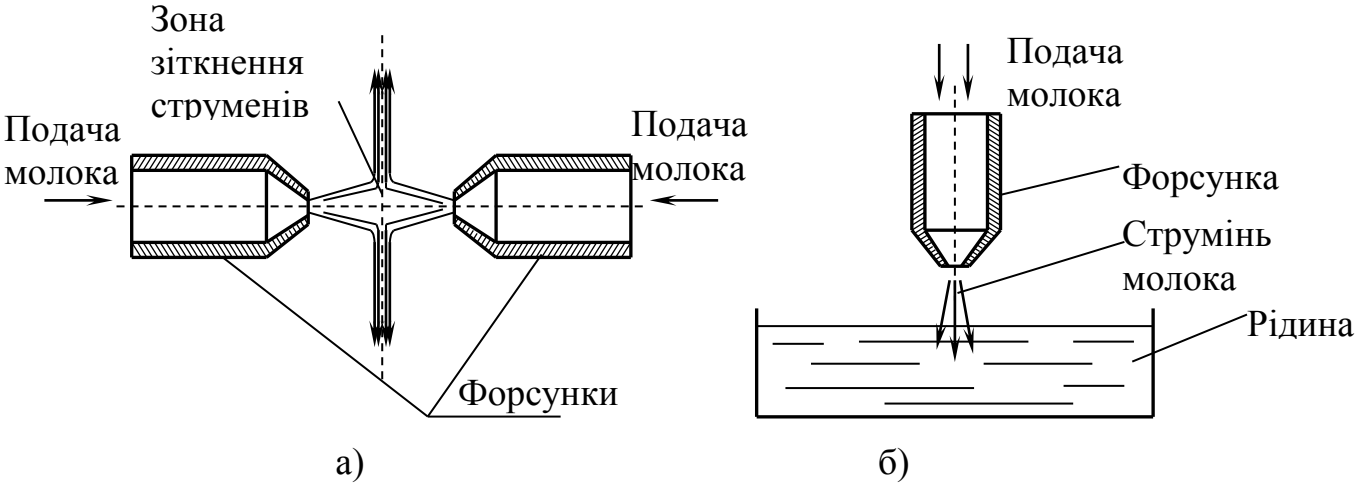


Рис. 1.6. Схема протитечійно–струминного гомогенізатора молока а)схема протитечійно–струминного гомогенізатора молока; б)схема струминного гомогенізатора, в якому диспергування відбувається в об’ємі рідини.

Протитечійно-струминний гомогенізатор молока забезпечує руйнування до середнього розміру часток близько 1 мкм при зниженні питомих енерговитрат у 3 рази порівняно з клапанним гомогенізатором [115]. 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 ежектування вершків до потоку знежиреного молока через форсунки у певному відношенні. Однак вони здатні забезпечити зменшення розмірів жирових кульок лише до 1,1 мкм, що більше ніж вимагають технологічні вимоги 0,75–0,80 мкм [91, 92].

Струминні гомогенізатори використовують для руйнування жирової фази енергію гідравлічного потоку [28, 122]. Якщо молоко під тиском подавати у вигляді струменю під рівень іншої рідини, наприклад знежиреного молока або пахти, також буде здійснюватися диспергування жирових кульок молока (рис. 1.6 б) [21, 38]. Ударні струменеві працюють за принципом зіткнення під тиском продукту, який надходить з форсунки з відбивачем, що може мати різну форму поверхні. Руйнування в даному випадку відбувається за допомогою градієнтів швидкості при створенні в каналі пульсацій, а також при зіткненні з пластиною [48, 200]. Такий тип гомогенізатора менш енергоефективний, ніж протитечійно-струминний, внаслідок чого його подальші дослідження припинені.

Пристрій для проведення струминної гомогенізації молока з роздільною подачею вершків складається з камери гомогенізації, утворюючі якої формують місце найбільшого звуження, у якому до знежиреного молока, що рухається з високою швидкістю, подаються вершки (рис. 1.7) [122, 132, 133].

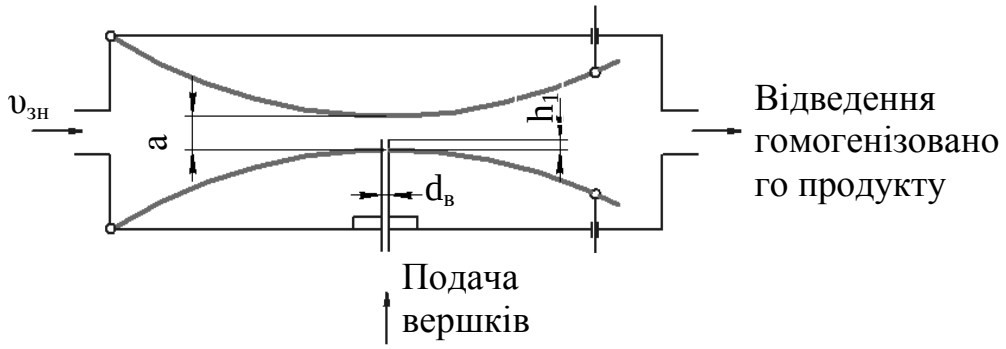


Рис. 1.7. Схема струминного гомогенізатора молока з роздільною подачею вершків

В ході аналізу світових видань були виявлені наступні напрямки зниження енергоємності струминних гомогенізаторів молока за умови забезпечення технологічно заданих розмірів СЖК на рівні 0,75–0,80 мкм:

– інтенсифікація процесу руйнування за рахунок зміни параметрів потоку [165, 204, 207];

– підбір оптимальної форми робочої камери [171, 176, 201];

– дослідження і вдосконалення конструкції Т-подібного та П-подібного міні міксерів [168, 172, 175, 196];

– створення конструкцій, в яких реалізується принцип максимальної різниці швидкостей фаз між дисперсним і дисперсійним середовищем [103, 122].

Використання Т-подібного мініміксеру забезпечує подачу знежиреного молока по двох каналах, які розташовані перпендикулярно до потоку вершків, що рухається з більшою швидкістю [172, 178, 196], на рівні, що наближується до клапанних зразків. Але конструкція міксеру характеризується високими енергетичними витратами, які необхідні для впорскування знежиреного молока [167, 177].

Дослідження процесу зменшення розміру жирових кульок, що відбувається за рахунок зміни робочого перетину камери [181, 206] мініміксеру не забезпечує достатнього ступеню руйнування 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 [191, 205].

Дослідження, стосовно зміни гідродинамічного режиму роботи міксеру також не виявили суттєвого резерву для зниження енергетичних витрат процесу [166, 169, 197]. Використання мікроканалу у міксеру доцільно за думкою авторів тільки при впливі на центральну частину струменю, що забезпечує режим активних гідродинамічних пульсацій [165, 174, 188].

Таким чином, найбільш ефективним шляхом зниження енергетичних витрат при одночасному отриманні продукту, СЖК якого знаходиться на рівні клапанних конструкцій є розробка та впровадження струминних гомогенізаторів молока,

щілинного типу, принцип дії яких базується на створенні максимальної різниці між швидкостями дисперсійної та дисперсної фаз [103, 108, 109, 110].

Висновки за розділом 1

Метою дисертаційних досліджень є зниження енергетичних витрат процесу при забезпеченні високої якості гомогенізації молока шляхом обґрунтування конструктивно-технологічних та гідравлічних параметрів струминно-щілинного гомогенізатора молока з роздільною подачею вершків. Перед проведенням досліджень була висунута наукова гіпотеза, сутність якої полягає в зниженні енерговитрат гомогенізації молока за рахунок подачі струменя вершків у потік знежиреного молока крізь кільцеву щілину У відповідності до зазначеної мети, було поставлено та вирішено такі задачі:

1– провести аналіз гіпотез руйнування жирових кульок при гомогенізації та існуючих конструкцій гомогенізаторів молока і визначити основні механізми, за якими відбувається диспергування дисперсної фази молочної емульсії для струминно-щілинного гомогенізатора молока з роздільною подачею вершків;

2– розробити математичну модель гомогенізації жирової фази молока, яка пов'язує гідравлічні, конструктивні, технологічні параметри з критерієм Вебера, енергетичними та якісними показниками процесу в струминно-щілинному гомогенізаторі молока;

3– встановити закономірності, які пов'язують середній діаметр жирових кульок після диспергування та критерій Вебера з параметрами кільцевої щілини;

4– розробити методику для розрахунку й обґрунтувати конструктивне рішення промислового зразку струминно-щілинного гомогенізатора молока;

5– здійснити впровадження результатів досліджень у виробництво і оцінити техніко-економічну ефективність використання струминно-щілинного гомогенізатора молока.

РОЗДІЛ 2
ТЕОРЕТИЧНІ ОСНОВИ ПРОЦЕСУ СТРУМИННО–ЩІЛИННОЇ ГОМОГЕНІЗАЦІЇ МОЛОКА

2.1 Програма теоретичних та експериментальних досліджень

В ході подальших досліджень було розроблено схему досліджень (рис. 2.1)

Рис. 2.1. Структурна схема проведення досліджень

Програма досліджень струминно-щілинного гомогенізатора молока (рис. 2.1) передбачає проведення аналітичних та експериментальних досліджень, отже необхідно розробити поетапну програму для кожного з етапів досліджень.

Програма теоретичних досліджень

Основною задачею проведення теоретичних досліджень є: обґрунтування параметрів та режимів роботи СЩГРВ для отримання дисперсності молочної емульсії, на рівні технологічних вимог при мінімальних енерговитратах процесу [103, 114, 127].

Програмою теоретичних досліджень передбачалась розробка аналітичної моделі гомогенізації молока у СЩГРВ, яка заснована на створенні максимальної різниці швидкостей руху дисперсійної і дисперсної фаз продукту, як основного фактору диспергування вершків у молочній емульсії і яка пов'язує основні технологічні, гідравлічні, конструктивні та енергетичні показники СЩГРВ з дисперсністю жирової емульсії молока. Для цього необхідно:

1 – визначити сили, які діють на жирову кульку з боку потоку, виявити механізми руйнування жирових часток молока під час струминно-щілинної гомогенізації та виявити фактори, які впливають на цей процес;

2 – визначити швидкості руху знежиреного молока та вершків як основних факторів диспергування жирової фази молока;

3 – визначити вплив продуктивності та жирності вершків на якісні та енергетичні показники гомогенізатора;

4 – визначити вплив форми внутрішньої поверхні камери на якісні та енергетичні показники СЩГРВ;

5 – отримати формули для розрахунку дисперсності й енерговитрат гомогенізатора та їх зв'язок з конструктивними, гідравлічними та технологічними параметрами гомогенізатора (математичну модель СЩГРВ);

6 – шляхом аналізу отриманої математичної моделі гомогенізації визначити раціональні та оптимальні значення факторів СЩГРВ для отримання заданого ступеню диспергування при мінімальних енерговитратах.

2.2 Аналіз сил, факторів і механізмів, які обумовлюють диспергування молочного жиру в струминно–щілинному гомогенізаторі молока

2.2.1 Характеристика сил, які діють на жирову кульку

В турбулентному потоці знежиреного молока, жирові частки приймають участь в поступовому, вихровому та коливальному русі, які створюються турбулентними вихорами, тобто рух часток ДФ відбувається за складними траєкторіями. Поверхневі сили, які діють в гомогенізуючому вузлі струминно–щілинного гомогенізатору можуть бути нормальними, які діють як в рухомій так і в нерухомій рідині та дотичними, які виникають лише при русі рідини та у випадку деформації та руйнування часток. До сил, величини яких є пропорційними до площі частки відносять сили поверхневого натягу та в'язкого тертя, що проявляється при русі рідини. Сили в'язкого тертя мають вплив на процес в межах граничного шару. Сили поверхневого натягу будуть мати незначний вплив на процес гомогенізації, до того ж вони будуть зменшуватись при підвищенні температури та додаванні емульгаторів, тому ними можна знехтувати [95, 166, 188].

На жирову кульку, що рухається в потоці дисперсійного середовища діють масові К та поверхневі сили Р, що виражаються через власні проекції на координатні вісі (Рис. 2.2) [159, 166].

$$\boldsymbol{K} = \boldsymbol{i}x + \boldsymbol{j}y + \boldsymbol{k}z, \tag{2.1}$$

$$\boldsymbol{P} = \boldsymbol{i}P_x + \boldsymbol{j}P_y + \boldsymbol{k}P_z, \tag{2.2}$$

$$\boldsymbol{P}_x = \boldsymbol{i}\delta_x + \boldsymbol{j}\tau_{xy} + \boldsymbol{k}\tau_{xz}, \tag{2.3}$$

$$\boldsymbol{P}_y = \boldsymbol{i}\tau_{yx} + \boldsymbol{j}\delta_y + \boldsymbol{k}\tau_{yz}, \tag{2.4}$$

$$\boldsymbol{P}_z = \boldsymbol{i}\tau_{zx} + \boldsymbol{j}\tau_{zy} + \boldsymbol{k}\delta_z, \tag{2.5}$$

де δ_x, δ_y, δ_z – нормальні напруження прикладені до боків паралелепіпеду та спрямовані паралельно до відповідних координатних вісей;

τ – дотичні напруження, що позначаються двома індексами з яких перший вказує до якої вісі перпендикулярна площадка, яка розглядається, а другий вказує ту вісь паралельно якій спрямовані дотичні напруження, які розглядаються.

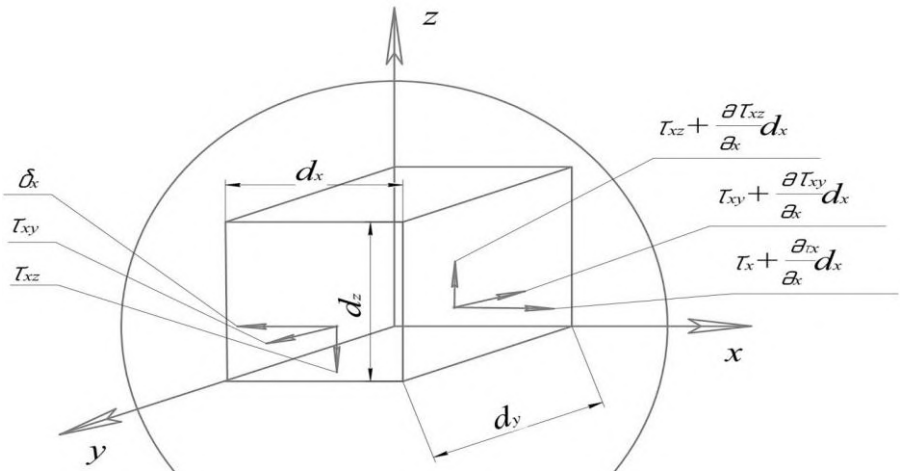


Рис. 2.2. Рух струменю дисперсної фази в потоці знежиреного молока

За базову теорію, яка описує рух струменю в потоці знежиреного молока приймаємо теорію граничного шару Шліхтінгу [159, 204]. Градієнт тиску в напрямку до вісі руху $\partial p/\partial y$ є малим порівняно з величиною $\partial p/\partial x$, тобто тиск є функцією тільки повздовжньої координати x, тому силами, що обумовлюють градієнт тиску на цій ділянці можна знехтувати. Про незначну величину тиску в основній ділянці камери гомогенізатору свідчать численні експерименти по його замірюванню в затоплених турбулентних струменях [1, 50, 95]. Таким чином, задача визначення характеру течії зводиться до вирішення системи рівнянь [4, 12]

$$u_x \frac{\partial u_x}{\partial x} + \upsilon_y \frac{\partial u_x}{\partial y} + \omega_z \frac{\partial u_x}{\partial z}, \tag{2.6}$$

$$\frac{\partial u_x}{\partial x} + \frac{\partial \upsilon_x}{\partial y} = 0, \frac{\partial p}{\partial y} = 0. \tag{2.7}$$

Для молока, як рідини, справедливе твердження за яким напруження пропорційні до швидкостей деформації, зв'язок між якими встановлюється законом Ньютону [12, 166]. Тоді рівняння руху вздовж вісі x можна записати як

$$\rho\frac{du}{dt}+\rho u\frac{du}{dx}+\rho\upsilon\frac{du}{dy}+\rho\omega\frac{du}{dz}=x+(\frac{\partial\delta_x}{\partial x}+\frac{\partial\tau_{yx}}{\partial y}+\frac{\partial\tau_{zx}}{\partial z}), \qquad (2.8)$$

в напрямках y та z

$$\rho\frac{dv}{dt}+\rho u\frac{\partial\upsilon}{\delta x}+\rho\upsilon\frac{\partial\upsilon}{\delta y}+\rho\omega\frac{\partial\upsilon}{\partial z}=y+(\frac{\partial\tau_{xy}}{\partial x}+\frac{\partial\delta_y}{\partial y}+\frac{\partial\tau_{zy}}{\partial z}), \qquad (2.9)$$

$$\rho\frac{d\omega}{dt}+\rho u\frac{\partial\omega}{\partial x}+\rho\upsilon\frac{\partial\omega}{\partial y}+\rho\omega\frac{\partial\omega}{\partial z}=z+(\frac{\partial\tau_{xz}}{\partial x}+\frac{\partial\tau_{yz}}{\partial y}+\frac{\partial\delta_z}{\partial z}), \qquad (2.10)$$

Тертя в граничному шарі, згідно гіпотези Ньютону є пропорційним до градієнту швидкості в напрямку нормалі до поверхні тіла (Рис. 2.1) [20].

Середня швидкість потоку згідно з [151, 166] дорівнює

$$u_c=\sqrt{\frac{17,8\sigma}{d_к\rho_{пл}}}. \qquad (2.11)$$

Градієнт швидкості в напрямку перпендикулярному до стінки, при значенні середньої швидкості знежиреного молока u_c=**24,5** м/с, визначеного згідно формули (2.11) коливається в діапазоні значень від 2000 до 38610.

$$\frac{du}{dy}\approx u_c/\delta, \qquad (2.12)$$

де δ – товщина граничного шару, величина якої згідно наведених формул (Г.3) та (Г.4) дорівнює відповідно $1,2\cdot10^{-3}$ та $3,8\cdot10^{-2}\ldots5,3\cdot10^{-2}$мм.

Для турбулентного потоку знежиреного молока, який виникає при збільшенні числа ***Re*** характерно наступне: гальмуюча дія стінок камери створює нерухому кільцеву плівку, всередині якої рухається дисперсійна фаза. Створена плівка розповсюджує свій вплив на деяку відстань від стінок, створюючи шар, в якому за дослідженнями Прандтля рідина рухається ламінарно. В ньому швидкість зростає від нуля біля стінок до максимуму на вісі, а інша частина потоку рухається турбулентно у внутрішньому кільці простору камери [90, 153].

Досліди Г.Райнхардта показали, що поперечні пульсації змінюються за шириною каналу порівняно мало та складають біля 4% від середньої швидкості потоку u_c, згідно (2.3) їх значення складають 0,96 м/с, повздовжні пульсації мають

виражений максимум близько від стінок камери, що дорівнює 0,13 u_c, тобто 3,18 м/с. Аналітичні дослідження свідчать, що поперечні складові швидкості в будь–якому перетині струменю мають низькі значення (в 3 рази менше за повздовжні), тому в першому наближенні ними можна знехтувати [61, 74, 90, 173].

Згідно тверджень Ньютону при русі шарів рідини між ними з'являються дотичні напруження що є пропорційними до градієнту зміни швидкості $\partial u/\partial y$, площі зіткнення шарів рідини, залежать від роду рідини та дуже незначно від тиску. Нормальні напруження значного впливу не мають, але величина дотичних напружень набуває істотних величин, особливо в граничному шарі. Тертя в граничному шарі, згідно гіпотези Ньютону є пропорційним до градієнта швидкості в напрямку нормалі до поверхні тіла (Рис. 2.3) [8, 20, 151].

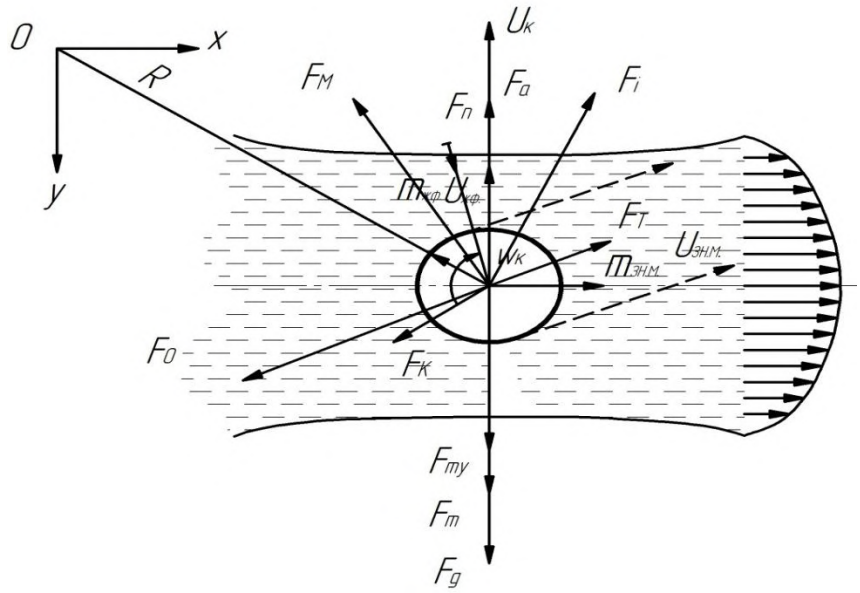


Рис. 2.3. Схема сил, які діють на жирову кульку в струминно–щілинному гомогенізаторі молока

Важливим є врахування сил міжфазної взаємодії, що викликане різницею швидкостей дисперсійної та дисперсної фаз, оскільки в більшості випадків дія сил опору є вирішальною. Сили в'язкого опору пропорційні до радіусу часток та є одними із визначальних сил, які діють на кульку з боку дисперсійної фази [159, 202].

$$F_0 = 6\pi r_k \mu_м (\upsilon_{зн} - \upsilon_в), \qquad (2.13)$$

де $\upsilon_{зн}$ – швидкість дисперсійної фази; м/с;

r_k – радіус жирової частки; м;

$\upsilon_в$ – швидкість жирової кульки; м/с.

Або у вигляді (2.14) [12, 60]

$$F_0 = \frac{1}{8}\rho_{пл} C_д d^2 \left|\upsilon_{зн} - \upsilon_в\right| (\upsilon_{зн} - \upsilon_в), \qquad (2.14)$$

де $C_д$– коефіцієнт опору руху для н'ютоновської ділянки течії дорівнює 0,44.

Частка ДФ представляє собою жирову кульку діаметром d, м та густиною $\rho_в$,кг/м^3, яка рухається у плазмі молока густиною $\rho_{пл}$, кг/м^3 та кінематичною в'язкістю ν, м^2/с зі швидкістю $\upsilon_{зн}$, м/с. При цьому на неї діє сила опору F_0, Н. Концентрація жиру в молоці не перевищує 2,5–4,0 %, тому можливо знехтувати взаємним впливом жирових кульок одна на одну. Для описання залежностей між параметрами $\upsilon_{зн}$, d, $\rho_в$, $\rho_{пл}$, ν та F_0 використовуємо відомі формули [40, 60, 204].

$$F_0 = \frac{1}{8} Ne \upsilon_{зн}^2 \pi d^2 \rho_{пл}, \qquad (2.15)$$

де Ne – критерій Ньютона.

Критерій Ньютона визначається в залежності від характеру руху рідини, що в свою чергу залежить від безрозмірного критерію Рейнольдса Re

$$Re = \frac{\rho_{пл} \upsilon_{зн} d}{\nu}. \qquad (2.16)$$

Критерій Рейнольдса визначає співвідношення сил інерції та в'язкості в однорідному потоці. При русі потоку знежиреного молока, в ньому виникають збудження, які поширюються від стінок каналу, або при збільшенні надлишкового тиску подачі знежиреного молока. Вплив збудження залежить від співвідношення сил: якщо переважають сили інерції при значеннях $Re > Re_{кр}$ – збудження розвивається, збільшується ступінь турбулізації потоку. Зміна гідродинамічних параметрів в значній мірі визначає протікання тепломасообмінних процесів між жировою кулькою та знежиреним молоком. Навіть при малих швидкостях та числах Рейнольдса $Re=60–128$ виникає перемішування шарів рідини, що призводить до мікротурбулізації потоку та як наслідок до збільшення хаотичного руху часток [71, 77, 95]. При $500<Re<200000$ режим руху турбулентний. При цьому

$$Ne = 0,45, \qquad (2.17)$$

тоді

$$\upsilon_{зн} = \varphi_к \sqrt{\frac{2}{\rho_м}} \Delta p. \qquad (2.18)$$

Для дослідження процесу струминно–щілинної гомогенізації вихідними параметрами є: надлишковий тиск $\Delta p = 1 \cdot 10^6 \ldots 9 \cdot 10^6$ Па, коефіцієнт швидкості для насадків циліндричного типу дорівнює $\varphi_к = 0,8$, середній діаметр жирової кульки $d = 3 \cdot 10^{-6}$ м, коефіцієнт в'язкості $\nu = 1,5 \cdot 10^{-6}$ м^2/с, густина плазми $\rho_{пл} = 1030$ кг/м^3, поверхневий натяг на границі жир-плазма $\sigma = 0,1$ Н/м.

Виходячи з правила Антонова [139, 182], $\sigma_{ж\text{-}п}$ можна визначити різницю поверхневих натягів жиру та плазми відносно загального середовища

$$\sigma_{ж-п} = \sigma_п - \sigma_ж, \qquad (2.19)$$

де $\sigma_п$ – поверхневий натяг на межі розділу фаз плазма – повітря, Н/м, $\sigma_п = 0,054$ Н/м (табл. 1);

$\sigma_ж$ – поверхневий натяг на границі фаз жир – плазма, Н/м, $\sigma_ж = 0,030$ Н/м (табл. 1.1).

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

Згідно формул (2.15), (2.16) та (2.18) швидкість струменю знежиреного молока та числа Рейнольдса коливається в діапазоні значень $\upsilon_{зн} = 35,2 \ldots 105,5$ м/с; $Re = 70173 – 217330$, $F_0 = 2 \cdot 10^{-6} \ldots 1,8 \cdot 10^{-5}$ Н.

Сила опору F_0 при русі жирової частки викликає перепад тиску $\Delta p_к$, Па, між внутрішньою та зовнішньою фазами кульки, яка деформує та розриває її:

$$\Delta p_k = \frac{F_0}{\omega}, \qquad (2.20)$$

де ω – площа миделеєвого перерізу, тобто проекції краплі на площину, перпендикулярну до напряму швидкості, м^2 [4, 50]

$$\omega = \frac{\pi d^2}{4}, \qquad (2.21)$$

тоді

$$\Delta p_k = \frac{1}{2} Ne \rho_{пл} \upsilon_{зн}^{\ 2}. \qquad (2.22)$$

При низькому перепаду тиску $\Delta p_к$ крапля деформується, але не розривається завдяки поверхневому натягу σ, який обумовлює перепад тиску Δp_σ, Па, який для жирової кульки буде дорівнювати [20, 169].

$$\Delta p_\sigma = \frac{4\sigma}{d_0}. \qquad (2.23)$$

Якщо $\Delta p_к$ перевищує Δp_σ, відбувається руйнування жирової кульки:

$$\Delta p_k \geq \Delta p_\sigma. \qquad (2.24)$$

В діапазоні досліджуваних значень $\Delta p_к$ перевищує значення Δp_σщонайменше у декілька разів, складає для швидкості ***35,2*** м/с, $2{,}9 \cdot 10^5 \geq 1{,}3 \cdot 10^5$ при швидкості ***105,5*** нерівність (2.24) закономірно приймає ще більш виразний характер.$2{,}6 \cdot 10^6 \geq 1{,}3 \cdot 10^5$**.**

Завдяки перемішуванню рідини та перенесення жирових кульок в поперечному напрямі дотичні напруження на стінці конфузору в турбулентному потоці значно більше ніж в ламінарному, визначених за численних значеннях ***Re*** та тиску, підрахованих за середньою швидкістю потоку. Відповідно рух кожного елементу рідини прискорюється внаслідок перепаду тиску та гальмується внаслідок напружень зсуву, викликаних тертям. Сили інерції в граничному шарі [19, 50, 65].

$$F_i = \rho_{пл} l_{зм}^{\ 2} \upsilon_в^2, \qquad (2.25)$$

де $l_{зм}$ – довжина шляху змішування Прандтля.

$$F_i = \rho_{пл} \frac{du}{dt} dxdydz, \qquad (2.26)$$

Метод зникаючої в'язкості полягає в наступному: за великих значень чисел Рейнольдса головний вплив сил в'язкості проявляється в граничному шарі, а за його межами рідину можна вважати ідеальною. Якщо $\mu \to 0$, що рівнозначно $Re \to \infty$, то згідно формули Прандтля товщина граничного шару в якому діють сили в'язкості також прагне до нулю [74, 77]. Стрімка зміна швидкості всередині граничного шару призводить до того, що в його межах сили тертя є незначущими, та мають той же порядок що сили інерції [95, 151]. Але, оскільки величина граничного шару,

визначена у додатку Г має незначні значення, метод зникаючої в’язкості не може використовуватись для опису стану жирової кульки за його межами.

На деякій відстані від поверхні стінок камери, сили інерції переважають внаслідок малої в'язкості. В'язкість рідини є стабілізуючим фактором, що ускладнює розвиток хвильових явищ, при збільшеній поверхні натягу спостерігається уповільнення процесу руйнування часток ДФ [1, 20, 90].

За межами граничного шару силами тертя можливо знехтувати зважаючи на їх незначущість порівняно з силами інерції. В межах граничного шару порядок цих сил приблизно однаковий.

$$\mu_м \frac{\upsilon_{зн}}{\delta^2} \sim \frac{\rho_{пл}\upsilon_{зн}}{\delta l_\delta}, \qquad (2.27)$$

де l_δ – довжина ділянки, на яку розповсюджується граничний шар, м.

На частку може впливати сила що спрямована під прямим кутом до напрямку руху частки та намагається відхилити жирову частку у напряму обертання її передньої частини, що зветься ефектом Магнуса [71, 95, 204]

$$F_м = \frac{1}{4}\pi^2 d^2 \rho_{пл}(\upsilon_{зн} - \upsilon_в)\omega_k, \qquad (2.28)$$

де $\omega_к$ – кутова швидкість обертання жирової кульки, рад/с.

$$\omega_k = \omega_a \left[1 - exp(\frac{-60\mu t}{d^2 \rho_{пл}}) \right], \qquad (2.29)$$

де ω_a – кутова швидкість обертання жирової кульки відносно центру кривизни лінії плину.

Сила Коріоліса за [12, 50] дорівнює

$$F_k = -2m\omega_a(\upsilon_{зн} - \upsilon_в). \qquad (2.30)$$

На рух дрібних субмікронних часток значний вплив можуть мати сили термофорезу, що спрямовані в бік середовища, що має нижчу температуру.

$$F_m = \frac{4{,}5\pi\mu_м{}^2 d}{\rho_{пл}T}\left(\frac{l_{зм}}{2l_{зм} + l_m}\right) gradT, \qquad (2.31)$$

де T – температура частки;

$l_{зм}$ – довжина шляху змішування часток ДФ, м;

l_m – відношення шляху змішування до радіусу жирової частки.

Найбільший вплив цих сил спостерігається за незначних швидкостей, тобто в умовах струминно–щілинного гомогенізатору їхня величина не може бути визначальною. Збільшення швидкості потоку посилює вплив на жирову фазу сил інерції та турбофорезу [40, 60, 71].

Сили Бернулі обумовлюють місцеву швидкість, пов'язану з турбулентними пульсаціями та відповідно з силами турбофорезу. Вони можуть істотно впливати на пульсаційні складові часток, зважених в турбулентному потоці, однак не мають достатнього впливу на зменшення СЖК. Сили турбофорезу виникають з умови нерівномірного розподілу пульсацій, що викликають турбулентне переміщення жирової кульки до стінок камери. Сили турбофорезу проявляються в тому що з ділянок з високою інтенсивністю турбулентних пульсацій до зони з низьким ступенем турбулентності поширюються збудження [1, 74, 147].

$$F_{ту} = ma. \tag{2.32}$$

Прискорення a знаходиться з виразу

$$a = \frac{du}{dt} = -\frac{1}{2}\tau_k \frac{d\omega^2}{dy}, \tag{2.33}$$

де $\tau_к$ – час релаксації частки знаходиться з виразу

$$\tau_k = \frac{\rho_{пл} d_k^2}{18\mu_м}. \tag{2.34}$$

Ефект приєднаної маси відображає динамічний напір потоку знежиреного молока, що діє на жирову частку та означає збільшення її розрахункової маси, за умови коагуляції внаслідок зіткнення [90, 169]. При розгляданні процесів в струминно–щілинному гомогенізаторі, сили приєднаної маси не будуть мати визначального впливу, оскільки відстань між сусідніми жировими кульками буде мати великі значення

$$F_п = \frac{2}{3}\pi\rho_{пл} r_k^3 \left(\frac{d_{ср}\upsilon_{зн}}{dt} - \frac{d_k \upsilon_в}{dt}\right). \tag{2.35}$$

Дисперсна фаза під дією архимедової сили піднімається та попадає в зону інтенсивного перемішування, де під впливом потоку знежиреного молока руйнується на краплі з меншими значеннями СЖК. Сила Архімеду дорівнює

$$F_a = -mg\,. \qquad (2.36)$$

Для струминно-щілинного гомогенізатора молока з роздільною подачею вершків (СЩГРВ) дія архимедової сили буде незначною, оскільки створені інтенсивні турбулентні пульсації потоку будуть подрібнювати жирову фазу раніше та вона буде частково скомпенсована силою турбофорезу [1, 40, 205].

Аналіз сил, які діють на окрему жирову кульку, дозволив дійти висновку, що визначальний вплив на жирову кульку мають сили Магнуса, Коріоліса, опору, інерції, та турбофореза, рівняння руху жирової частки для струминно–щілинного гомогенізатора виглядає таким чином [101, 110, 122]

$$m\frac{d\upsilon}{dt} = \frac{1}{8}\rho_{пл}C_д d^2\left|\upsilon_{зн}-\upsilon_в\right|(\upsilon_{зн}-\upsilon_в)+\frac{1}{4}\pi^2 d^2\rho_{пл}(\upsilon_{зн}-\upsilon_в)\omega_k+\rho_{пл}l_{зм}{}^2\upsilon_в^2+ma-$$

$$-2m\omega_a(\upsilon_{зн}-\upsilon_в)\,. \qquad (2.37)$$

Руйнування жирових кульок відбувається за механізмом Кельвіна–Гелмгольца, для якого згідно досліджень Нігматуліна [71, 166] характерний розмір жирових кульок після диспергування можна визначити за залежністю (2.38)

$$d_{ср} = \frac{2\pi\sigma\left(\rho_{зн}+\rho_в\right)}{\rho_{зн}\rho_в\upsilon_в^2}\,, \qquad (2.38)$$

де $\upsilon_в$ – швидкість подачі вершків, м/с.

Жирова кулька при втягуванні до потоку знежиреного молока рухається за складною траєкторією. При цьому на неї діють сили, що обумовлюють її витягнення в напрямку потока та руйнування при перевищенні значень сил Коріоліса, Магнуса, опору, інерції та турбофорезу над силами міжфазного натягу. При подальшому аналізі планується перевірка гіпотези про визначальну роль в руйнуванні жирової кульки сили опору, які виникають за рахунок різниці між швидкостями дисперсійної та дисперсної фаз та суттєвого впливу, який відіграють в процесі диспергування шлях змішування, тангенційні та дотичні напруження.

2.2.2 Опис процесу струминно–щілинної гомогенізації молока з роздільною подачею вершків

В додатку Г наведено результати аналітичних досліджень дотичних напружень, величина яких на відміну від нормальних напружень має суттєве значення для руйнування жирової кульки. Отримані результати свідчать, що для 1,4 кратного збільшення величини дотичних напружень діаметр конфузору в місці подачі вершків має складати 2мм та менше.

Визначена довжина шляху змішування, як відстані, яку повинна пройти жирова кулька після включення до потоку знежиреного молока доки її швидкість не зрівняється зі швидкістю руху потоку дисперсійної фази. В діапазоні діаметра конфузору в місці найбільшого звуження $d_к$=2..4мм, $l_{зм}$ дорівнює відповідно 0,78…1,56 мм, що дозволяє виходячи з швидкості подачі знежиреного молока обчислити час руйнування жирової кульки в потоці та перевірити наявність в СЩГРВ такого механізму руйнування, як подрібнення за відсутності зіткнення.

Визначено товщину граничного шару, величина якого за різними оцінками для СЩГРВ змінюється від $1{,}2\cdot10^{-3}$мм до $3{,}8\cdot10^{-2}\ldots5{,}3\cdot10^{-2}$ мм. Така незначна товщина граничного шару в якому створюється високий градієнт швидкості та необхідні умови для руйнування жирових кульок дозволяє стверджувати, що цей механізм зменшення СЖК не може бути визнаний як головний, зважаючи на невелику кількість жирових кульок, що зазнають руйнування в цій зоні.

Оскільки з врахуванням товщини граничного шару руйнування жирових кульок поблизу твердої поверхні, де створюються високі значення градієнту швидкості є проблематичним основним механізмом за якого також виникають великі значення градієнтів швидкості залишається створення різниці між швидкостями знежиреного молока та вершків. Наведені в додатку Г результати аналітичних досліджень дозволили знайти формулу, запропоновану Хінце, яка пов´язує величину дотичних напружень з критичним значенням критерію Вебера, який є основною величиною, яка дозволяє стверджувати про перебіг або відсутність процесу диспергування жирових кульок в СЩГРВ.

Дослідження вторинних механізмів руйнування жирових кульок, наприклад осциляції, як подрібнення, що може бути присутнє в СЩГРВ при спів паданні частоти власних та вимушених коливань жирової кульки,за якої відбувається явище резонансу та руйнування первинної краплі на більш дрібні. Результати проведеного дослідження дозволяють стверджувати про присутність в СЩГРВ явища осциляції, але оскільки не виконується необхідна для подрібнення за цим механізмом умова (резонанс), суттєвого значення на процес руйнування жирових кульок вона не має.

Дослідження впливу інших факторів та механізмів, які вчиняють вплив на руйнування жирових кульок молока дозволив встановити, що подрібнення під дією турбулентних пульсацій буде мати місце в СЩГРВ, оскільки процес диспергування в зоні пристінних шарів відповідає необхідним вимогам. Але враховуючи той факт, що в пристінному шарі руйнується незначний відсоток від загальної кількості жирових кульок, цей механізм слід віднести до другорядних факторів, які обумовлюють руйнування жирових кульок в СЩГРВ.

Аналіз можливості руйнування жирових кульок в СЩГРВ під дією динамічних навантажень в залежності від часу перебування часток ДФ та періоду їх власних коливань в зоні взаємодії з потоком знежиреного молока свідчить, що зменшення СЖК при цьому має квазістатичний характер та значною мірою залежить від величини критерію Вебера.

Руйнування жирових кульок в СЩГРВ відбувається в два етапи: на першому відбувається руйнування за рахунок мікропульсацій рідини, дії осциляції, руйнування крапель без вдару. На другому етапі відбувається руйнування за рахунок різниці швидкостей потоку знежиреного молока та струменю ДФ. При зниженні поверхневого натягу, що відбувається зі збільшенням температури або при додаванні емульгатору, параметри струменю вершків будуть змінюватись, що буде створювати кращі передумови для руйнування жирових кульок в ньому [147, 161].

Припущення до розрахунків

Для подальшого розглядання процесу необхідно зробити низку припущень:

1. Має місце сталий режим руху рідини при якому всі гідравлічні характеристики, зокрема швидкість, тиск та прискорення з плином часу в кожній точці простору, занятого турбулентним потоком знежиреного молока протягом часу не змінюються [39, 130].

2. Розглядається затоплений струмінь швидкість якого, біля стінок камери внаслідок тертя дорівнює нулю. При наближенні від стінок до центральної вісі камери швидкість зростає та на осьовій лінії сягає максимуму, тому профіль розподілу швидкостей в цьому місці має параболічний характер [19, 159].

3. Рідини, що розглядаються є реальними, існує опір руху, присутні втрати напору та енергії, яка витрачається на зміну швидкості рідини. Втрати енергії при турбулентній течії більше ніж за ламінарної, завдяки значним втратам на вихроутворення, перемішування, зміну траєкторії часток ДФ [130, 183].

4. Вплив периферійного потоку, який створюється між потоком знежиреного молока та стінками камери будемо вважати, як такий, що не має впливу на результати досліджень [74, 95, 151].

5. Граничний шар за умови розвиненої турбулентності займає весь простір між внутрішніми поверхнями конфузору в місці найбільшого звуження камери струминно–щільового гомогенізатора молока [39, 147].

6. При розширенні та звуженні потоку, яке залежить від геометричних параметрів камери втрати швидкості знежиреного молока відсутні за рахунок виготовлення внутрішніх поверхонь звуження конфузора та розширення дифузору циліндричної форми [74, 173, 186].

7. Для дослідження рідини використовуємо метод Ейлера, який полягає в вивченні розподілу швидкості в потоці в залежності від координат та часу [61, 85]

8. Припущення щодо зіткнення часток: частки мають шароподібну форму, коагулюють за кожного зіткнення, концентрація та дисперсність часток приймаються сталими, явище теплової коагуляції відсутнє [17, 144, 185].

2.3. Визначення відносної швидкості дисперсної та дисперсійної фаз при струминно-щілинній гомогенізації молока

Дослідження проблеми руйнування дисперсної фази рідких сумішей в дисперсійному середовищі має два головних напрямки, а саме: руйнування крапель в емульсіях та газових потоках. При розгляданні даних процесів важливим показником є стійкість краплі до дії сил, які прагнуть її зруйнувати. При цьому розглядаються нестабільності Кельвіна–Гельмгольца та Релея-Тейлора, які є характерними для процесів дестабілізації та емульгування рідинних середовищ. Деформація крапель рідини в емульсіях залежить від величини швидкостей дисперсійної та дисперсної фаз. Дані, відносно критичного значення числа Вебера різняться для різних середовищ та від досліду до досліду. Однак майже всі дослідники вважають головним фактором диспергування–відносну швидкість рідини (чи газа) та краплі [122, 148, 170, 189].

Головним способом підвищити ефективність гомогенізації залишається організація оптимальних гідродинамічних параметрів в зоні диспергування. Для різних чисел критерію описані форми деформації та види руйнування часток в потоці повітря [73, 95, 115]. Перенесення цих залежностей на диспергування жирових часток в потоці молочної плазми ускладнюється декількома факторами. По перше, густини молочного жиру та плазми відрізняються лише на 20%, в той час як густини води й повітря різняться більш ніж в 800 разів. В зв’язку з цим створити достатньо велику різницю швидкостей між жировою кулькою та плазмою є достатньо складною задачею. По друге, спостереження за деформацією та руйнуванням жирової частки складно здійснити враховуючи високі швидкості її руху (більше 100 м/с) та їх мікроскопічних розмірів (1–3мкм). По третє, фізичні залежності мікросвіту моделювати набагато складніше, оскільки в цьому випадку велику роль відіграють фізичні властивості ОЖК, яка має складну структуру та запобігає її руйнуванню [18, 27, 149].

При дослідженні диспергування крапель в дисперсійному середовищі важливо враховувати стійкість краплі до дії сил, які прагнуть її зруйнувати, їх аналіз

наведено в п 2.1.1 дисертаційної роботи. Наслідком їх дії є поява всередині рідини, зони підвищеного та зниженого тиску, які призводять до деформації та руйнування краплі. Критерієм руйнування жирових кульок в умовах затопленого струменю є критерій Вебера, формула якого для струминно–щілинної гомогенізації $We^{щ}$

$$We^{щ} = \frac{\rho_{пл} \cdot u^2 \cdot D_{max}}{\sigma_{ж-п}}. \qquad (2.39)$$

Для забезпечення руйнування жирових кульок до 0,75–0,80 мкм в струминному гомогенізаторі молока щілинного типу, необхідно створити максимальну різницю швидкостей фаз між жировою кулькою, яка надходить до потоку знежиреного молока крізь кільцеву щілину та швидкістю дисперсійного середовища, що подається крізь відповідний патрубок. Відносну швидкість для СЩГРВ можна визначити як

$$\vec{u} = \vec{\upsilon}_{зн} - \vec{\upsilon}_{в}, \qquad (2.40)$$

де $\vec{\upsilon}_{зн}$ – швидкість потоку знежиреного молока, м/с;

$\vec{\upsilon}_{в}$ – швидкість струменя вершків, м/с.

При перпендикулярному розташуванні каналу підведення жирової фази по відношенню до напрямку швидкості руху знежиреного молока рівняння (2.40)

перетворюється на

$$u = \upsilon_{зн}. \qquad (2.41)$$

Для створення найкращих умов руйнування жирової фази необхідно підвищувати швидкість знежиреного молока. Такі умови створюються в центральній частині осьової лінії внутрішніх поверхонь конфузору в місці розташування щілини.

Формула (2.40) визначена з умови подавання через щілину поодинокої жирової кульки. В струминному гомогенізаторі щілинного типу крізь щілину, розміром 0,1–0,9 мм подаються вершки (емульсія жирової фази в плазмі молока), тому визначення дійсної відносної швидкість u залежить від ширини кільцевої щілині в місці подачі вершків, вмісту жиру в вершках і швидкості їх подачі. Тому при подаванні ДФ перпендикулярно до потоку знежиреного молока швидкість ковзання буде

$$u = k_{щ} \upsilon_{зн}, \qquad (2.42)$$

де $k_{щ}$ – неявна залежність впливу параметрів кільцевої щілини з поперечним подаванням жирової фази, яка враховує вплив жирності, швидкості та ширини кільцевої щілини для подачі вершків.

Неявна залежність впливу параметрів кільцевої щілини $k_{щ}$ враховує [63, 115]:

– жирність вершків, які подаються в гомогенізатор $Ж_{в}$;

– ширину щілини в місці подачі вершків до потоку h;

– швидкості струменю вершків у місці включення кульки з щілини до потоку знежиреного молока $\upsilon_{в}$.

Для підвищення $\upsilon_{зн}$ необхідно збільшити швидкість жирової кульки перед включенням її до потоку знежиреного молока, що збільшить прискорення частки та зменшить сили інерції. Для цього необхідно прагнути до використання щілини, ширина якої має прагнути мінімальних значень за умови забезпечення необхідної продуктивності та виходячи з міркувань зниження вірогідності швидкої облітерації внутрішніх поверхонь кільцевої щілини.

2.3.1. Ширина щілини

Запропонована конструкція струминно–щілинного гомогенізатора молока є логічним рішенням проблеми облітерації каналів подавання жирової фази, що є характерною ознакою струминного гомогенізатора молока з роздільною подачею вершків. Отримати молочну емульсію, СЖК якої знаходяться на рівні клапанних гомогенізаторів можливо шляхом зменшення ширини кільцевої щілини. При цьому, зменшується центральна зони струменя вершків зі зниженою швидкістю обтікання жирових кульок [129, 134, 135, 137]. 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. Площа поперечного перерізу кільцевої щілини СЩГРВ близька до значень сумарної площі каналів подачі вершків в

струминному гомогенізаторі з роздільною подачею вершків [102, 116, 136, 183]. Але при використанні кільцевої щілини замість трубчастих каналів стає можливим зменшити ширину щілини, що підвищує ступінь диспергування молочної емульсії.

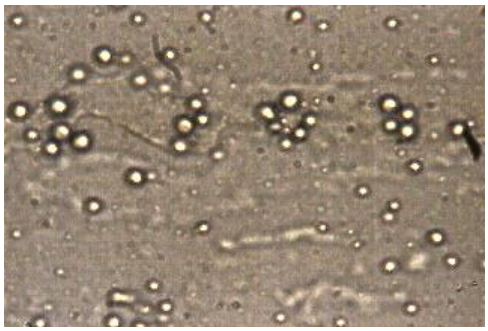
2.3.2. Жирність вершків

Збільшення дисперсності молочної емульсії відбувається при підвищенні жирності вершків до 50%, що відбувається внаслідок неефективної дисипації енергії струменя знежиреного молока, в який вводиться струмінь вершків, на молочну плазму, яка міститься в вершках. Отже, 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.

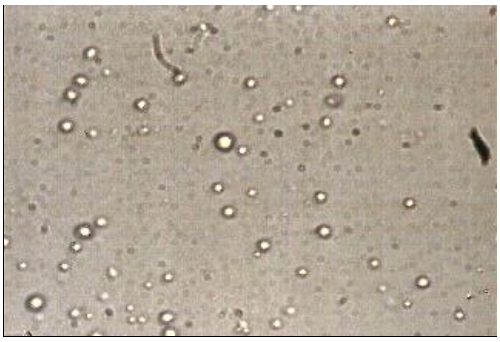
За інших рівних умов, вершки з жирністю, наприклад, 10, 30 та 50% будуть різнитись між собою кількістю жирових кульок в одиниці об′єму та відстанню між ними. При подаванні в СЩГРВ вершків середньої жирності (25–30%) плазма, що входить до складу знежиреного молока та вершків у емульсії матиме однакову швидкість. При цьому жирові кульки матимуть відмінну від неї швидкість, але будуть достатньо швидко досягати швидкості руху молочної плазми, оскільки високий відсоток плазми в них обумовлює мінімальну різницю швидкостей фаз [88, 99, 104].

При використанні вершків низької жирності (10–15%) для забезпечення необхідної жирності вихідного продукту, дисперсну фазу треба буде подавати з більшою швидкістю, в результаті чого зростатимуть енергетичні витрати процесу диспергування. Подача вершків низької жирності повинна проходити з більшою швидкістю, що призведе до зниження різниці швидкостей фаз та погіршить якість диспергування. Іншим варіантом може бути збільшення ширини щілини в місці подачі вершків, однак, в цьому випадку також буде відбуватись зниження якості диспергування, оскільки потік знежиреного молока буде встигати подрібнювати лише периферійну частину струменю [110, 111, 183].

Використання вершків, жирність яких перевищує 50% нераціонально з точки зору суттєвого збільшення енерговитрат для проведення додаткової гомогенізації вершків високої жирності [99, 183]. При використанні вершків з більшим відсотком жирності, зростає вірогідність коалесценції, при зіткненні подрібнених жирових кульок, не вкритих білковою оболонкою як на рис. 2.4. Попередити це явище можна шляхом використання технології (додаток Б), яка найменше дестабілізує жирову фазу молока або додаванням емульгаторів при виробництві молочних продуктів, які забезпечать наявність достатньої кількості білкової речовини для покриття знов утворених вільних поверхонь подрібнених жирових кульок. Використання вершків, які мають більшу жирність дозволить подавати дисперсну фазу у меншій кількості, згідно рівняння матеріального балансу [35].



а)



б)

Рис. 2.4. Мікрофотографії гомогенізованого молока при використанні вершків а) жирністю вище за 50%; б) з жирністю 40%

Аналіз наведених мікрофотографій (рис. 2.4) свідчить, що при використанні вершків жирністю вище 50% без проведення їх попередньої гомогенізації призводить до отримання гомогенізованого молока з СЖК на рівні 0,75–0,83 мкм. Але відсутність достатньої кількості ОЖК призводить до схильності жирових кульок до утворення конгломератів (рис. 2.4а), що виключає використання вершків жирністю вище 50% (рис. 2.4 б) [99, 144]. Менша кількість вершків за тієї же жирності вихідного продукту дозволить зменшити швидкість подавання вершків, в результаті чого стане можливим забезпечити максимальну різницю швидкостей фаз, а отже і найбільш ефективне диспергування молочної емульсії.

2.3.3. Швидкість вершків

Особливістю струминно-щілинного гомогенізатора молока є можливість подачі тонкого струменю вершків крізь вузьку кільцеву щілину до швидкісного потоку знежиреного молока для забезпечення технологічно заданої жирності. Ширина щілини в місці подавання жирової фази, діаметр та форма конфузору в місці найбільшого звуження камери гомогенізації та надлишкові тиски подавання знежиреного молока та вершків обумовлюють параметри нормалізації суміші.

Використання камери гомогенізації, яка має ширину щілини в місці подачі жирової фази 0,1–0,9 мм забезпечує високі значення швидкості струменю вершків, необхідні для отримання гомогенізованого продукту заданої жирності. Неявну залежність впливу параметрів кільцевої щілини $k_щ=f(Ж_в, h_в, \upsilon_в)$ необхідно визначити експериментально. Враховуючи статистичний розподіл розмірів жирових кульок у молоці [13, 59, 97, 139]

$$D_{max} = 2d_{ср}. \qquad (2.43)$$

З урахуванням формул (2.39), (2.41) і (2.42) формула критерію Вебера (2.39) для струминної гомогенізації молока в установці щілинного типу буде мати вигляд

$$We^{щ} = \frac{2\rho_{пл}k_щ^{2}\upsilon_{зн}^{2}d_{ср}}{\sigma_{ж-п}}. \qquad (2.44)$$

Для руйнування жирових кульок необхідно досягнення значення критерію Вебера We рівним (або більшим) за критичне $We_к$.

$$We^{щ} = \frac{2\rho_{пл}k_щ^{2}\upsilon_{зн}^{2}d_{ср}}{\sigma_{ж-п}} \geq We_к. \qquad (2.45)$$

Критичні значення чисел Вебера для руйнування крапель в потоці повітря визначені експериментально $We_к \geq 8–12$. Однак для руйнування жирових кульок в потоці знежиреного молока, його значення буде вище, враховуючи більшу залученість до потоку сусідніх шарів плазми. Діапазон критичних значень критерію Вебера ($We_к$) для різних типів гомогенізуючих пристроїв його значення буде більшим внаслідок включення до потоку сусідніх шарів рідини. Найближчим за механізмом гомогенізації до дослідної є струминна гомогенізація молока з

роздільною подачею ДФ, для якої експериментально підтверджене значення $\boldsymbol{We_к}$ складає 28 [122]. З виразу (2.45) отримаємо СЖК після гомогенізації [102, 103]

$$\boldsymbol{d_{ср}} = \frac{\boldsymbol{We_к} \cdot \boldsymbol{\sigma_{ж-п}}}{\boldsymbol{2\rho_{пл}} \cdot \boldsymbol{k_щ}^2 \cdot \boldsymbol{\upsilon_{зн}}^2}. \qquad (2.46)$$

Проведемо аналіз отриманої залежності та представимо дані у вигляді графіку (рис. 2.5)

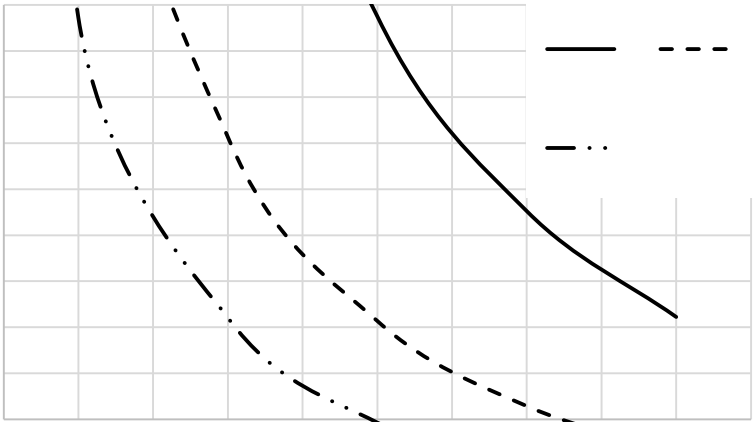


Рис. 2.5. Графік залежності середнього діаметра жирових кульок $\boldsymbol{d_{ср}}$ від швидкості знежиреного молока $\boldsymbol{\upsilon_{зн}}$ та неявної залежності впливу параметрів кільцевої щілини $\boldsymbol{k_щ}$ (при $\boldsymbol{We_к}$=50, $\boldsymbol{\sigma}$=0,1)

Залежність, представлена на графіку свідчить, що при підвищенні $\boldsymbol{k_щ}$ необхідна швидкість знежиреного молока при однаковому середньому діаметрі жирових кульок знижується, що зменшує енергетичні витрати на проведення диспергування. Аналіз залежності (рис. 2.5) свідчить, що забезпечити зменшення середнього розміру жирових кульок до технологічно обумовлених значень можливо при $\boldsymbol{k_щ}$=0,4 при швидкості подачі знежиреного молока, що знаходиться в діапазоні 110–120 м/с. Але в цьому випадку енергетичні витрати процесу диспергування будуть наближуватись до клапанних гомогенізаторів. При підвищенні значення неявної залежності впливу параметрів кільцевої щілини струминно–щілинної гомогенізації до $\boldsymbol{k_щ}$=0,8 забезпечити ефективне руйнування можливо при швидкості подачі, що знаходиться в діапазоні 55–64 м/с. Отже, для отримання жирових кульок,

СЖК яких знаходиться в межах технологічно обумовлених значень необхідно підвищувати значення неявної залежності впливу параметрів кільцевої щілини $k_щ$.

З формули (3.26) визначальним параметром, від якого залежить дисперсність жирової фази є швидкість знежиреного молока $\upsilon_{зн}$ в місці подачі жирової фази. Її значення можна визначити з подачі знежиреного молока $Q_{зн}$ і розмірів камери гомогенізатора

$$\upsilon_{зн} = \frac{Q_{зн}}{\varepsilon_к S}. \qquad (2.47)$$

$\varepsilon_к$ – коефіцієнт стиснення для центральної частини камери, який залежить від форми камери та дорівнює 1 для внутрішніх поверхонь, які мають циліндричну та коноїдальну форму та 0,98 для камери з конічною формою;

S – площа перетину камери струминно–щільового диспергатора в місці найбільшого звуження конфузору, м^2.

$$S = \frac{\pi d_к^{\ 2}}{4}, \qquad (2.48)$$

де $d_к$ – внутрішній діаметр камери щілинного гомогенізатора в місці найбільшого звуження, м.

З урахуванням (2.48) формула (2.46) приймає вигляд

$$d_{ср} = \frac{We_к \sigma_{ж-п} \varepsilon_к^{\ 2} \pi^2 d_к^{\ 4}}{32 \rho_{пл} k_щ^{\ 2} Q_{зн}^2}. \qquad (2.49)$$

Отримана залежність (2.49), пов’язує технологічні, конструктивні та гідравлічні параметри, зокрема середній діаметр жирових кульок, продуктивність, коефіцієнт струминно–щілинної гомогенізації та діаметр камери в місці найбільшого звуження.

Форма внутрішньої поверхні камери гомогенізатора визначає коефіцієнти витрат та швидкості потока знежиреного молока. Найбільш характерними типами камери можуть бути:

– циліндричні (φ=0,82; μ=0,82; ε=1),

– конічні, що сходяться з кутом конусності (12 – 15) (φ=0,96; μ=0,95; ε=0,98);

– коноїдальні насадки з (φ=0,98; μ=0,98; ε=1) [11, 39, 74].

Найбільш високі значення швидкості, а отже і показників дисперсності можливо отримати при використанні камери конічної форми (рис. 2.6). Це відбувається за рахунок зниження швидкості при зменшенні $\varepsilon_к$, завдяки чому згідно формули (2.49) відбувається зменшення $d_{ср}$.

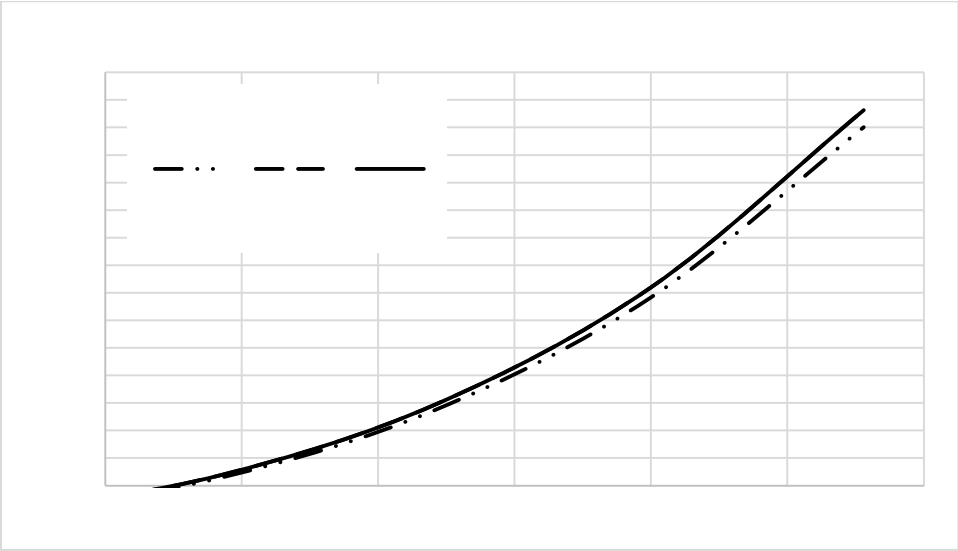


Рис. 2.6. Залежність середнього діаметру жирових кульок $d_{ср}$ довжини кільцевої щілини $l_щ$ та коефіцієнту стиснення для внутрішніх поверхонь конфузору в місці найбільшого звуження камери $\varepsilon_к$ (при $We_к$=50, $d_к$=3,5мм, $k_щ$=0,5)

Аналіз залежності СЖК від діаметра конфузору в місці найбільшого звуження камери СЩГРВ і коефіцієнту витрат для центральної частини камери $\varepsilon_к$ (рис. 2.6) свідчить що зміна $\varepsilon_к$ незначно впливає на середній діаметр жирових кульок. Найбільш високі значення швидкості, а отже і показників дисперсності можливо отримати при використанні камери конічної форми для якої коефіцієнт стиснення струменю має мінімальні значення та дорівнює $\varepsilon_к$=0,98.

Отже для підвищення дисперсності жирової фази при гомогенізації молока в струминно–щілинному гомогенізаторі молока (зменшення $d_{ср}$) необхідно виконання умов [64, 102]

$$\begin{aligned} &\left(We_к, \sigma_{ж-п}, \varepsilon_к, d_к\right) \to min; \\ &\left(k_щ, Q_{зн}\right) \to max. \end{aligned} \qquad (2.50)$$

Знизити поверхневий натяг на границі жир-плазма $\sigma_{ж\text{-}п}$ можливо за рахунок підвищення температури гомогенізації та шляхом використання емульгаторів, а

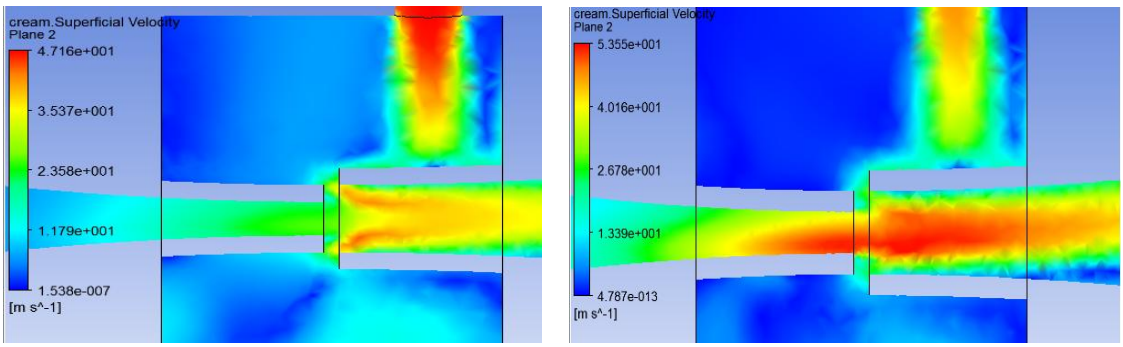
знизити коефіцієнт стиснення $\varepsilon_к$ можливо за рахунок профілювання внутрішніх поверхонь робочої камери.

Підвищити значення неявної залежності, що враховує параметри впливу кільцевої щілини для струминно–щілинної гомогенізації $k_щ$ можливо за рахунок оптимізації ширини щілини в місці найбільшого звуження, вмісту жиру в вершках і швидкості потоку вершків [63, 102, 103].

2.4. Моделювання параметрів процесу в програмному комплексі ANSYS

Проведені аналітичні дослідження диспергування дали змогу визначити осередненні значення факторів процесу гомогенізації. Для отримання миттєвих значень гідродинамічних показників необхідно провести комп'ютерне моделювання процесу. Для цього обрано програмний комплекс кінцево-елементного аналізу ANSYS, зважаючи на те, що порівняно з програмами COSMOS, Solid Works, AutoCAD він дає змогу оперувати більшою кількістю параметрів при одночасному забезпеченні високої точності даних [12, 55, 77, 192]. Окрім цього, даний комплекс дозволяє враховувати значення в’язкості та густини знежиреного молока та вершків, які максимально наближені до реальних значень. Для проведення моделювання геометричну модель камери щілинного гомогенізатору, яка була створена за допомогою програми Solid Works, було інтегровано до програмного комплексу ANSYS.

Серед параметрів, які дає змогу визначати та моделювати робота у програмному комплексі кінцево-елементного аналізу ANSYS, найбільший інтерес являють поля швидкостей дисперсійної та дисперсної фаз у місці диспергування, тобто у центральній частині камери струминно–щілинного гомогенізатора (рис. 2.7).

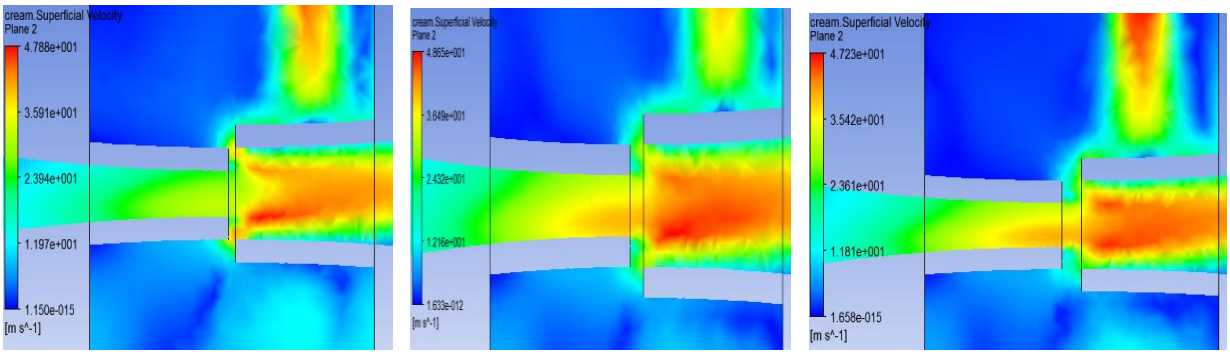


а) б)

Рис. 2.7. Поля швидкостей при ширині щілини ***h***=0,8 мм та тиску подачі знежиреного молока: а) $\Delta p_{зн}$=4МПа; б) $\Delta p_{зн}$=12МПа

Результати моделювання полів швидкостей свідчать, що необхідні для диспергування умови створюються при тиску $\Delta p_{зн}$=12 МПа (рис. 2.7 б) при довжині щілини $l_щ$ =12,5 мм ($d_к$=5 мм). Високі значення швидкості на рівні 47 та 53 м/с можуть бути отримані при $\Delta p_{зн}$=12 МПа та $d_к$=5 мм або при $\Delta p_{зн}$=4 МПа та $d_к$=4 мм. В першому випадку енерговитрати будуть наближуватись до клапанних гомогенізаторів, тиск яких складає 16–20 МПа, а енерговитрати–найбільшими. Тому для зниження питомих енерговитрат необхідно зменшувати діаметр камери до 2–4 мм, при цьому довжина щілини має бути меншою за $l_щ$=12,5 мм (рис. 2.7 а).

Оскільки відстань у щілині впливає на СЖК після диспергування, розглянемо поля швидкостей для різних значень ширини кільцевої щілини СЩГРВ (рис. 2.8).



а) б) в)

Рис. 2.8. Поля швидкостей тиску подачі знежиреного молока $\Delta p_{зн}$=8 МПа та ширині щілини ***h***, що дорівнює: а) ***h***=0,4 мм; б) ***h***=0,8мм; ***h***=1,2 мм

При мінімальній ширині щілини (рис. 2.8 а) зона локалізації максимальних швидкостей займає центральну частину площі дифузору, що обумовлює меншу різницю швидкостей фаз, а отже і прогнозовано нижчі показники СЖК. При збільшенні ширини щілини до 0,8 мм зона локалізації максимальних швидкостей охоплює майже всю площу дифузора за кільцевою щілиною (рис. 2.8 б), що створює необхідні умови для диспергування.

Отримані результати свідчать про те, що раціональним параметром надлишкового тиску подачі дисперсійної фази з точки зору створення критичного значення критерію Вебера є 12 МПа, що в свою чергу пов’язано зі збільшенням енерговитрат процесу диспергування ДФ. Для збільшення різниці швидкостей фаз при одночасному зниженні робочого тиску диспергування внутрішній діаметр конфузору в місці найбільшого звуження в лабораторному зразку СЩГРВ має бути меншим за 4 мм. Отримані дані відносно раціонального значення ширини щілини, яка має складати близько 0,8мм, її збільшення призводить до вирівнювання швидкостей потоку знежиреного молока та жирової кульки та виключає можливість її руйнування.

2.5. Визначення продуктивності гомогенізатора

Конструктивні особливості СЩГРВ дозволяють одночасно з гомогенізацією проводити нормалізацію молока за жирністю. В такому випадку з технологічної лінії переробки молока можна виключити обладнання для проведення нормалізації, що знизить енерговитрати на виробництво продукту. Найбільш поширені в промисловості технологічні схеми передбачають використання як сировини молока жирністю 2–4%. Для СЩГРВ продуктивність $\boldsymbol{Q_г}$ визначається сумою подачі знежиреного молока $\boldsymbol{Q_{зн}}$ та вершків $\boldsymbol{Q_в}$. При цьому продуктивність гомогенізатора можна виразити через подачу знежиреного молока або через подачу вершків [97, 102, 122, 126]

$$\boldsymbol{Q_г = Q_в + Q_{зн}}, \qquad (2.51)$$

де $\boldsymbol{Q_в}$ – подача вершків, кг/год.

Значення подачі знежиреного молока та вершків при використанні насосів об′ємної дії буде дорівнювати сумі подач відповідних насосів. Жирову фазу, яка подається через кільцеву щілину, що виконана навкруги місця найбільшого звуження будемо розглядати як відкриту для зовнішніх впливів систему рухомих та взаємодіючих жирових крапель та дисперсійного середовища. Швидкість жирової фази при входженні у струмінь знежиреного молока визначимо як

$$\upsilon_в = \frac{Q_в}{S_в} = \frac{Q_в}{\pi dh}. \qquad (2.52)$$

Конструкція струминного гомогенізатора щілинного типу забезпечує можливість здійснення нормалізації молока за жирністю, що досягається регулюванням співвідношення подачі знежиреного молока та вершків. В разі використання функції нормалізації подачі вершків та знежиреного молока пов'язані з необхідною жирністю нормалізованого продукту співвідношенням [13, 59, 97]

$$\frac{Q_г}{Ж_в - Ж_{зн}} = \frac{Q_в}{Ж_{н.м} - Ж_{зн}} = \frac{Q_{зн}}{Ж_в - Ж_{н.м}}. \qquad (2.53)$$

де $Ж_{н.м}$, $Ж_{зн}$, $Ж_в$ – жирність відповідно нормалізованого, знежиреного молока та вершків, %.

Тоді подачу СЩГРВ можна виразити через подачу знежиреного молока

$$Q_г = Q_{зн}\left(\frac{Ж_в - Ж_{зн}}{Ж_в - Ж_{н.м}}\right), \qquad (2.54)$$

або через подачу вершків

$$Q_г = Q_в\left(\frac{Ж_в - Ж_{зн}}{Ж_{н.м} - Ж_{зн}}\right). \qquad (2.55)$$

$Q_{зн}$ та $Q_в$ при виконанні нормалізації молока за жирністю пов'язані співвідношенням (2.53). В цьому випадку, враховуючи формулу (2.52), отримаємо вираз, який пов'язує параметри гомогенізатора

$$\pi d_к h \upsilon_в = \upsilon_{зн}\frac{\pi d_к^{\,2}}{4}\frac{\left(Ж_{н.м} - Ж_{зн}\right)}{Ж_в - Ж_{н.м}}, \qquad (2.56)$$

звідки швидкість вершків після перетворень можна виразити як

$$\upsilon_в = \frac{\upsilon_{зн} d_к\left(\frac{Ж_{н.м} - Ж_{зн}}{Ж_в - Ж_{н.м}}\right)}{4h}. \qquad (2.57)$$

Аналіз формули (2.57) свідчить, що зменшуючи ширину щілини в місці подачі вершків слід збільшувати швидкість подачі жирової фази і (або) використовувати вершки більшої жирності. Для створення максимальної різниці швидкостей фаз, що є необхідною умовою диспергування, згідно результатів теоретичних розрахунків при відстані в місці найбільшого звуження, яка дорівнює 2–2,5 мм швидкість вершків при використанні вершків жирністю 10% має складати 12–16 м/с. При жирності вершків, що дорівнює 30% та відстані в місці найбільшого звуження, що знаходиться в межах вказаних вище значень, для досягнення технологічно заданого середнього діаметра жирових кульок необхідно забезпечити швидкість руху вершків на рівні 4,5–5 м/с. Таким чином можна констатувати, що для забезпечення ефективного зменшення середнього розміру жирових кульок швидкість знежиреного молока має перевищувати швидкість подачі вершків у 5–8 разів. Вираз (2.57) рекомендується враховувати при підборі раціональних значень жирності вершків та ширини щілини для подачі вершків [102, 103].

2.6. Енерговитрати гомогенізатора

Потужність струминно–щілинного гомогенізатора $\boldsymbol{P}$ складається з потужності насоса подачі вершків $\boldsymbol{P_в}$ та знежиреного молока $\boldsymbol{P_{зн}}$ [102, 103, 129]

$$\boldsymbol{P = P_{зн} + P_в}. \qquad (2.58)$$

або

$$\boldsymbol{P = Q_{зн}\Delta p_{зн} + Q_в\Delta p_в}, \qquad (2.59)$$

де $\boldsymbol{\Delta p_{зн}}$, $\boldsymbol{\Delta p_в}$ – надлишковий тиск подачі знежиреного молока та вершків відповідно, Па.

З урахуванням співвідношення (2.53) між подачею вершків і знежиреного молока останню формулу можна представити у вигляді

$$\boldsymbol{P = Q_{зн}\left(\Delta p_{зн} + \left(\frac{Ж_{н.м} - Ж_{зн}}{Ж_в - Ж_{н.м}}\right)\Delta p_в\right)}. \qquad (2.60)$$

Значення надлишкових тисків пов'язані зі швидкістями руху знежиреного молока та вершків відношеннями

$$\Delta p_{зн} = \frac{\upsilon_{зн}^{\ 2}\rho_{зн}}{2\varphi_к^2}, \qquad (2.61)$$

$$\Delta p_в = \frac{\upsilon_в^{\ 2}\rho_в}{2\varphi_в^2}. \qquad (2.62)$$

де $\varphi_к$, $\varphi_в$ – коефіцієнти швидкості для центральної частини внутрішніх поверхонь конфузора камери гомогенізатора та торцевих поверхонь конфузора та дифузора на початковій ділянці в місці подачі вершків до кільцевої щілини.

Звідси вирази (2.61) та (2.62) з врахуванням (2.59) приймуть вигляд

$$\Delta p_{зн} = \frac{8Q_{зн}^{\ 2}\rho_{зн}}{\mu_к^{\ 2}\pi^2 d_к^{\ 4}}, \qquad (2.63)$$

$$\Delta p_в = \frac{Q_в^{\ 2}\rho_в}{2\mu_в^{\ 2}\pi^2 d_к^2 h^2}. \qquad (2.64)$$

Подачу ДФ в залежності від швидкості вершків визначимо як

$$Q_в = \pi d_к h \upsilon_в. \qquad (2.65)$$

Звідки потужність на подачу вершків буде дорівнювати

$$P_в = \frac{\upsilon_в^3 \rho_в \pi d_к h}{2\varphi_в^2}. \qquad (2.66)$$

або

$$P = \frac{8Q_{зн}^{\ 3}\rho_{зн}}{\mu_к^{\ 2}\pi^2 d_к^{\ 4}} + \frac{Q_в^{\ 3}\rho_в}{2\mu_в^{\ 2}h^2\pi^2 d_к^2}. \qquad (2.67)$$

або з урахуванням (2.60)

$$P = Q_{зн}^{\ 3}\left(\frac{8\rho_{зн}}{2\mu_к^{\ 2}\pi^2 d_к^{\ 4}} + \left(\frac{Ж_{н.м} - Ж_{зн}}{Ж_в - Ж_{н.м}}\right)^2 \frac{\rho_в}{2\mu_в^{\ 2}h^2\pi^2 d_к^2}\right). \qquad (2.68)$$

Графік залежності потужності струминно–щілинного гомогенізатора від подачі знежиреного молока має гіперболічний характер (рис. 2.9). Потужність, необхідна для насосу подачі жирової фази залежить від діаметра каналу в щілині, жирності вершків і ширини щілини в місці найбільшого звуження.

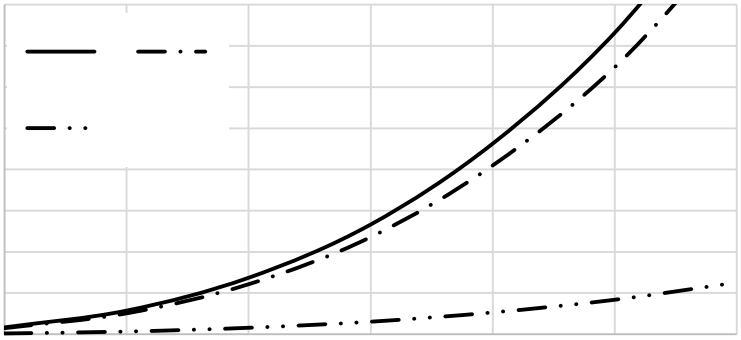


Рис. 2.9. Залежність потужності насосів подачі знежиреного молока, вершків та загальної потужності СЩГРВ $P_{зн}$, $P_в$, P від подачі знежиреного молока (при $l_щ$=9,4 мм; $\mu_к$=0,95; $Ж_{н.м}$=3,5%; $Ж_{зн}$=0,05%; $Ж_в$=40%; h=0,6 мм; $\mu_в$=0,3)

Аналізуючи (рис. 2.9), слід зазначити, що потужність насоса подачі вершків при Q=1000 л/год та ширині щілини, що дорівнює 0,6 мм в 8 разів менше за потужність насоса, що використовується для подавання знежиреного молока [64, 102].

2.7. Питомі енерговитрати струминно–щілинного гомогенізатора молока з роздільною подачею вершків

Питомі енерговитрати струминно–щілинного гомогенізатора**,** визначаються з формули [102, 103, 129]

$$E_{пит} = \frac{P}{Q_г \cdot \rho_м}, \qquad (2.69)$$

де $\rho_м$ – густина молока, кг/м^3.

або

$$E_{пит} = \frac{Q_{зн} \cdot \Delta p_{зн} + Q_в \cdot \Delta p_в}{(Q_в + Q_{зн}) \cdot \rho_м}. \qquad (2.70)$$

З урахуванням (2.63), (2.64), (2.53) та (2.58) формула (2.70) набуває вигляду

$$E_{пит} = \frac{\Delta p_{зн}\left(8 \cdot \rho_{зн} + \frac{\mu_к^2 \cdot d_к^2 \cdot \rho_в}{2 \cdot h^2 \cdot \mu_в^2}\left(\frac{Ж_{н.м} - Ж_{зн}}{Ж_в - Ж_{н.м}}\right)^3\right)}{8 \cdot \rho_{зн} \cdot \rho_м \cdot \left(\frac{Ж_в - Ж_{зн}}{Ж_в - Ж_{н.м}}\right)}. \qquad (2.71)$$

Зниження питомих енерговитрат процесу гомогенізації в струминно–щілинному гомогенізаторі молока можна досягти при виконанні умов (2.72)

$$\begin{gathered}(\mu_в, h, Ж_в) \to max; \\ (\Delta p_{зн}, Ж_{н.м}, \mu_к) \to min.\end{gathered} \qquad (2.72)$$

Аналіз залежності (рис. 2.10) свідчить, що найменших енерговитрат можна досягти при використанні камери, внутрішні поверхні якої мають коноїдальний профіль.

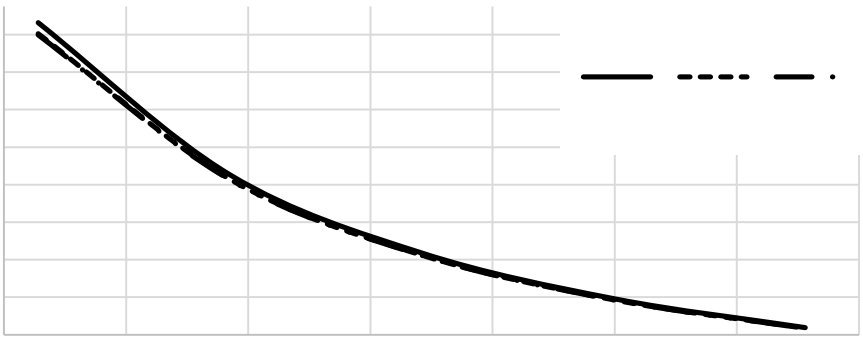


Рис. 2.10. Залежність питомих енерговитрат від діаметра конфузора в місці звуження і коефіцієнту витрат внутрішніх поверхонь конфузору для типових форм внутрішньої поверхні камери **(**при ***$Q_г$=2000 кг/год; $Ж_{н.м}$=3,5%; $Ж_{зн}$=0,05%; $Ж_в$=40%; h=0,2 мм; $\mu_в$=0,06)***

Підвищення жирності вихідного продукту призводить до збільшення енерговитрат гомогенізації (рис. 2.11), що пояснюється збільшенням надлишкового тиску, а отже і швидкості подачі ДФ.

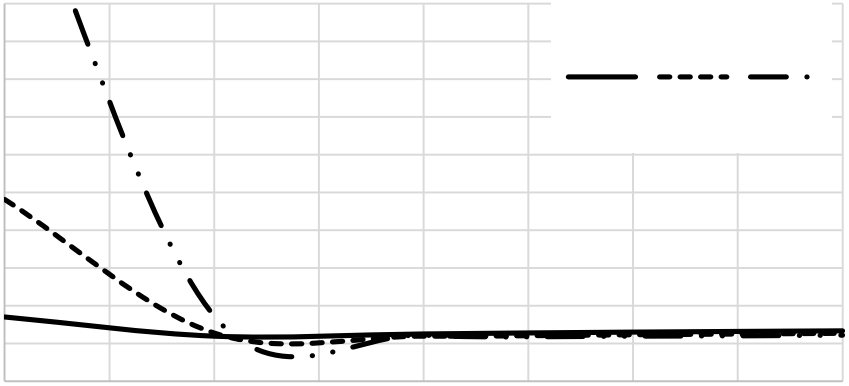


Рис. 2.11. Залежність питомих енерговитрат $E_{пит}$ від жирності вершків $Ж_в$ та нормалізованого молока $Ж_{н.м}$ (при $l_щ$=9,4 мм; $Ж_{зн}$=0,05%; h=0,5 мм; $\mu_в$=0,3; $Q_г$=1000 кг/год, $\mu_к$=0,98)

Характерною особливістю залежності є значне зростання питомих енерговитрат гомогенізації при використанні вершків з жирністю менше 20–25%, що пояснюється збільшенням тиску, необхідного для забезпечення подачі вершків крізь кільцеву щілину для забезпечення заданої жирності гомогенізованого молока.

2.8. Оптимізація параметрів струминно–щілинного гомогенізатора молока

Процес диспергування молока в СЩГРВ має забезпечувати зменшення середнього розміру жирових кульок до рівня 0,75–0,80 мкм при мінімальних енергетичних витратах. Гідравлічні, конструктивні і технологічні параметри гомогенізатора, які відповідають таким вимогам, будемо вважати оптимальними. Для знаходження оптимальних параметрів СЩГРВ, необхідно порівняти умови (2.50) і (2.72). Підвищення дисперсності відбувається за умови

$$\left(We_к, \sigma_{ж-п}, \varepsilon_к, d_к\right) \to min; \left(k_щ, Q_{зн}\right) \to max, \qquad (2.73)$$

Зниження питомих енерговитрат досягається при

$$(\mu_к, \mu_в, h, Ж_в) \to max; (Q_{зн}, Ж_{н.м}) \to min. \qquad (2.74)$$

Для визначення оптимальних параметрів гомогенізатора проводимо оптимізацію, для виконання якої будуємо лінії рівної дисперсності при значеннях СЖК, що дорівнює 0,8 мкм для залежностей дисперсності від продуктивності при різних формах камери та значеннях діаметру конфузору в місці найбільшого звуження. Отримані дані представлені на рис. 2.12. Аналізуючи отриману залежність, можна стверджувати, що для зниження енерговитрат при забезпеченні однакового середнього діаметра жирових кульок (0,8 мкм) необхідно використовувати камеру, внутрішній діаметр якої в місці найбільшого звуження має коливатись в діапазоні 2,75 до 2,85 мм, або при довжині кільцевої щілини 8,7 – 8,9мм. При цьому найбільш енергоефективним є використання камери конічного профілю внутрішніх поверхонь, при цьому енерговитрати будуть складати близько 0,95–0,97 кВт•год/т.

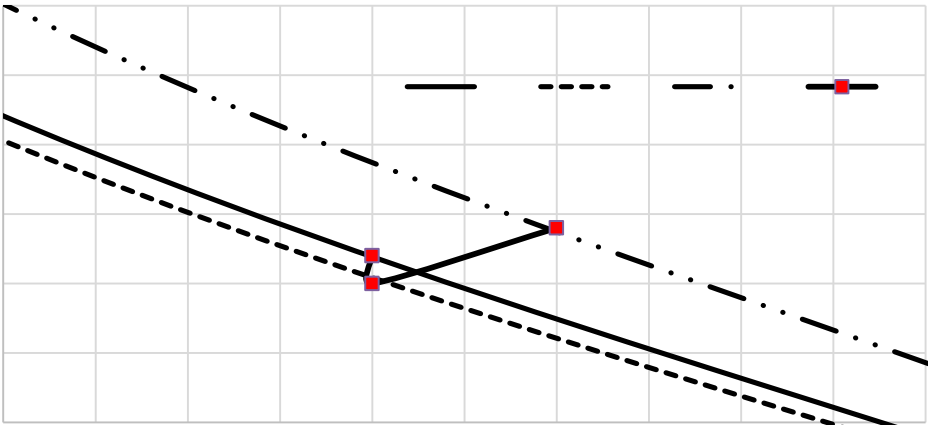


Рис. 2.12. Оптимізація форми внутрішніх поверхонь камери та діаметра конфузору в місці найбільшого звуження камери струминно–щілинного гомогенізатора молока (при $Ж_{зн}$=0,05%; $Ж_{н.м}$=3,5%; $Ж_в$=40%; h=0,5 мм; $\mu_в$=0,1; $Q_г$=1000 кг/год)

При використанні камери, внутрішні поверхні конфузору якого мають циліндричний профіль призводить до 2–3% зростання енергетичних витрат процесу та до більш ніж 35% зростання енерговитрат для камери, яка має коноїдальний

профіль внутрішніх поверхонь конфузору.

Висновки за розділом 2

1. В результаті аналітичних досліджень сил та напружень, які діють на поверхню жирової кульки, основним фактором руйнування визначено силу опору, яка виникає за рахунок різниці швидкостей руху жирової кульки та потоку знежиреного молока. Визнано доцільним використовувати критерій Вебера як узагальнюючу змінну для розрахунку СЖК при диспергуванні молока. Проведено аналіз сил та механізмів руйнування жирової кульки, результати якого дозволяють стверджувати, що визначальний вплив на жирову кульку мають сили Магнуса, Коріоліса, опору, інерції, та турбофореза, а вирішальну роль в диспергуванні відіграють тангенційні напруження, які розтягують жирову кульку у напрямку потоку, та при перевищенні величини напружень над силами міжфазного натягу призводять до її руйнування.

2. Проведено моделювання процесу в програмному комплексі ANSYS, що дозволило встановити, що раціональним параметром надлишкового тиску подачі дисперсійної фази з точки зору створення критичного значення критерію Вебера є 12 МПа. Для збільшення різниці швидкостей фаз при одночасному зниженні робочого тиску диспергування внутрішній діаметр конфузору в місці найбільшого звуження в лабораторному зразку струминно–щілинного гомогенізатора молока має бути меншим за 4 мм, тобто довжина кільцевої щілини має бути меншою за $l_щ$ =12,5 мм. Отримані дані відносно раціонального значення ширини щілини, величина якої має складати близько 0,8 мм.

3. Знайдені математичні залежності для визначення середнього діаметра жирових кульок, потужності, продуктивності та питомих енерговитрат струминно–щілинного гомогенізатора з роздільною подачею вершків. Знайдені залежності, що дозволяють шляхом варіювання ширини кільцевої щілини, жирностей вихідного продукту та вершків і швидкостей подавання жиру та дисперсійної фази здійснювати в розробленому пристрої кількісне регулювання

вмісту жиру в гомогенізованому молоці, тобто проводити нормалізацію одночасно з диспергуванням.

4. Аналіз отриманих залежностей показав, що для отримання жирових кульок, середній діаметр яких після гомогенізації дорівнює 0,8 мкм питомі енерговитрати процесу складають:

– при $Ж_в$=40–50%, $Ж_{н.м}$=3,2–3,5%, h=0,5–0,6 мм, $l_щ$=8,7мм–8,9мм, питомі витрати енергії складають 0,95–0,97 кВт·год/т;

– робочий тиск подачі знежиреного молока при продуктивності 950–1050 кг/год коливається в межах 0,78–0,9 МПа;

– при енергетичних витратах 0,95–0,97 кВт·год/т, продуктивність СЩГРВ становить 950–1050 кг/год.

5. Аналітично визначені раціональні значення гідравлічних, технологічних та конструктивних параметрів струминно–щілинного гомогенізатора для досягнення середнього розміру жирових кульок на рівні 0,75–0,80 мкм та мінімальних питомих енерговитратах:

– проведена оптимізація форми внутрішньої поверхні конфузору в зоні подачі жирової фази свідчить про те, що найнижчі витрати енергії забезпечуються при використанні камери, з конічною формою внутрішньої поверхні;

– визначено, що підвищення ефективності струминно–щілинного гомогенізатора можна досягти зменшуючи подачу дисперсійної фази, збільшуючи внутрішній діаметр конфузору в місці найбільшого звуження, збільшуючи ширину кільцевої щілини для подачі вершків, при використанні камери, яка має конічну форму внутрішнього профілю конфузору, виготовленням молока з мінімально можливою жирністю готового виробу при проведенні нормалізації за жирністю.

6. Отримані дані свідчать, що для зниження енергетичних витрат при забезпеченні однакового середнього діаметра жирових кульок (0,8 мкм) необхідно використовувати камеру, довжина кільцевої щілини в якій змінюється в діапазоні 8,7–8,9мм, при цьому продуктивність гомогенізатора буде коливатись в діапазоні 950–1050 л/год, а енергетичні витрати будуть складати близько 0,95–0,97 кВт·год/т.

РОЗДІЛ 3
РОЗРОБКА ТА ОБГРУНТУВАННЯ ПРОГРАМИ ТА МЕТОДИКИ АНАЛІТИЧНИХ ТА ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНИХ ДОСЛІДЖЕНЬ

Програма експериментальних досліджень

Задачами експериментальних досліджень визначено обґрунтування характеристик СЩГРВ для досягнення мінімально можливого середнього діаметра жирових кульок при мінімальних енерговитратах процесу [107, 116, 128].

Програмою експериментальних досліджень було заплановано:

1 – виявити вплив швидкості знежиреного молока, жирності вершків, довжини та ширини кільцевої щілини на середній діаметр жирових кульок після диспергування та величину критерію Вебера;

2 – перевірити адекватність аналітичної залежності між продуктивністю гомогенізатора та швидкістю подавання жирової фази та привести її у відповідність;

3 – перевірити адекватність аналітичної залежності між продуктивністю гомогенізатора та швидкістю подавання знежиреного молока та привести її у відповідність при необхідності;

4 – дослідити вплив конструктивних, технологічних та гідравлічних параметрів СЩГРВ на енерговитрати та перевірити адекватність аналітично встановленої залежності між ними;

5 – знайти емпіричні значення коефіцієнту щілинної гомогенізації та експериментально визначити критичне значення числа Вебера для СЩГРВ;

6 – оцінити показники якості до та після гомогенізації та порівняти їх з дисперсністю, при обробці у найбільш розповсюджених промислових машинах.

Для виконання програми досліджень треба:

– визначити основні характеристики процесу та діапазон їх коливання;

– запропонувати конструктивну схему СЩГРВ;

– запропонувати установку для дослідження струминно-щілинної гомогенізації молока;

– на основі аналізу обрати метод оцінювання якості гомогенізації.

3.1. Основні фактори процесу диспергування

При проведенні аналізу літературних джерел визначено такі фактори процесу гомогенізації молока в СЩГРВ (рис. 3.1) [11, 38, 81]:

конструктивні:

– діаметр камери в місці найбільшого звуження конфузора $d_к$,

– довжина кільцевої щілини $l_щ$,

– ширина кільцевої щілини h.

технологічні:

– швидкість подачі знежиреного молока $\upsilon_{зн}$,

– швидкість подачі вершків $\upsilon_в$

– подача жирової фази $Q_в$,

– продуктивність гомогенізації $Q_г$,

– середній діаметр жирової кульки після гомогенізації $d_{ср}$,

– температура гомогенізації T.

гідравлічні:

– тиск подачі знежиреного молока $\Delta p_{зн}$.

фізико-хімічні властивості молока:

– густина молока $\rho_м$,

– густина плазми молока $\rho_{пл}$,

– густина молочного жиру $\rho_в$,

– поверхневий натяг на межі розділу фаз жир-плазма $\sigma_{ж\text{-}п}$,

– кислотність °T.

– кінематична та динамічна в’язкість молока, плазми та молочного жиру, відповідно μ, ν, $\mu_{пл}$, $\nu_{пл}$, $\mu_в$, $\nu_в$.

Критерії оптимізації:

– середній діаметр жирової кульки після гомогенізації $d_{ср}$,

– потужність, що споживається P,

– питомі енерговитрати, $E_{пит}$.

Для сучасних технологічних процесів переробки молока цілком достатньо забезпечити виробництво продукту з середнім діаметром жирових кульок після гомогенізації, що дорівнює 0,75–0,80 мкм, але подальше підвищення дисперсності буде означати руйнування на рівні, близькому до розмірів хіломікронів, а отже і краще засвоєння молочних продуктів [13, 21, 25, 59].

З метою дослідження впливу технологічних, конструктивних і гідравлічних параметрів процесу диспергування в ході проведення досліджень було встановлено зв'язок між факторами та критеріями оптимізації в СЩГРВ (рис. 3.1)

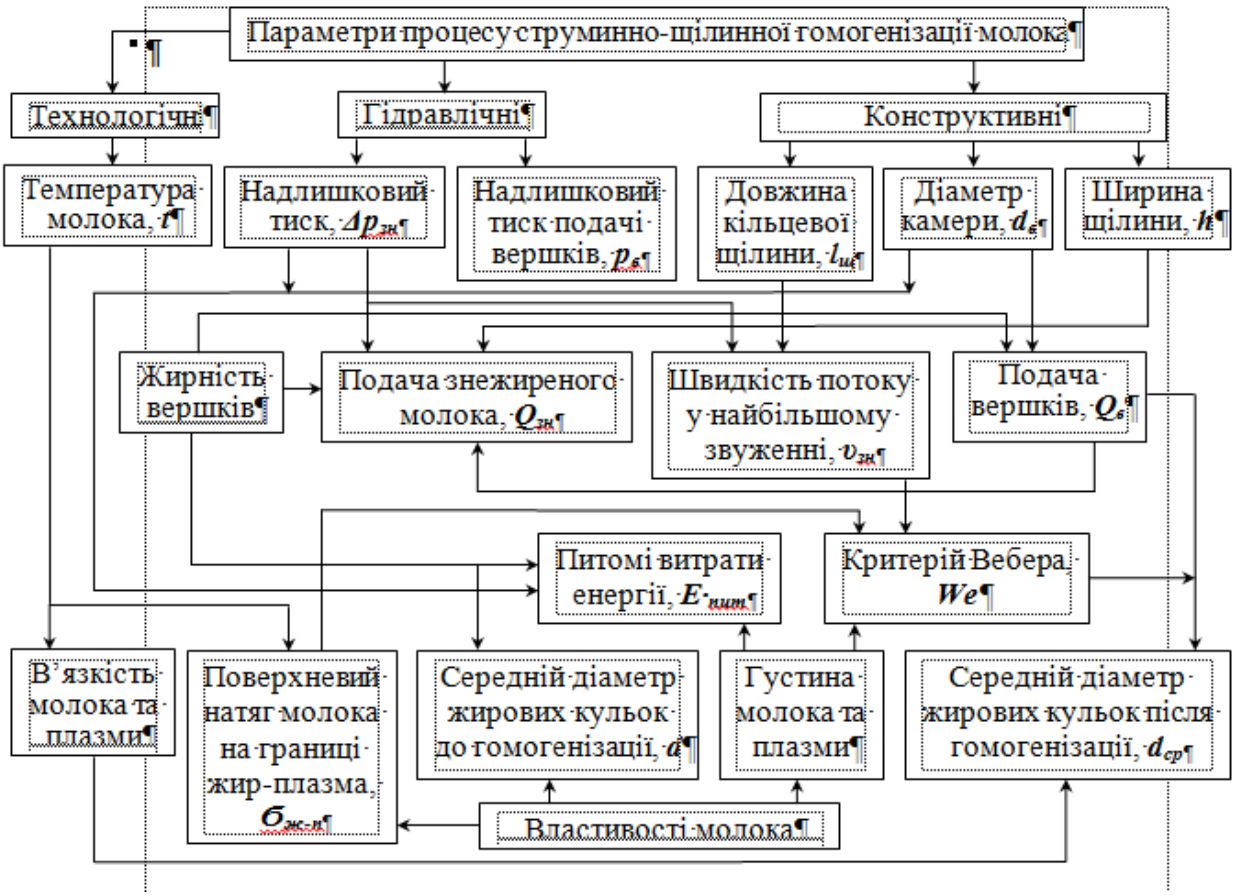


Рис. 3.1. Блок-схема взаємозвязку основних факторів, вихідних параметрів та критеріїв оптимізації в СЩГРВ

Швидкість подавання знежиреного молока в найбільш близькій за будовою та принципом дії конструкції струминного гомогенізатора молока з роздільною подачею вершків має коливатись від 30 до 90 м/с. Нижня межа діапазону

обґрунтована необхідністю створення різниці між швидкостями дисперсної та дисперсійної фаз, а верхня обумовлена суттєвим зростанням енергетичних витрат, що пов'язано з перебігом процесу за принципом клапанних гомогенізаторів [9, 36, 107]. При проведенні експериментальних досліджень швидкість подачі знежиреного молока на різних рівнях складала відповідно 30, 60, 90 м/с.

Відстань у щілині гомогенізатору коливається у діапазоні значень 0,1–0,9 мм. Нижнє значення параметру (0,1 мм) обумовлене необхідністю забезпечення заданої продуктивності лабораторного зразку, що має наближуватись до промислових машин. Граничне значення верхньої межі коливання відстані у щілині (0,9 мм) обумовлено розсіюванням енергії потоку, що виникає при збільшенні відстані та викликає збільшення середнього діаметру жирових кульок. [107, 120, 121].

Мінімальний діаметр внутрішніх поверхонь конфузору в місці найбільшого звуження потоку варіювала в діапазоні від 2 до 4 мм, при цьому довжина кільцевої щілини змінювалась від 6,3 до 12,5 мм. При цьому нижня межа варіювання цих параметрів обґрунтований суттєвим зростанням потужності насосів подачі знежиреного молока та вершків, а нижня обумовлена необхідністю забезпечення продуктивності диспергатора на рівні промислових зразків [18, 22, 150]. Довжина кільцевої щілини при цьому дорівнювала 2π; 3π та 4π, що відповідає 6,3; 9,4; 12,5 мм [35, 37, 38].

В даному діапазоні ширини кільцевої щілини і прийнятих вище меж коливання надлишкового тиску, продуктивність гомогенізації становитиме 600–2000 кг/год, що відповідає більшості промислових машин. Крім того, при менших значеннях ширини щілини (0,1–0,3 мм) вбачається можливим виникнення диспергуванні по типу клапанних гомогенізації (не при зіткненні струменів, а при проходженні крізь сопло). Адже діапазон роботи клапанних машин включає тиск 4–8 МПа, а ширина клапанної щілини знаходиться у межах 0,05–2,50 мм [70, 80, 202]. Максимальний діаметр конфузору в місці найбільшого звуження лімітується максимальною продуктивністю гомогенізації, і може бути збільшений при розробці методики та конструкції для промислового виробництва.

В конструкції лабораторної установки передбачені: зміна тиску насосу подачі

вершків шляхом обертання частотного перетворювача з регулятором; зміна мінімальної відстані між внутрішніми поверхнями конфузору в місці найбільшого звуження потоку, шляхом монтажу виготовлених за шаблоном з відповідною формою поверхонь конфузорів та дифузорів; регулювання швидкості подачі знежиреного молока, що досягається шляхом перекриття дроселюючої засувки.

Температура гомогенізації молока за технологічними вимогами становить 40–70°С. Нижня границя обумовлена температурою плавлення вершків, які переходить до рідкого стану, а вища–змінами у фізичних властивостях молока, що відбуваються при пастеризації і є небажаними при гомогенізації (п. 1.3) [13, 34, 61].

3.3. Обґрунтування схеми та конструкції пристрою для проведення експериментальних досліджень СЩГРВ

В результаті аналізу існуючих конструкцій була запропонована конструктивна схема камери струминно–щілинного гомогенізатора молока (рис. 3.2).

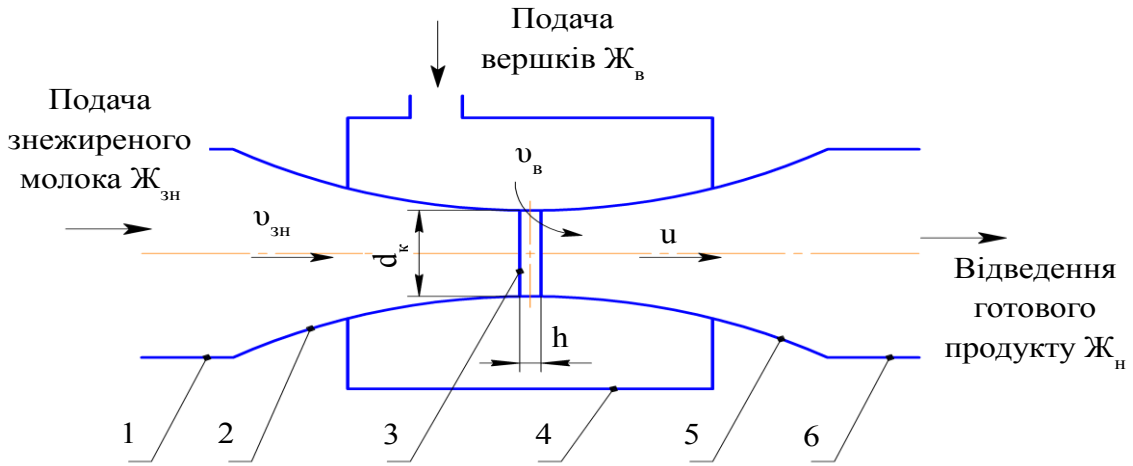


Рис. 3.2. Схема струминно-щілинного гомогенізатора молока з роздільною подачею вершків1 – патрубок подачі знежиреного молока; 2 – конфузор; 3 – кільцева щілина; 4 – ємність з вершками; 5 – дифузор; 6 – патрубок відводу готового продукту; $\boldsymbol{\upsilon_в}$ – швидкість подачі вершків; $\boldsymbol{\upsilon_{зн}}$ – швидкість подачі знежиреного молока; $\boldsymbol{d_к}$ – діаметр конфузору в місці найбільшого звуження; $\boldsymbol{h}$ – ширина кільцевої щілини; $\boldsymbol{u}$ – швидкість ковзання жирових кульок відносно молочної плазми; $\boldsymbol{Ж_{зн}}$ –

жирність знежиреного молока; $Ж_в$ – жирність вершків; $Ж_н$ – жирність готового продукту

Камера струминно-щілинного гомогенізатора молока (рис. 3.3) складається з конфузору 2, та дифузору 5, патрубків подачі та відводу готового продукту 1 і 6, ємності з вершками 4 та кільцевої щілини 3. Попередньо знежирене молоко зі швидкістю $\upsilon_{зн}$ подається крізь патрубок 1. У місці найбільшого звуження конфузору 2 діаметром $d_к$ з ємності з вершками 4 крізь вузьку кільцеву щілину шириною h та довжиною $l_щ=\pi \cdot d_к$ зі швидкістю $\upsilon_в$ 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.

Загальний вигляд лабораторної установки для дослідження процеса диспергування в СЩГРВ наведено на рис. 3.3.

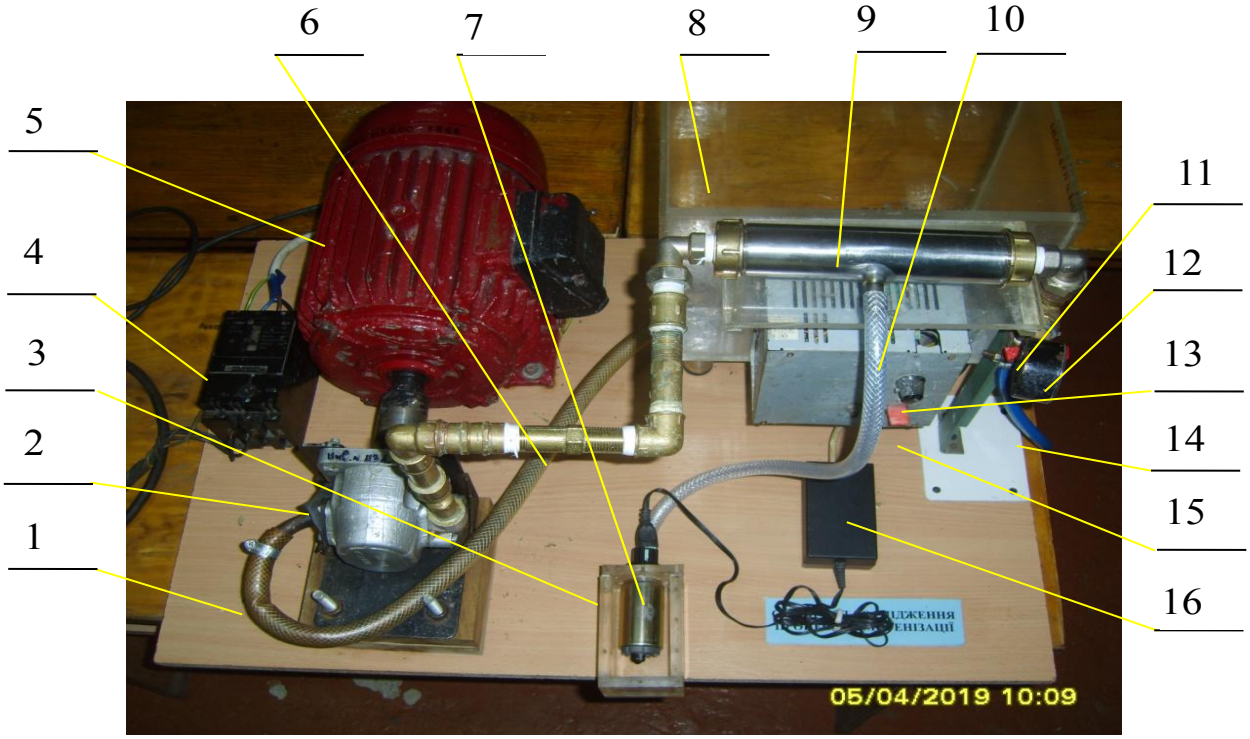


Рис. 3.3. Зовнішній вигляд лабораторної установки струминно–щільового гомогенізатора молока

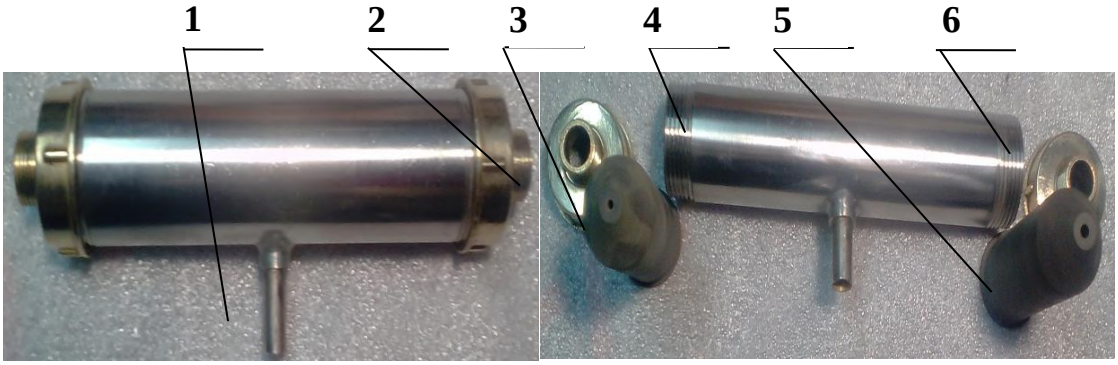
1 – гнучкий трубопровід для подачі знежиреного молока; 2 – насос шестеренний типу НШ; 3 – ємність з вершками; 4 – пакетний вимикач; 5 – електричний трифазний двигун; 6 – трубопровід; 7 – насос подачі дисперсної фази; 8 – ємність із знежиреним молоком; 9 – камера гомогенізації; 10 – гнучкий шланг з фіксатором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

Лабораторна установка струминно–щільового гомогенізатора молока, складається з ємності зі знежиреним молоком 8, з якої воно надходить по гнучкому шлангу 1 до шестеренного насосу 2 типу НШ, який приводиться в дію від електричного трифазного двигуна 5, який запускається при включенні пакетного вимикача 4. Робочий тиск знежиреного молока регулюється шляхом перекриття дроселюючої засувки 11 та контролюється розташованим поруч з нею манометром 12. Дисперсійна фаза з насоса 2 крізь трубопроводи 6 подається до камери гомогенізації 9, де в місці найбільшого звуження до нього 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 тумблеру 15, при цьому необхідна кількість вершків забезпечується за допомогою частотного перетворювача з регулятором 13. Нормалізоване та гомогенізоване молоко відводиться крізь гнучкий шланг 14 до спеціальної ємності.

Будова камери струминно–щілинного гомогенізатора, схему якої надано на рис. 3.4 (а, б.) забезпечує максимальну різницю швидкостей між жировою кулькою та знежиреним молоком, що є основою ефективного руйнування жирових часток.

Камера струминного гомогенізатора молока (рис. 3.4б) складається з корпусу 4 в якому монтуються вставки 3 та 5, які утворюють в центральній частині камери кільцеву щілину. Попередньо знежирене молоко подається крізь патрубок подачі 2, після чого досягає кільцевої щілини, де дисперсійна фаза має найбільшу швидкість з ємності з вершками 1 (рис. 3.4а) крізь щілину, яка має невелику ширину та

формується між конфузором та дифузором, подається необхідна кількість вершків [104, 125, 127]. Гомогенізоване молоко відводиться крізь патрубок 6.



а) б)

Рис. 3.4. а)зовнішній вигляд, б) внутрішня будова камери струминно–щілинного гомогенізатора молока

1 – ємність з вершками; 2 – патрубок подачі знежиреного молока; 3 – конфузор; 4 – корпус камери струминно–щілинного гомогенізатора молока; 5 – дифузор; 6 – патрубок відведення гомогенізованого молока.

Попередні експериментальні дослідження такого пристрою дозволяють зробити висновок про його високу ефективність: при середньому діаметрі жирових часток 0,75–0,80 мкм питомі енерговитрати процеса у 7–10 разів менше ніж в клапанних гомогенізаторах [102, 107, 109].

3.3. Методика визначення коефіцієнта витрат кільцевої щілини на початковій ділянці всмоктування вершків

Необхідність розробки методики для дослідження реальних значень коефіцієнта витрат кільцевої щілини на початковій ділянці всмоктування вершків обумовлена низькими значеннями показнику, достовірно встановити які для умов проведення експериментів неможливо з огляду на суперечності гідродинаміки. Дані відносно реального значення коефіцієнта витрат, знайдені при проведенні аналітичних досліджень коливались в діапазоні 0,01–0,3 одиниць [11, 39, 60]. В зв’язку з цим виникла необхідність створення пристрою для визначення реального

значення коефіцієнта витрат для каналів означених діаметрів. Перед визначенням реального значення коефіцієнта витрат кільцевої щілини для подачі вершків $\mu_в$ здійснюється наповнення вершками мірної ємності 4 (рис. 3.5) до об'єму 0,5 л. Відміряний об'єм рідини переливається до камери 2, звідки за допомогою насоса 1 крізь шланг, на торцовій поверхні якого монтується імітатор кільцевої щілини 3 під постійним тиском, величина якого контролюється за допомогою манометра 5 зливається до мірної ємності.

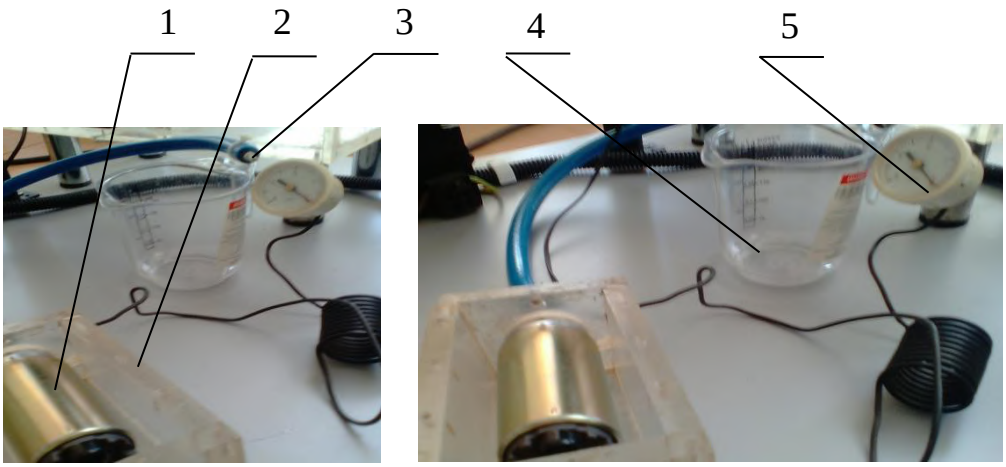


Рис. 3.5. Зовнішній вигляд пристрою для вимірювання коефіцієнта витрат кільцевої щілини подачі вершків СЩГРВ 1– насос; 2– камера з рідиною; 3– імітатор кільцевої щілини шириною 0,6; 0,7; 0,8мм; 4– мірна ємність на 0,5л; 5– манометр.

Проміжок часу, за який крізь імітатор кільцевої щілини проходить заданий об'єм вершків контролюють за допомогою секундоміру.

Продуктивність Q при заповненні визначеного об'єму вершків та підтриманні значення тиску на рівні 0,8 МПа була знайдена з залежності (3.1)

$$Q_г = \mu_в S \sqrt{\frac{2}{\rho_в}} \Delta p, \qquad (3.1)$$

де S – площа кільцевої щілини подачі жирової фази;

Δp – надлишковий тиск подачі рідини, Па;

$\rho_в$ – густина вершків, кг/м^3.

Площа кільцевої щілини для подачі вершків визначалась за формулою

$$S = \pi d_к h, \qquad (3.2)$$

Продуктивність по об’єму рідини, що пройшла крізь імітатор кільцевої щілини можна знайти за формулою

$$Q = \frac{m}{\rho_в t}, \qquad (3.3)$$

де m – вага гомогенізованого молока, кг;

t – час гомогенізації, с.

Після знаходження продуктивності по заданому об’єму вершків та площі кільцевої щілини для подачі вершків за формулою (3.4) розраховувались коефіцієнти витрат для імітаторів кільцевої щілини шириною 0,6–0,8 мм.

$$\mu_в = \frac{Q}{\pi d_к h \sqrt{\frac{2\Delta p}{\rho_в}}}, \qquad (3.4)$$

За отриманими експериментальними даними було побудовано графік залежності коефіцієнта витрат від ширини кільцевої щілини та було знайдено емпіричну залежність в функції $\mu_в = f(h)$.

3.4. Планування експериментальних досліджень

Метою проведення експерименту було визначення впливу таких факторів як діаметр $d_к$ камери струминно–щілинного гомогенізатора в місці найбільшого звуження, ширина кільцевої щілини для подачі вершків h та швидкості подачі знежиреного молока $\upsilon_{зн}$ на середній розмір жирових кульок $d_{ср}$, потужність насосів подачі знежиреного молока та вершків та питомі витрати енергії $E_{пит}$ а також взаємний вплив цих факторів. Окремо досліджувався вплив на середній діаметр жирових кульок та енерговитрати гомогенізатора жирності вершків $Ж_в$ та швидкості подачі вершків $\upsilon_в$ Три фактори змінювались на трьох рівнях.

Межі зміни факторів та інтервали їх коливання наведені у таблиці 3.1 [81].

Таблиця 3.1

Інтервали варіювання факторів

Найменування фактора	x_1 $d_к$, мм	x_2 h, мм	x_3 $\upsilon_{зн}$, м/с
Основний рівень	3	0,5	60
Інтервал варіювання	1	0,4	30
Верхній рівень	4	0,9	90
Нижній рівень	2	0,1	30

З отриманих даних були складені матриці, які оброблялися на персональному комп'ютері за допомогою програм Mathcad [62, 188, 203] та Microsoft Office Excel 2010 за обраною методикою. Розраховувались дисперсії достовірності, однорідність дисперсії за критерієм Кохрена). Перевірку значущості коефіцієнтів отриманих рівнянь регресії проводили за критерієм Стьюдента, а похибку апроксимації дослідних даних–за критерієм Фішера. Рівень значущості приймали рівним 0,05.

Обробка результатів експериментальних досліджень та визначення середнього розміру жирових кульок після диспергування

Отримані дані заносились до спеціальних таблиць, згідно розмірних класів, де до кожного класу належала група жирових кульок певного розміру. За визначальний розмір класу приймався максимальний розмір жирової кульки даної групи [9, 115]. У полі зору мікроскопа підраховувались кількість жирових кульок та їх діаметр. Повторюваність досліду складала 3 рази [81, 188].

Розмір інтервалів класу жирових кульок приймався рівним 0,5 мм. Кількість інтервалів класу n розраховувалась за виразом (3.5)

$$n = \sqrt{N}, \qquad (3.5)$$

де N – кількість підрахованих жирових кульок.

Шляхом оцінки максимальних коливань діапазону значень результатів дослідів виключалися грубі помилки вимірів [157, 160]. Внаслідок обробки було отримано розподіл розмірів жирових кульок в інтервалі класу за їх кількістю шляхом обробки сукупності одиниць, відібраних для контролю з партії. Обчислення основних параметрів вибірки, виконувалось за допомогою програми Microsoft Office Excel 2010 [62, 78, 188].

Засоби контролю при проведенні експериментальних досліджень

Тривалість досліду визначали секундоміром СОПпр-2а-2-010 ГОСТ 5072-79 з абсолютною похибкою не більше 0,2 с.

Масу молока визначали на електронних вагах SCL-150 ГОСТ 24104-2001 з абсолютною похибкою не більше 5 мг.

Температуру знежиреної фази та вершків визначали термометром з взаємозамінним конусом ГОСТ 16590-71 з абсолютною похибкою не більше 2°С.

Для реєстрації потужності використовували електровимірювальний ватметр McBrain VA 318 ГОСТ 22261-94 з абсолютною похибкою 0,1 В.

Для регулювання частоти обертання двигуну приводу насосу подачі вершків використовували вбудований потенціометр.

Перевірка достовірності теоретичних залежностей

Для розрахунку критерію Вебера визначали швидкість струменю на виході з камери за формулою

$$\upsilon_{зн} = \frac{2Q_г \rho_м}{\mu_к \pi d_к^2}, \qquad (3.6)$$

де $\rho_м$ – густина молока, кг/м^3.

Кожен дослід повторювався 3 рази, після чого визначалося середнє арифметичне, здійснювалась перевірка на грубі промахи [57, 81]. Отримані дані заносились у журнал та порівнювались зі значеннями, отриманими за теоретичними

формулами. Для кількісного порівняння розраховувався коефіцієнт детермінації R^2

$$R^2 = 1 - \frac{\sum_{i=1}^{M}(y_{Ti} - y_{Ei})^2}{\sum_{i=1}^{M}(y_{Ei} - y_i)^2}, \qquad (3.7)$$

де M – кількість точок експерименту;

y_{Ti}, y_{Ei} –теоретичне та експериментальне значення функції відгуку;

y_i – середньоарифметичне значення експериментальних даних функції відгуку.

Рахували, що теоретична залежність задовільно описує процес, якщо коефіцієнт детермінації є більшим за 0,95 [78, 139, 205].

3.6. Оцінювання якості гомогенізації

Досягти високої конкурентоздатності молочних виробів можливо за умови забезпечення високої засвоюваності поживних речовин продуктів багатокомпонентного складу. Тому в процесі дослідження вченими нових конструктивних та інженерних рішень важливо приділяти увагу не тільки зниженню енергоємності, але й підвищенню якості готового продукту. Отже важливим етапом досліджень є оцінювання ефективності процесу струминно–щілинної гомогенізації молока в залежності від енергетичних витрат та показників якості процесу. Для цього необхідно провести аналіз відомих методів оцінювання якості емульсій в харчовій промисловості та обґрунтувати найбільш раціональний та технологічний спосіб для дослідження процесу струминно–щілинної гомогенізації.

Більшість емульсій є термодинамічно нестійкими системами, які часто розшаровуються одразу після закінчення диспергуючих впливів. Гомогенізація здійснює додатковий вплив на емульсію, що обумовлює не тільки підвищення дисперсності та однорідності, але й підвищення стійкості емульсії. До основних показників якості дисперсних продуктів багатокомпонентного складу відносять: розподіл дисперсної фази за фракціями різних розмірів, однорідність, стійкість, структурно–механічні властивості продукту, що визначаються як фізико–хімічні

властивості компонентів та технологій обробки. Оскільки емульсії являють собою дисперсні системи з розвиненою поверхнею розділу фаз актуальним є питання забезпечення їх фізичної стабільності. Підвищення рівномірності розподілу дисперсної фази в дисперсійному середовищі потребує пошуку більш ефективних конструктивних рішень [138, 150]. Тому виникає потреба у точному, швидкому методі оцінки якості емульсії. Методи дослідження якості можна поділити на:

– дослідження якості на етапі виробництва у потоковій лінії;

– дослідження на етапі розробки нової технології або нової конструкції.

Зрозуміло, що наведені способи відрізняються за вимогами, наприклад до методів оцінювання у виробництві висуваються вимоги експресійності, високої чутливості приладів, можливості локального аналізу та високої селективності результатів. В даному випадку являє інтерес другий спосіб. Способи оцінювання якості гомогенізації можна поділити на групи [44, 47, 89, 100]

– механічне розділення, що являє собою операцію розшарування двох фаз;

– седиментаційний аналіз, заснований на виділенні окремих груп зразків за вагою;

– метод центрифугування, що полягає в фракціонуванні компонентів емульсії шляхом впливу відцентрових зусиль;

– аналітичний метод оцінювання стійкості жирової фази, заснований на розгляді процесу седиментації жирової фази (Петров А.М);

– оптичний метод;

– метод аналізу дисперсного стану на базі комп'ютерного аналізу мікрофотографій в програмному середовищі MATLAB;

– індивідуальне дослідження часток, включає вимірювання під мікроскопом подальшим дослідженням зразків за допомогою цифрової камери та програми Microsoft Visual Studio.

З вказаних методів перші п'ять є узагальненими способами оцінки якості гомогенізації, а останні-диференційними. Перший спосіб заснований на визначенні розмірів часток в дисперсних системах шляхом аналізу їх фракційного складу. Цей спосіб не може бути застосовано для визначення якості гомогенізації з огляду на

великий розмір часток від 1,5 до 100мкм, яким обмежено область його застосування.

Другий спосіб заснований на залежності швидкості седиментації жирової фази внаслідок підйому до поверхні часток жиру від їх розміру, згідно залежності запропонованої Стоксом, та перевіреної К.М.Раном та П.Ф.Шарпом. Для цього 250 $см^3$ молока наливають у циліндр та витримують 24 год. при температурі 4…8 ^{0}С. Для емульсій, які відрізняються більш високими показниками стабільності, наприклад гомогенізованого молока термін витримки становить 48 год. Після цього зразки поділяють на два шари та визначають масову концентрацію жиру C_H у нижніх 60% емульсії в циліндрі. Показник стабільності жирової молочної емульсії визначають з виразу [47, 70, 97, 194].

$$\chi = \left(C_0 - C_н\right) / \left(C_0 - 3C_н / 5\right), \qquad (3.8)$$

де C_0 – концентрація жирової фази в емульсії до початку розділення, %.

Жирова емульсія має високу стабільність, за умови, що в циліндрі об'ємом 250 мл кількість жиру в нижніх 150 мл не перевищує 10%. До недоліків седиментаційного аналізу належать: обмеженість його застосування, невисока точність, низька відтворюваність результатів.

Метод центрифугування полягає у визначенні відсотку отриманого в жиромірі відсоткового відношення величин, які мають СЖК менш 2 мкм до масової частки жирової фази після центрифугування протягом 30 хвилин у спеціальній піпетці при температурі 38…40 ^{0}С та обертах, що дорівнюють 18,3 $с^{-1}$. При цьому в нижній частині піпетки знаходяться залишки, розмір жирових кульок яких складає менше 2мкм. Ефективність гомогенізації $E_Г$ визначається за формулою [3, 7, 44].

$$E_г = \left(Ж_н / Ж_п\right) / 100, \qquad (3.9)$$

де $Ж_н$ – масова частка жиру в нижньому шарі продукту з піпетки, %;

$Ж_п$ – масова частка жиру в продукті, %.

Слід відзначити ще один метод визначення ефективності гомогенізації за допомогою жиромірів який полягає в встановленні відношення наявної в жиромірі недостатньо диспергованої жирової фази гомогенізованого та негомогенізованого молока. по ТУ 49-986-83. Для підготовки зразків беруть молоко з масовою часткою жиру більш 3% та вершки до та після гомогенізації нормалізують знежиреним

молоком або дистильованою водою за жирністю до 2,5%.

Підготовані зразки розведеного робочого розчину препарату для визначення ефективності гомогенізації жиру за ТУ 49-986-83 у відношенні 1:3 та перемішують. Після 20 $см^3$ отриманої емульсії вносять до жироміру, останню частину заповнюють дистильованою водою в кількості 1–1,5 $см^3$ та закривають пробкою. Жироміри у перевернутому стані ставлять на 10 хв у водяну баню, після чого центрифугують протягом 5 хв [3, 162, 182].

Після жироміри виймають та за шкалою відраховують відсоток недостатньо диспергованої жирової фази

$$E_г = \left[1 - \left(\frac{V_г}{V_{нг}} \right) \right], \qquad (3.10)$$

де $V_г$ та $V_{нг}$ – кількість отриманої в жиромірі недостатньо диспергованої жирової фази для гомогенізованого та негомогенізованого молока.

При показнику $E_г$ вище 75% вважається, що жирові кульки діаметром більш 2 мкм в продукті відсутні [50]. Недоліками методу центрифугування є його висока трудомісткість, низька продуктивність та високі значення похибок вимірювання.

Однією з найважливіших проблем при виготовленні емульсій є забезпечення її стабільності. Молоко, за класифікацією є тонкодисперсною та седиментаційно стійкою розбавленою емульсією, що забезпечується завдяки наявності броунівського руху та дифузії електричних шарів [3, 99, 169].

Петровим А.М. запропоновано аналітичний метод оцінювання стійкості жирової фази, який заснований на розгляді процесу седиментації ДФ. Порушення консистенції пов’язане з седиментацією жирових кульок, приведених у відповідність до кількісного критерію, так званого «коефіцієнтом стійкості жирової фази». Значення цього коефіцієнту визначається як середньоквадратична похибка середньозваженого значення (вміст жиру в продукті в початковий період часу) масової частки ДФ, скорегованої на коефіцієнт віднесення [93].

$$K_{ст} = \frac{1}{K_в} \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^{n} (g_i - g)}{n-1}}, \qquad (3.11)$$

де $K_в$ – коефіцієнт віднесення, %;

$K_{ст}$ – коефіцієнт стійкості жирової фази;

g_i – масова частка жиру в i – ому шарі, %;

g – середньозважена масова частка жиру в продукті, %;

n – кількість шарів розділу.

Коефіцієнт стійкості є інтегральним показником однорідності, який враховує зміни в агрегатній та кінетичній стійкості жирової фази. Заміна молочного жиру рослинним знижує коефіцієнт стійкості жирової фази в (2–3) рази [94].

На підставі результатів аналізу пошарового розподілу зразків розраховується $K_{ст}$ та по його значенню дається характеристика рівномірності розподілу жирової фази по об’єму продукту. Недоліком методу є його віднесення для визначення дисперсних характеристик емульсій, $K_{ст}$ відрізняється за рівномірністю зміни молочної частки жиру у шарах, що може негативно відображуватись на відтворенні їх консистенції [93]. Однак головною задачею гомогенізації є руйнування жирових кульок, а забезпечення стійкості є супутньою, вторинною метою процесу.

Оптичним методом досліджують молоко з масовою часткою ДФ 2–6%. Цей метод засновано на визначенні оптичної густини зразку при двох довжинах хвиль: 400 та 1000 нм. Ефективність гомогенізації визначається відношенням значень густини за двох довжин хвиль D_{400}/D_{1000}. Відмінну глибину диспергування має молочна суміш, для якої відношення D_{400}/D_{1000} коливається в діапазоні значень 4…6, при цьому значення СЖК дорівнює 1,2 мкм. Недоліками методу є обмеженість використання за жирністю зразків, високі значення СЖК, невисока точність вимірювань [3, 99].

Метод аналізу дисперсного стану емульсії на виході на основі комп'ютерного аналізу мікрофотографій, був розроблений Чеботарьовим С.А. Метод, який дозволяє автоматизувати аналіз мікрофотографій емульсій полягає у визначенні СЖК, дисперсності, а також у вирішенні завдань обов'язкових при дослідженні будь–якої дисперсної системи як будування кривих статистичного та емпіричного розподілу. Для вирішення вищеозначених завдань використовують технічні та інженерні розрахунки в програмній середі MATLAB [163, 169].

Відкривши зображення відповідним додатком перетворюємо малюнок в чорний (дисперсійне середовище) та білий (дисперсна фаза) кольори. Відтінки сірого при віднесенні до білого або чорного кольорів регулюються шляхом зміни яскравості малюнку за рахунок переміщення повзунка у випадаючому меню. Після автоматичного підрахунку розмірів часток в пам'яті комп´ютеру формується масив, який містить площі пухирців в пікселях. Побудова значень площин пухирців дозволяє визначити найбільші, найменші та середні розміри часток за допомогою DataStatistic. Недоліком методу є необхідність наявності певних навичок програмування при роботі з ним, а звідси–обмежене застосування [163].

Метод мікрофотографування має два варіанти: по першому підрахунок ведеться по проекції негативу на спеціально градуйовану сітку з відомою ціною поділу. За другим варіантом кількість жирових кульок рахують по фотографії, а їх діаметр вимірюють за допомогою спеціально градуйованої лінійки [163, 204].

При мікрофотографуванні молоко після гомогенізації ретельно перемішують, багаторазово переливаючи його з однієї ємності до іншої. За допомогою піпетки беруть 8 $см^3$ та переносять до мірної колби 200 $см^3$. Колбу з розчином перемішують, перегортаючи 6–10 разів, після чого вміст доводять розведенням водою до мітки та перемішують. З кожного зразка готують два розведення, а з кожного розведення готують препарати для мікроскопування та фотографують [23, 194].

В ході проведення дослідів для підвищення контрастності зображення використовувалась жиророзчинна фарба темно–рожевого кольору типу Судан–3, ТУ6–09–3234–78. Краплю з кожного розведення зразків молока скляною паличкою наносять на центральну частину лічильної камери (Горяєва, Розенфельда та інш.), закривають та притискають покривним склом. Перед фотографуванням лічильну камеру витримують в горизонтальному положенні, що необхідно для спливання до одного рівня жирових кульок перед фотографуванням [23]. Фотографують не менш 4 полів зору на кожне розведення, зміщуючи камеру «змійкою». На фотокартках підраховують кількість жирових кульок, та враховуючи розведення молока, визначають їх вміст в 1 $мм^3$. В тих же умовах фотографують стандартну лінійку об'єктмікрометру з ціною поділу 0,01 мм. З негативу зразка та лінійки

об'єктмікрометру за умови однакового збільшення роблять фотокартки. Накладаючи плівку з лінійкою на фотокартку молока визначають СЖК [23, 115, 122].

Застосовувати фотографування вважається доцільним для вимірювань та аналізу, враховуючи постійний рух жирової фази в емульсії. Більш точні висновки необхідно робити шляхом вимірювання та підрахунку не менше 1000–1200 жирових кульок з проби [3, 163]. При збільшенні розміру генеральної сукупності гістограми розподілу випадкових величин будуть наближені до логарифмічного виразу закону розподілу Гаусу.

Перші п'ять методів оцінки якості гомогенізації не є досконалими та дають приблизні значення. На похибку, яку дають методи відстоювання та центрифугування впливають: стабільність жирової фази, розміри жирових кульок, їх здатність утворювати скупчення, температура, в'язкість, різниця густини плазми молока та жиру та велика кількість інших факторів [138, 144]. До оптичного методу помилку вносять білкові частки молока, розміри яких досягають 0,1–1,0 мкм [7]. Цей спосіб не можна вважати точним, оскільки він здатен фіксувати одночасно обидва основних компонента дисперсної фази. З іншого боку використання мікрофотографування з подальшою комп'ютерною обробкою даних сприяє підвищенню точності підрахунків, зменшує механічні похибки.

Враховуючи вищеозначене, визначення якості гомогенізації доцільно проводити методом мікрофотографування та подальшого аналізу отриманих графічних зразків молока. Для отримання мікрофотографій використовувався оптичний мікроскоп МИКМЕД-1 з прилаштованою веб-камерою, під’єднаною до комп’ютера або цифровий фотоапарат з високим графічним дозволом з подальшим дослідженням зразків за допомогою цифрової камери та програми Microsoft Visual Studio [7, 23, 100].

В ході аналізу методів оцінки якості гомогенізації обґрунтовано вибір методу мікрофотографування з подальшим аналізом отриманих зразків молока як найбільш раціональний метод в умовах оцінювання показників якості процесу струминно–щілинної гомогенізації молока. Для отримання мікрофотографій використовуємо оптичний мікроскоп МИКМЕД-1 з прилаштованою веб-камерою, приєднаною до

персонального комп’ютера або цифровий фотоапарат з високим дозволом. Своєчасне швидке отримання інформації відносно показників якості продукції дає змогу оперативно впливати на хід технологічного процесу [7, 23].

Висновки за розділом 3

1. Розроблено програму проведення теоретичних та експериментальних досліджень, встановлено значущі фактори та межі їх коливання для струминно–щільового гомогенізатора молока. Так, швидкість знежиреного молока має коливатись в діапазоні 30–90 м/с, діаметр конфузора в місці найбільшого звуження має змінюватись в межах 2–4 мм, а ширина кільцевої щілини має складати від 0,1 мм до 0,9 мм. Для проведення експериментальних досліджень процесу гомогенізації молока було розроблено схему камери гомогенізації та виготовлено лабораторну установку струминно–щілинного гомогенізатора молока.

2. Розроблено устаткування та методику визначення коефіцієнта витрат внутрішніх торцевих поверхонь конфузора та дифузора в місці подачі вершків для уточнення його значення при проведенні аналітичних досліджень.

3. Зроблено аналіз існуючих способів та обґрунтовано вибір раціонального методу визначення якості гомогенізації. Обґрунтовано доцільність використання цифрової камери, приєднаної до оптичного мікроскопа з подальшим визначенням середнього діаметру жирових кульок по мікрофотографіях за допомогою цифрової камери та програми Microsoft Visual Studio.

4. Обґрунтовано вибір вимірювальних пристроїв, встановлені межі варіювання змінних факторів. Визначено послідовність статистичного аналізу характеристик жирових кульок, перевірки на грубі похибки, перевірки достовірності теоретичних залежностей. Результати вважаються достовірними при значенні коефіцієнта детермінації більше 0,95.

РОЗДІЛ 4
ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНІ ДОСЛІДЖЕННЯ ПРОЦЕСУ СТРУМИННО–ЩІЛИННОЇ ГОМОГЕНІЗАЦІЇ МОЛОКА

4.1. Визначення впливу швидкості знежиреного молока та діаметру конфузору в місці найбільшого звуження на дисперсність молочної емульсії

Згідно з методикою проведення експериментальних досліджень (розділ 3) та результатами аналітичних досліджень (підрозділи 2.2–2.8 дисертаційної роботи) проведені експериментальні дослідження впливу швидкості подачі знежиреного молока (рис. 4.1) та порівняння отриманих даних з аналітичними за формулою (2.49) та (рис. 2.4). Залежність між СЖК після диспергування має параболічний характер, як на графіку (рис. 4.1)

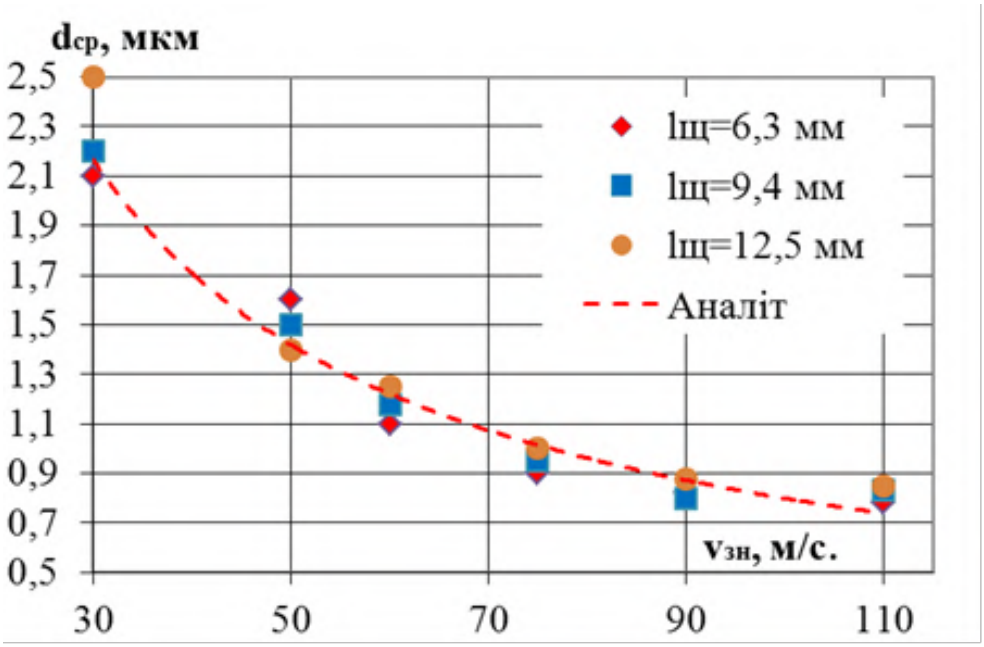


Рис. 4.1. Залежність середнього діаметра жирових кульок після диспергування $d_{ср}$ від швидкості знежиреного молока $v_{зн}$ та діаметру конфузору в місці найбільшого звуження $d_к$ при h=0,6 мм, $Ж_в$=40% (для теоретичного графіку прийнято $We_к$=28, σ=0,1, $k_щ$=0,5).

Аналіз залежності на графіку (рис. 4.1) свідчить, що збільшення діаметра камери в місці найбільшого звуження в межах діапазону, обраного при проведенні при проведенні експерименту справляє незначний вплив на зміну СЖК в усьому діапазоні швидкостей руху знежиреного молока (30–110 м/с). Найменший розмір жирових кульок, що знаходиться в межах технологічно обумовлених значень можливо досягти при швидкості подачі знежиреного молока, яка знаходиться в діапазоні 60–100 м/с та більше. Слід зазначити, що при перевищенні швидкості подачі знежиреного молока більше 100 м/с, процес диспергування відбувається аналогічно до конструкцій клапанного типу, внаслідок чого спостерігається кратне зростання енергетичних витрат на здійснення гомогенізації [107].

Отже, робочий діапазон швидкостей руху знежиреного молока для забезпечення заданої дисперсності має коливатись в межах 60–90 м/с. Результати моделювання (п. 2.3 дисертаційної роботи свідчать, що діаметр конфузору в місці розташування кільцевої щілини для зниження надлишкового тиску при одночасному забезпеченні необхідних значень СЖК має бути меншим за 4мм. Оскільки при зменшенні діаметру камери в місці найбільшого звуження до значень менше 2–3 мм згідно результатів аналітичних розрахунків спостерігається значне зростання енергетичних витрат, раціональний параметр діаметра камери в місці найбільшого звуження має знаходитись в межах указаного діапазону. Оптимальне значення цього параметру дозволить визначити оцінка енергетичних витрат при проведенні експериментальних досліджень та проведення оптимізації параметрів процесу [107].

Оскільки в струминному гомогенізаторі головним фактором, що забезпечує зменшення середнього розміру жирових кульок, є швидкість ковзання жирової кульки відносно плазми молока, збільшення турбулізації рідини може призводити до неефективної дисипації потужності, що підтверджують результати дослідження струминного гомогенізатора молока з роздільною подачею вершків [108, 121, 122]. Слід відзначити, що графік залежності СЖК після гомогенізації має подібний характер для протитечійно–струминної [115] і клапанної [9] гомогенізації на підставі чого можна зробити висновок про схожість механізмів гомогенізації в них.

4.2. Визначення впливу коефіцієнту щілинної гомогенізації на дисперсність жирової фази молока

Дослідження залежності СЖК після диспергування від швидкості подачі вершків та жирності дисперсної фази являє собою залежність, наведену на рис. 4.2.

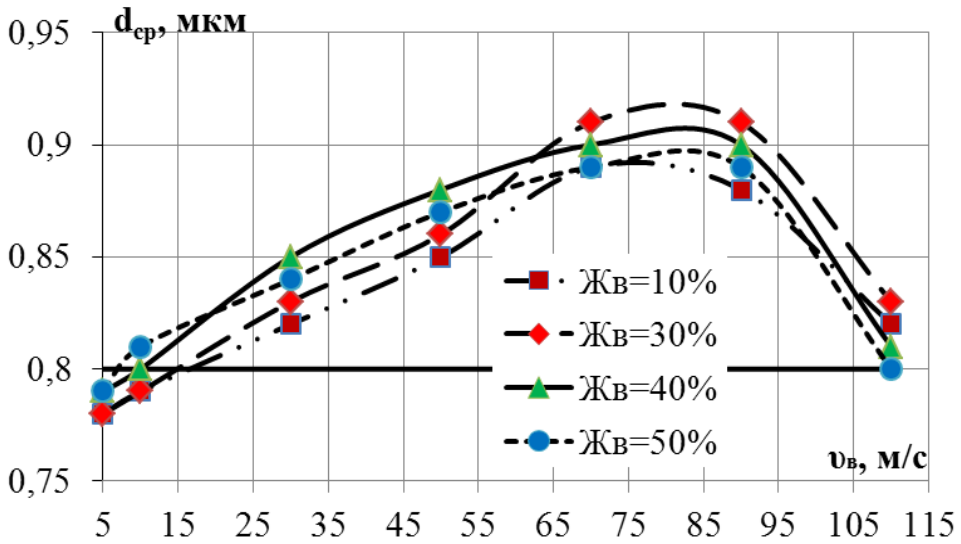


Рис. 4.2. Графік залежності середнього діаметра жирових кульок $d_{ср}$ від швидкості вершків $\upsilon_в$ і жирності вершків $Ж_в$, які додаються при нормалізації молочної емульсії при h=0,5 мм, $Ж_{н.м}$=3,5%, $d_к$=3мм, $\upsilon_{зн}$=60 м/с.

Зменшення СЖК до рівня клапанних гомогенізаторів можливо досягти шляхом підвищення жирності та швидкості подачі вершків (рис. 4.2). СЖК після диспергування на рівні клапанних гомогенізаторів досягається при швидкості подачі вершків $\upsilon_в$=5–40 м/с та при швидкості, що перевищує 100 м/с. Це пояснюється тим, що в діапазоні значень швидкості подачі вершків $\upsilon_в$=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 $\upsilon_в \geq 100$ м/с. Але при цьому енергетичні витрати на створення потоку високої швидкості будуть високими, а

енергоефективність гомогенізації в СЩГРВ знизиться. Отже найбільш ефективним з точки зору якості гомогенізації та енерговитрат є подача вершків зі швидкістю менше 40 м/с. Витрати енергії на створення тонкого струменя в'язкої рідини (молочних вершків) швидкістю більше 100 м/с стають близькими до енерговитрат клапанного гомогенізатора [25, 70]. 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 [104]. Розбіжність у результатах пояснюється наявністю в струминному гомогенізаторі молока декількох каналів, що дозволяє забезпечити необхідну продуктивність гомогенізатора при меншій швидкості подачі вершків.

Результати експериментальних досліджень характеру залежності між СЖК після диспергування, шириною кільцевої щілини та жирністю вершків, які використовуються в струминно–щілинному гомогенізаторі, наведені на рис. 4.3.

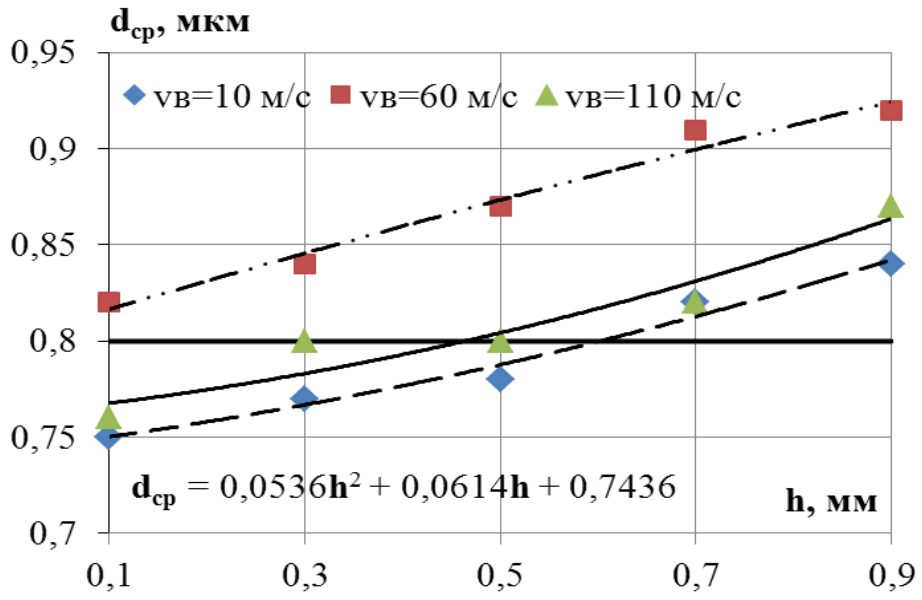


Рис. 4.3. Графік залежності середнього діаметра жирових кульок $d_{ср}$ від ширини щілини камери гомогенізації в місці найбільшого звуження h і жирності вершків $Ж_в$. при $Ж_{н.м}$=3,5%, $d_к$=3 мм, $\upsilon_{зн}$=60 м/с.

Зменшення СЖК можливо досягти шляхом зменшення ширини кільцевої щілини h (рис. 4.3). При використанні щілини шириною 0,1–0,5 мм можливо отримати продукт СЖК, якого складає 0,75–0,80 мкм, що знаходиться на рівні

показників дисперсності клапанного гомогенізатора При зменшенні ширини щілини до ***h***=0,1–0,5 мм можливо отримати продукт з середнім розміром жирових кульок, який складає 0,74–0,81 мкм, що знаходиться на рівні показників дисперсності клапанного гомогенізатора. Але, використання кільцевої щілини, ширина якої є меншою за ***h***=0,3 мм згідно результатів аналітичних досліджень призводить до 1,5–2 кратного зростання енергетичних витрат, порівняно з використанням гомогенізатору, ширина кільцевої щілини в якому коливається в межах ***h***=0,5–0,9мм [107].

Результати експериментальних досліджень характеру залежності між жирністю вершків та шириною щілини камери гомогенізації в місці найбільшого звуження ***h*** наведені на рис. 4.4

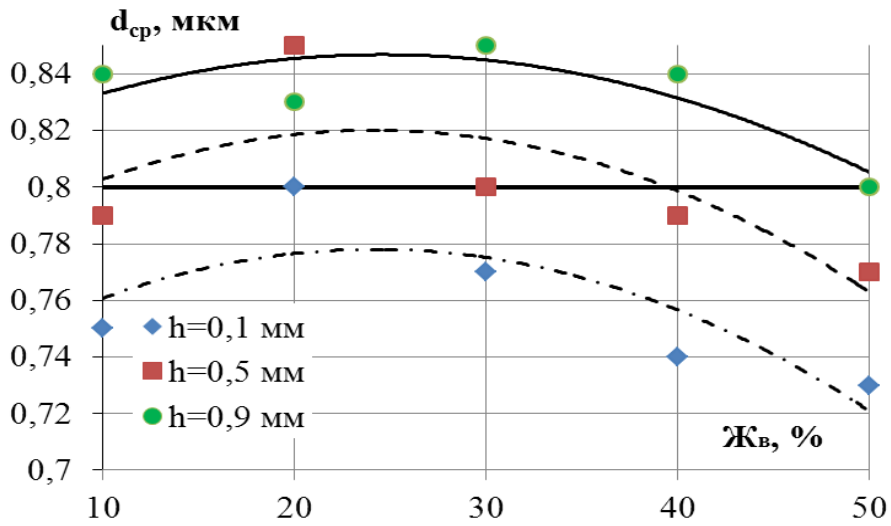


Рис. 4.4. Графік залежності середнього діаметра жирових кульок $d_{ср}$ від жирності вершків $Ж_в$, та ширини щілини камери гомогенізації в місці найбільшого звуження ***h*** при $Ж_{н.м}$=3,5%, $d_к$=3мм, $\upsilon_{зн}$=60м/с.

Аналіз отриманої залежності (рис. 4.4) свідчить, що забезпечити середній розмір жирових кульок на рівні нормативних вимог можливо при використанні камери, що має якомога меншу ширину кільцевої щілини та використання вершків жирність яких складає 40–50%. 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 % [107]. Залежності між жирністю вершків та показниками дисперсності для найбільш близького до СЩГРВ за конструкцією струминного гомогенізатора молока з роздільною подачею вершків свідчать, що раціональні показники жирності вершків для нього змінюються в діапазоні 35–45 %, при цьому СЖК після обробки в ньому складає 0,8–0,9 мкм [110, 111, 183].

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, швидкість подачі знежиреного молока варіювати в діапазоні 60–90 м/с. При цьому їх жирність має знаходитись в діапазоні 40–50 %, а ширина кільцевої щілини повинна складати 0,1–0,5 мм.

Визначення коефіцієнту витрат для внутрішніх торцових поверхонь конфузору та дифузору

Коефіцієнт витрат для внутрішніх торцевих поверхонь конфузору та дифузору на початковій ділянці в місці всмоктування вершків до щілинного каналу $\mu_в$ визначався дослідним шляхом за методикою, наведеною в п. 3.3 дисертаційної роботи, отримані дані наведені на графіку (рис. 4.5).

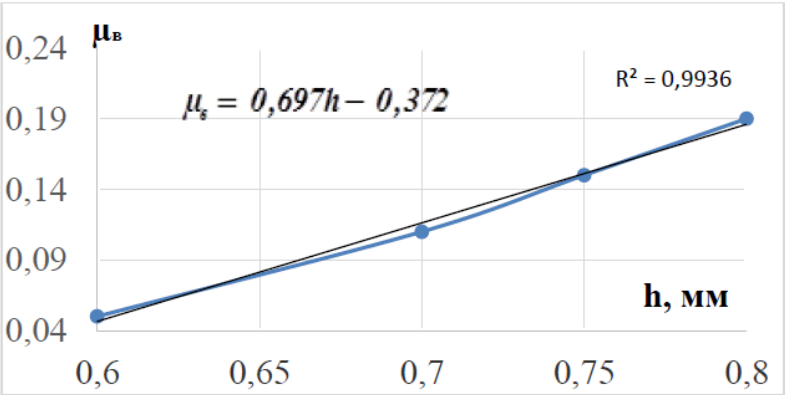


Рис. 4.5. Залежність коефіцієнта витрат $\mu_в$ торцевих поверхонь конфузора та дифузора в місці всмоктування вершків від ширини щілини h

При виготовленні торцевих поверхонь конфузору та дифузору в місці надходження вершків у щілину з внутрішньою шириною 0,6–0,8 мм коефіцієнт витрат визначається згідно емпіричної формули (4.1), знайденої з рис. 4.5.

$$\mu_в = 0{,}697h - 0{,}372 \quad (4.1)$$

Для зниження енергетичних витрат на подачу вершків при проведенні нормалізації в СЩГРВ необхідно профілювати внутрішні торцеві поверхні конфузора та дифузора в місці надходження до щілини струменю ДФ та знижувати втрати тиску та швидкості, що досягається шляхом зменшення довжини кільцевої щілини.

4.3. Енерговитрати струминно–щілинного гомогенізатора молока

Згідно отриманих даних після обробки та обчислення було знайдено потужності насосів, що забезпечують подачу дисперсійної, дисперсної фаз та сумарна потужність, яка витрачається на роботу СЩГРВ та порівняння з аналітичною формулою (2.68) наведені на графіку, рис. 4.6.

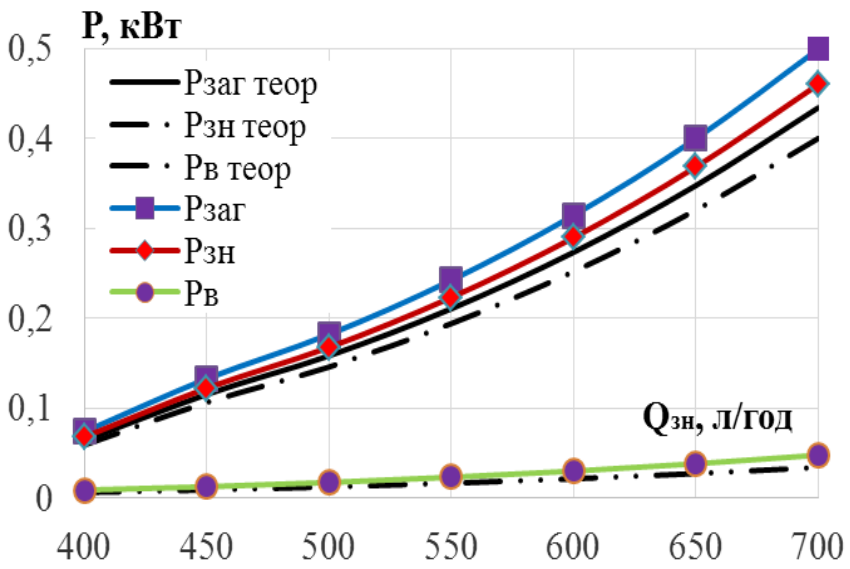


Рис. 4.6. Графік залежності потужності насосів для подачі знежиреного молока, вершків та сумарної потужності від продуктивності струминно–щілинного гомогенізатора молока (при $Ж_{н.м}$=3,5%; $Ж_в$=40%; h=0,5мм; $\mu_в$=0,25; $\mu_к$=0,98, $d_к$=3мм)

Аналіз графіку, наведеного на рис. 4.6 свідчить про те, що характер даних, отриманих в ході експериментальних досліджень в цілому узгоджується з результатами аналітичних досліджень. При цьому експериментальні витрати перевищують показники, отримані в ході аналітичних досліджень на 7–15%, що пояснюється втратою потужності за рахунок ККД насосів та приводів [107]. Взагалі дані, отримані при проведенні експерименту добре узгоджуються з теоретичними залежностями, отриманими для струминно–щілинного гомогенізатора.

4.4. Питомі енерговитрати і оптимізація параметрів гомогенізатора

Для визначення раціональних значень жирності вершків проводимо пошук раціональних значень, для чого при СЖК, що знаходиться в межах технологічно обумовлених значень (0,80 мкм) проводимо лінії рівної дисперсності, позначені суцільною лінією, зображеною на рис. 4.7.

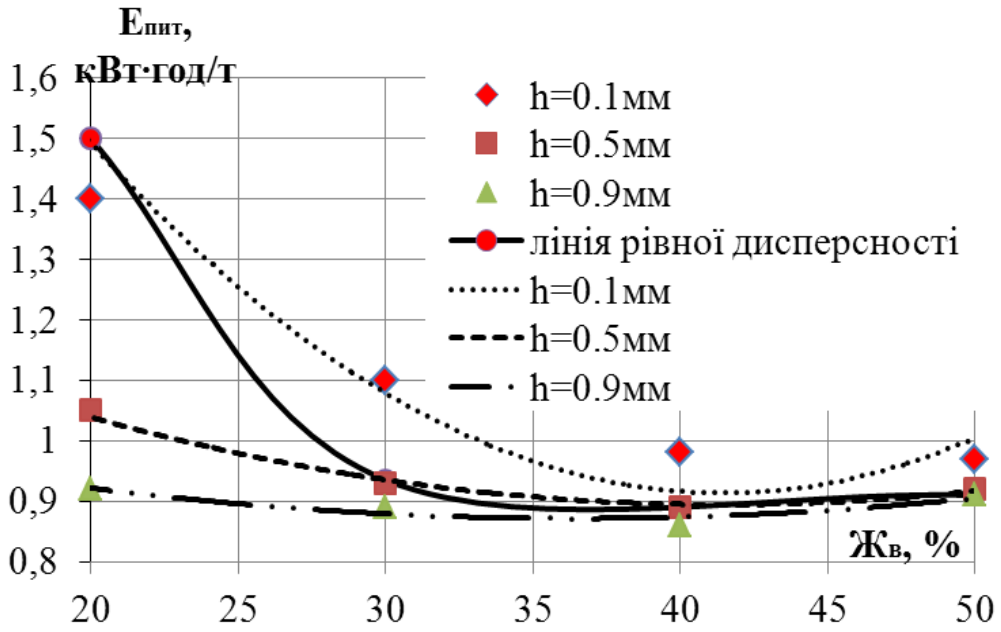


Рис. 4.7. Оптимізація жирності вершків, що використовуються при нормалізації знежиреного молока до жирності 3,5% та ширини щілини в струминно–щілинному гомогенізаторі молока (при $Ж_{н.м}$=3,5%; $\mu_в$=0,3; $\mu_к$=0,98 $d_к$=3мм; $Q_{зн}$ =1000 кг/год)

Аналіз отриманих залежностей (рис. 4.7) свідчить, що для отримання жирових кульок, середній діаметр яких складає 0,80 мкм, найменші енергетичні витрати забезпечуються при використанні щілини, ширина якої дорівнює ***h***=0,6–0,8 мм. При використанні щілини, ширина якої складає ***h***=0,9 мм, питомі енерговитрати мають тенденцію до зниження, а найбільші енергетичні витрати має варіант з використанням щілини, шириною ***h***=0,1 мм та менше, у якому для отримання молочної емульсії жирністю 3,5% питомі енергетичні витрати процесу зростають майже на третину при використанні вершків жирністю 20% до 1,5 кВт·год/т. Отже при ширині щілини ***h***=0,6…0,8 мм, раціональними параметрами струминно–щілинного диспергатора які забезпечують мінімальні витрати енергії є використання вершків жирністю 33–43%, при вказаних параметрах енергетичні витрати на проведення диспергування складають 0,88–0,92 кВт·год/т [117].

Для визначення раціонального значення швидкості подачі вершків слід провести обробку даних, отриманих при проведенні експерименту, результати якої наведені на рис. 4.8.

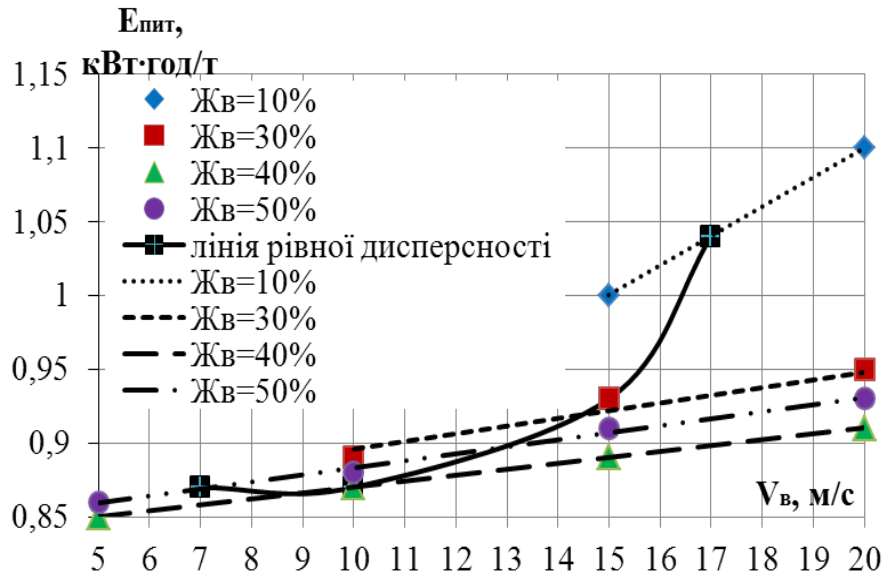


Рис. 4.8. Оптимізація швидкості та жирності вершків, що використовуються при нормалізації в струминно–щілинному гомогенізаторі молока (при $Ж_{н.м}$=3,5%; ***h***=0,5мм; $\mu_в$=0,3; $\mu_к$=0,98, $d_к$=3мм; $Q_{зн}$=1000 кг/год)

Аналіз отриманих при проведенні оптимізації швидкості подачі вершків даних (рис. 4.8) свідчить, що забезпечити мінімізацію енергетичних витрат на проведення диспергування для отримання молочної емульсії жирністю 3,5%, можливо при використанні вершків жирністю 33–43%, що досягається при швидкості подачі вершків, що дорівнює 7–11 м/с. Енергетичні витрати процесу при цьому не будуть перевищувати 0,86–0,88 кВт·год/т гомогенізованого молока. При збільшенні жирності вершків до 50% незначне підвищення енергії на диспергування (на 2–3%) буде доповнюватись підвищеними витратами енергії на проведення гомогенізації для отримання високо жирних вершків. При зменшенні жирності вершків до 30%, енергетичні витрати процесу зростають, оскільки згідно рівняння матеріального балансу збільшується кількість потрібних для складання нормалізованої суміші вершків, що підвищує необхідну швидкість знежиреного молока для забезпечення максимальної різниці швидкостей фаз. Енергетичні витрати при забезпеченні СЖК на рівні технологічно обумовлених значень мають максимальне значення (1,04 кВт·год/т) при використанні вершків жирністю 10%. Отже, найменші енергетичні витрати процесу диспергування забезпечуються при використанні вершків жирністю 33–43% при швидкості їх подачі, яка коливається в межах 7 – 11 м/с [117].

4.5. Експериментальне визначення критерію Вебера

Ефективне руйнування жирових кульок забезпечується при виконанні умови (4.2) [2] У цій формулі використовували значення $k_щ$, $\upsilon_{зн}$ і $d_{ср}$ отриманих у ході експериментальних досліджень.

$$We_к \le \frac{2\rho_{пл}\left(k_щ \upsilon_{зн}\right)^2 d_{ср}}{\sigma_{ж\text{-}п}}, \qquad (4.2)$$

З експериментальних даних представлених на рис. 4.2–4.4, були побудовані графіки залежностей $k_h=f(h)$, $k_Ж=f(Ж)$, $k_\upsilon=f(\upsilon)$. При цьому провели екстраполяцію експериментальних даних до умов, при яких $k_щ$=1 (рис. 4.9 –4.11).

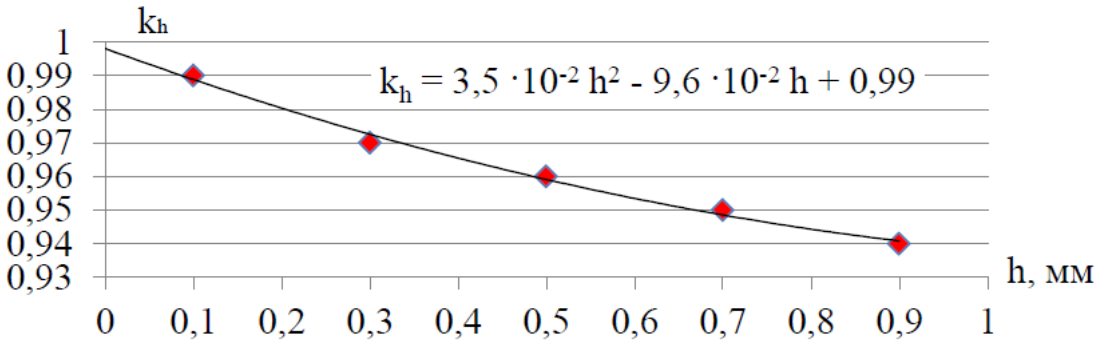


Рис. 4.9. Графік залежності коефіцієнту впливу ширини кільцевої щілини k_h від ширини кільцевої щілини в місці подавання вершків h

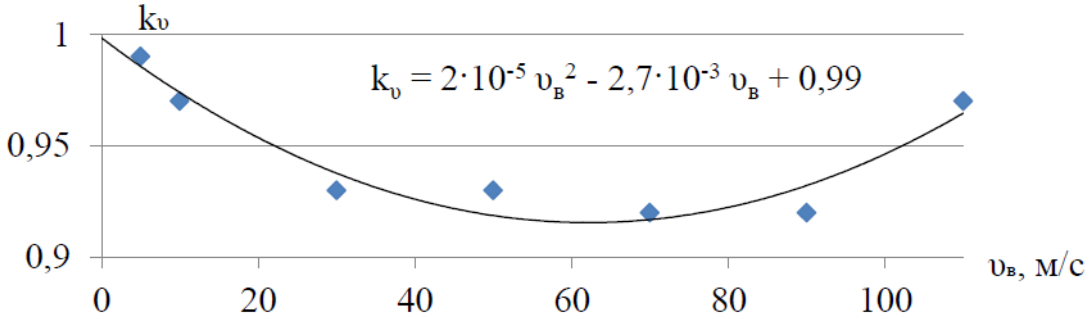


Рис. 4.10. Графік залежності коефіцієнту впливу швидкості подачі вершків k_υ від швидкості подачі вершків $\upsilon_в$

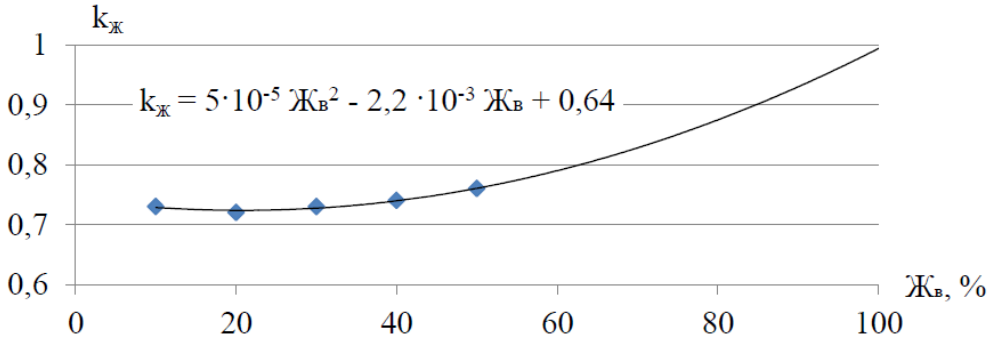


Рис. 4.11. Графік залежності коефіцієнту впливу жирності вершків $k_Ж$ від жирності вершків $Ж_в$

В результаті отримані емпіричні вирази для складових $k_щ$:

$$k_h = 3{,}5 \cdot 10^{-2} h^2 - 9{,}6 \cdot 10^{-2} h + 0{,}99, \quad (4.3)$$

$$k_\upsilon = 2 \cdot 10^{-5} \upsilon_в^2 - 2{,}7 \cdot 10^{-3} \upsilon_в + 0{,}99, \quad (4.4)$$

$$k_Ж = 5 \cdot 10^{-5} Ж_в^2 - 2{,}2 \cdot 10^{-3} Ж_в + 0{,}64. \quad (4.5)$$

З урахуванням рівнянь (4.3)–(4.5) формула (4.2) набуває вигляду:

$$d_{ср} = \frac{We_к \sigma_{ж\text{-}п}}{2\rho_{пл}((3{,}5\cdot 10^{-2} h^2 - 9{,}6\cdot 10^{-2} h + 0{,}99)(2\cdot 10^{-5} u_в^{\ 2} - 2{,}7\cdot 10^{-3} u_в + 0{,}99)} \times$$
$$\times \frac{We_к \sigma_{ж\text{-}п}}{(5\cdot 10^{-5} Ж_в^2 - 2{,}2\cdot 10^{-3} Ж_в + 0{,}64))^2 u_{зн}^{\ 2}}. \qquad (4.6)$$

За формулою (4.2) при $\boldsymbol{\rho_{пл}}$=1030 кг/м^3, $\boldsymbol{d_{ср}}$=0,75 мкм, $\boldsymbol{\upsilon_{зн}}$=60 м/с (при діаметрі конфузора в місці найбільшого звуження $\boldsymbol{d_к}$=3,5мм), $\boldsymbol{\sigma_{ж\text{-}п}}$=0,1 Н/м, критичне значення критерію Вебера дорівнює 29.

Отримана формула (4.6), дозволяє обирати необхідні технологічні, гідравлічні та конструктивні параметри роботи СЩГРВ для забезпечення технологічно заданого рівня дисперсності молочної емульсії.

4.6. Дисперсні показники струминно–щілинного гомогенізатора

На підставі експериментальних даних був проведений дисперсний аналіз, за результатами якого було побудовано гістограму розподілу середніх розмірів жирових кульок, яка представлена на рис. 4.12.

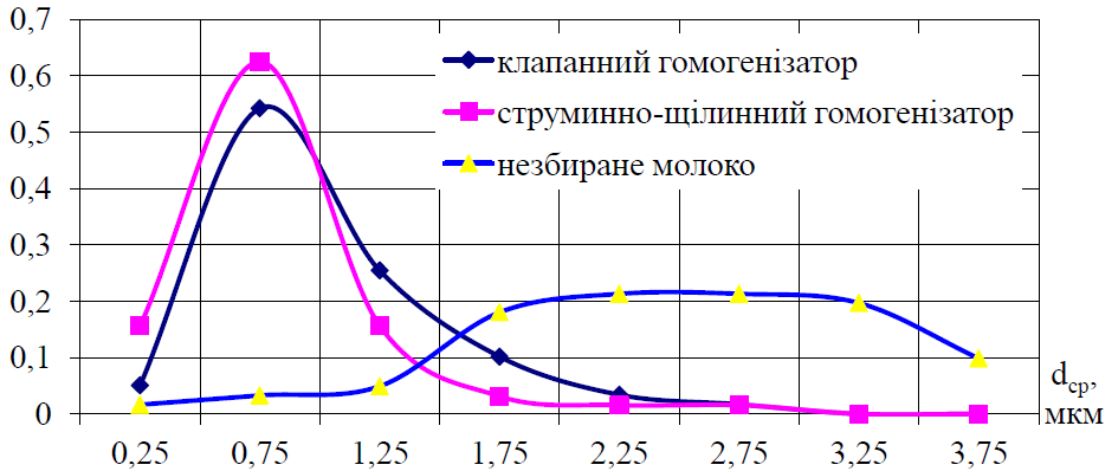
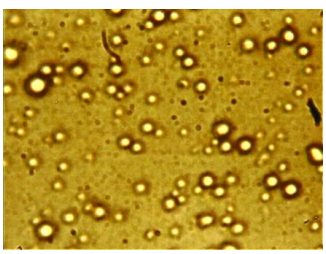
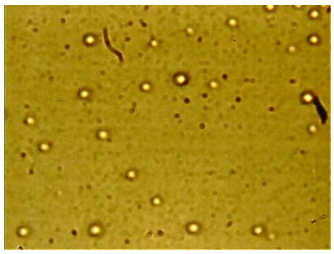


Рис. 4.12. Диференційні криві розподілу середнього діаметру жирових кульок за розмірними групами: 1–після струминно–щілинної гомогенізації; 2–після струминної гомогенізації з роздільним подаванням жирової фази; 3–необробленого молока

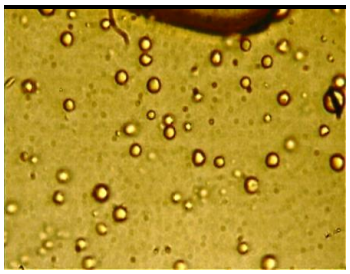
Для знайдених раціональних параметрів жирності та швидкості подачі вершків і ширини щілини ($Ж_в$=40 %, $\upsilon_в$=10 м/с, h=0,7 мм), після аналізу мікрофотографій було побудовано гістограму розподілу СЖК по розмірних групах (рис. 4.12). Отримані результати свідчать про збільшення для СЖК в діапазоні 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 $\boldsymbol{d_{ср}}$=2,49 мкм, дисперсія $\boldsymbol{\sigma}$=1,66, коефіцієнт варіації $\boldsymbol{V}$=33 %. Для молока після обробки в клапанному гомогенізаторі А1-ОГ2М: $\boldsymbol{d_{ср}}$=0,85 мкм, $\boldsymbol{\sigma}$=0,51 $\boldsymbol{V}$=18 % (при тиску 20 МПа), при цьому після обробки продукту в струминно–щілинному гомогенізаторі $\boldsymbol{d_{ср}}$=0,79 мкм, $\boldsymbol{\sigma}$=0,48 $\boldsymbol{V}$=15 %. Дані гістограми свідчать, що після обробки в СЩГРВ коефіцієнт варіації нижче аналогічного показника для клапанного гомогенізатора А1-ОГ2М на 17 %. При цьому СЖК продукту, обробленого в СЩГРВ, на 7 % менше, ніж у клапанних, які вважаються одними з найкращих за цим показником [70, 115, 122]. На рис. 4.13 наведені мікрофотографії не гомогенізованого молока та зразків молока, оброблених при різних режимах в СЩГРВ.



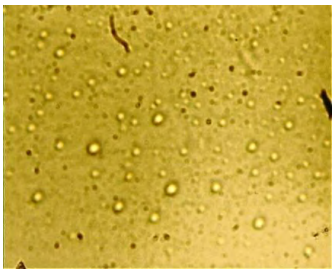
а)



б)



в)



г)

Рис. 4.13. Мікрофотографії: *а* – необробленого молока ($\boldsymbol{d_{ср}}$=3.2 мкм); *б* – після гомогенізації в СЩГРВ (при $\boldsymbol{h}$=0,5 мм; $\boldsymbol{d_к}$=3 мм; $\boldsymbol{Ж_в}$=10 %) ($\boldsymbol{d_{ср}}$=0,84 мкм); *в* – після

гомогенізації в СЩГРВ (при $\boldsymbol{h}$=0,5 мм; $\boldsymbol{d_к}$=3 мм; $\boldsymbol{Ж_в}$=30 %) ($\boldsymbol{d_{ср}}$=0,91 мкм); *г* – після гомогенізації в СЩГРВ (при $\boldsymbol{h}$=0,5 мм; $\boldsymbol{d_к}$=3 мм; $\boldsymbol{Ж_в}$=40 %) ($\boldsymbol{d_{ср}}$=0,79 мкм)

Отримані результати (рис 4. 13 б, в, г) свідчать про можливість отримання молочних продуктів з СЖК на рівні 0,75–0,8 мкм при зниженні питомих енергетичних витрат процесу до 7–10 разів відносно клапанних гомогенізаторів та до 8 % відносно струминного гомогенізатора молока з роздільною подачею вершків.

Висновки за розділом 4

1. Проведені експериментальні дослідження підтверджують визначальну роль різниці швидкостей руху дисперсійної та дисперсної фаз в струминно–щілинному гомогенізаторі, що відбувається за критерієм Вебера, критичне значення якого для отримання жирових кульок з середнім діаметром після руйнування 0,75–0,80 мкм складає 29.

2. Були знайдені емпіричні рівняння для визначення коефіцієнта СЩГРВ, що дали змогу стверджувати, що підвищення ефективності гомогенізатора необхідно досягати шляхом зменшення швидкості струменю, при одночасному збільшенні жирності жирової фази і ширини кільцевої щілини для подачі вершків.

3. Експериментальні дані потужностей насосів подачі жирової фази і знежиреного молока перевищують розрахункові параметри на 7–15%. Це можна пояснити втратами тиску у патрубках та з’єднувальній арматурі струминно–щілинного гомогенізатора. В цілому, дані, одержані при проведенні експерименту добре узгоджуються з теоретичними залежностями, отриманими для струминно–щілинного гомогенізатора молока.

5. Згідно результатів експериментальних досліджень, питне молоко з жирністю 3,5% та середнім розміром жирових кульок 0,8 мкм можливо отримати при ширині щілини, яка дорівнює 0,6–0,8 мм, швидкості потоку дисперсійної фази 60–90 м/с, використанні вершків жирністю 33–43%, які подаються зі швидкістю 7–11 м/с, при цьому питомі енергетичні витрати процесу гомогенізації не будуть перевищувати 0,88–0,92 кВт·год/т.

6. Проведено оцінку дисперсних характеристик молочної емульсії, отриманої після обробки в СЩГРВ. Коефіцієнт варіації 15%, а СЖК молочної емульсії 0,79 мкм, що нижче аналогічних показників для клапанного гомогенізатора А1-ОГ2М на 17 і 7 % відповідно. Це доводить високу якість молочної емульсії після обробки в дослідному гомогенізаторі.

ПРАКТИЧНА РЕАЛІЗАЦІЯ РЕЗУЛЬТАТІВ ДОСЛІДЖЕНЬ

5.1. Методика розрахунку параметрів струминно-щілинного гомогенізатора молока з проведенням нормалізації молока за жирністю

Для практичної реалізації отриманих результатів та впровадження струминно-щільового диспергатора в виробництво необхідно розробити методику розрахунку промислового зразка гомогенізатора. Вихідними технологічними даними для розрахунку струминно-щілинного гомогенізатора молока з роздільною подачею вершків з використанням нормалізації за жирністю є:

– необхідний середній діаметр жирових кульок молока d_{cp} після гомогенізації [59, 80, 141];

– загальна продуктивність струминно-щілинного гомогенізатора $Q_г$, мінімальні значення якої для промислового зразку складають 1000 кг/год [13, 80], або $2{,}8 \cdot 10^{-4}$ м^3/с;

– жирність знежиреного молока, що для процесів нормалізації знаходиться на рівні 0,05% [68, 141];

– жирність вершків, що задана технологічними вимогами проведення процесу та згідно результатів аналітичних та експериментальних досліджень для отримання високого ступеню дисперсності має дорівнювати 40–50% [102, 107].

Максимальний ступінь дисперсності (0,8 мкм) серед відомих машин, що використовуються у молокопереробній галузі забезпечують клапанні гомогенізатори [13, 59, 139]. При цьому відбувається зменшення середнього розміру жирових кульок у 4 рази. Це є достатнім показником з точки зору технологічних процесів з виробництва молочних продуктів, які використовують гомогенізацію, що дає змогу прийняти його в якості розрахункового параметру промислової установки.

В технологічних лініях виробництва молочних продуктів, у більшості випадків, диспергатор встановлюють після пастеризації [52, 59, 88]. При одночасному проведенні нормалізації і гомогенізації, їх проведенню передує операція сепарації, яку доцільно проводити при 65–70°С. Раціональні значення

температури молока, дорівнюють 60…65°С [28, 115].

Більшість технологічних інструкцій, що регламентують виробництво молочної продукції для отримання заданої дисперсності готового продукту задаються значенням тиску клапанного диспергування [9, 13, 80]. При цьому розрахувати середній діаметр жирових кульок після гомогенізації можливо за формулою [9, 59, 68]

$$d_{ср} = \frac{3,8 \cdot 10^{-3}}{\sqrt{\Delta p_{зн}}}, \tag{5.1}$$

Для визначення продуктивності по знежиреному молоку та вершках, використовуємо рівняння матеріального балансу [13, 70]

$$\frac{Q_г}{Ж_в - Ж_{зн}} = \frac{Q_в}{Ж_{н.м} - Ж_{зн}} = \frac{Q_{зн}}{Ж_в - Ж_{н.м}}, \tag{5.2}$$

з формули (5.2) визначаємо подачу відповідних компонентів емульсії

$$Q_{зн} = \frac{Q_г(Ж_в - Ж_{зн})}{\rho_м(Ж_в - Ж_{н.м})}, \tag{5.3}$$

$$Q_в = \frac{Q_г\left(Ж_в - Ж_{зн}\right)}{Ж_{н.м} - Ж_{зн}}. \tag{5.4}$$

Якщо жирність жирової фази не задана вимогами, з метою отримання жирових кульок, з мінімальним середнім діаметром кожної частки рекомендовано використовувати вершки з найбільшою жирністю, обумовленою технологією виробництва продукта.

Необхідну швидкість знежиреного молока для отримання продукту з заданим середнім розміром жирових часток знаходимо з формули [107]

$$\upsilon_{зн} = \sqrt{\frac{We_к \cdot \sigma_{ж-п}}{2\rho_{пл} \cdot d_{ср} \cdot k_щ^2}}. \tag{5.5}$$

Параметри камери гомогенізації в місці найбільшого звуження струминного гомогенізатора при використанні камери, що має циліндричну форму визначимо як

$$\upsilon_{зн} = \frac{Q_{зн}}{\varepsilon_к \cdot S}, \tag{5.6}$$

де

$$S = \frac{\pi \cdot d_к^2}{4}. \qquad (5.7)$$

Тоді внутрішній діаметр камери щілинного гомогенізатора в місці найбільшого звуження буде дорівнювати

$$d_к = \sqrt{\frac{4 \cdot Q_{зн}}{\varepsilon_к \cdot \pi \cdot \upsilon_{зн}}}. \qquad (5.8)$$

Для розрахунків ширину кільцевої щілини для подачі вершків приймемо значення h=0,6–0,8 мм, тобто значення, які були визначенні при проведенні оптимізації експериментальних даних [117].

Швидкість подачі жирової фази у місці входження до руху потока знежиреного молока можна знайти зі співвідношення

$$\upsilon_в = \frac{Q_в}{\pi \cdot d_к \cdot h}. \qquad (5.9)$$

Для гарантованого забезпечення подачі знежиреного молока та жирової фази, слід обирати насоси об’ємного типу дії, надлишкові тиски для підбору яких розраховуються як [107]

$$\Delta p_{зн} = \frac{8 \cdot Q_{зн}{}^2 \cdot \rho_{зн}}{\mu_к{}^2 \cdot \pi^2 \cdot d_к{}^4}, \qquad (5.10)$$

$$\Delta p_в = \frac{Q_в{}^2 \cdot \rho_в}{2\mu_в{}^2 \cdot \pi^2 \cdot d_к^2 \cdot h^2}, \qquad (5.11)$$

де $\mu_к$ – коефіцієнт витрат для внутрішніх поверхонь конічного профілю конфузора складає 0,95;

$\mu_в$ – коефіцієнт витрат для внутрішніх поверхонь конфузора та дифузора на початковій ділянці в місці всмоктування вершків до щілинного каналу визначався дослідним шляхом за методикою, описаною в пункті 3.4 дисертаційної роботи, отримані дані наведені на графіку (рис. 4.5).

При зниженні $\mu_в$ у 3,8 рази при зменшенні ширини щілини з 0,8 мм до 0,6 мм необхідна потужність насосу подачі вершків згідно формули (2.68) зростає в 14,4 рази.

Потужності насосів, що використовуються для приводу насосів подачі знежиреного молока та вершків можна визначити з залежностей

$$P_в = \frac{Q_в \cdot \Delta p_в}{\eta_в}, \qquad (5.13)$$

$$P_{зн} = \frac{Q_{зн} \cdot \Delta p_{зн}}{\eta_{нзн}\eta_{пзн}}, \qquad (5.14)$$

де $\eta_{нв}$, $\eta_{нзн}$ – відповідно коефіцієнти корисної дії насосу подачі жирової фази і знежиреного молока;

$\eta_{пзн}$ – коефіцієнт корисної дії редуктора і передач між насосом дисперсійної фази та відповідним електродвигуном.

Для подавання вершків в промисловому зразку пропонується використовувати насос, коефіцієнт корисної дії якого складає 0,8. Для приводу насосу використовується асинхронний електричний двигун з коефіцієнтом корисної дії, що дорівнює 0,71. Для подавання знежиреного молока використовується насос, який має коефіцієнт корисної дії 0,81. Між ним та двигуном встановлюється циліндричний редуктор 1ЦУ-160 з коефіцієнтом корисної дії 0,98 [139, 205]. Для приводу харчового насосу подачі знежиреного молока використовується електричний двигун 3000 об/хв з коефіцієнтом корисної дії 0,84 [205].

Загальна потужність струминного гомогенізатора визначається з формули

$$P = \frac{P_{зн} + P_в}{\eta_{двв}\eta_{двз}}, \qquad (5.15)$$

де $\eta_{двв}$, $\eta_{двз}$ – коефіцієнти корисної дії двигунів приводу насосів подачі знежиреного молока та вершків.

Питомі витрати енергії струминно-щільового гомогенізатора молока можна визначити як

$$E_{пит} = \frac{P}{Q_г}. \qquad (5.16)$$

Основні конструктивні, технологічні та енергетичні показники для типового ряду гомогенізаторів за показником продуктивності, вибраних згідно [30] зведені до табл. 5.1. При розрахунку прийнято: $Ж_в$=40%, $Ж_{зн}$=0,05%, $Ж_{н.м}$=3,2 %. $We_к$=28, $k_щ$= 0,8.

Результати (табл. 5.1) свідчать, що для отримання жирових кульок, середній

діаметр яких знаходиться в межах технологічно обумовлених значень при продуктивності промислового зразка на рівні 1 та 2,5 т/год можна отримати при однакових значеннях потужності насосу, який використовується для подачі вершків за умови збільшення ширини кільцевої щілини на 0,1 мм.

Аналіз отриманих результатів дає змогу встановити, що для забезпечення продуктивності промислового зразка струминно-щільового гомогенізатора молока на рівні 10 т/год діаметр камери в місці найбільшого звуження повинен мати вдвічі менше значення, порівняно з діаметром камери в місці найбільшого звуження при продуктивності 2,5 т/год. Однакові потужності для приводу насосів подачі вершків для продуктивності 1 та 2,5 т/год досягаються за рахунок збільшення величини кільцевої щілини на 0,1 мм. В подальшому за умови збільшення ширини щілини на 0,05 мм необхідні потужності приводу насосів подачі вершків збільшуються вдвічі при 5 та 10 т/год [125, 184].

Таблиця.5.1

Розрахункові дані типорозмірів струминно-щілинного гомогенізатора молока з роздільним подаванням вершків

Продуктивність, $Q_г$, т/год	Діаметр камери $d_{кам}$, мм	Ширина щілини h, мм	Потужність насосу вершків, $P_в$, кВт	Потужність насосу знежир. молока, $P_{зн}$, кВт	Сумарна потужність, P, кВт	Питоме енергоспоживання, $E_{пит}$ кВт·год/т
1,0	2,60	0,60	0,128	0,616	0,744	0,74
2,5	4,00	0,70	0,128	1,719	1,847	0,74
5,0	5,65	0,75	0,241	3,455	3,696	0,74
10,0	8,00	0,80	0,528	6,876	7,404	0,74

Збільшення ширини кільцевої щілини необхідно для забезпечення заданої продуктивності промислового зразка, при цьому швидкість подачі вершків

збільшується з 4,3 м/с для продуктивності 1 т/год до 10,5 м/с при продуктивності 10 т/год, що забезпечує технологічно обумовлену для отримання необхідного середнього діаметра жирових кульок різницю швидкостей дисперсійної (44,3–53,0 м/с) та дисперсної (4,3–10,5 м/с) фаз.

Майже 10 разове зростання необхідної потужності для приводу насосу подачі знежиреного молока прямо корелює з ростом продуктивності з 1 до 10 т/год при зростанні потужності з 0,616 кВт до 6,876 кВт. Менш виразне зростання потужності насосу подачі вершків з 0,128 кВт при 1 та 2,5 т/год до 0,528 кВт при продуктивності 10 т/год пояснюється поступовим збільшенням ширини кільцевої щілини.

Отримані дані свідчать про 10 разове зниження питомих енерговитрат процесу диспергування порівняно з найбільш поширеними в промисловості клапанними диспергаторами та зниження енерговитрат на 20% порівняно з їх показником для протитечійно-струминного гомогенізатора, що досягається за рахунок зниження робочого тиску процесу та відповідно швидкості подачі знежиреного молока та вершків при організації подачі жирової фази в місці найбільшого звуження, а отже й максимальної різниці швидкостей фаз. Досягти такого результату можливо за рахунок використання конструкції, принцип дії якої засновано на створенні максимальної різниці між швидкостями дисперсійної і дисперсної фаз [184].

Методика розрахунку СЩГРВ впроваджена в навчальний процес кафедри «Обладнання переробних та харчових виробництв імені професора Ф.Ю.Ялпачика» (ТДАТУ), що підтверджено актом впровадження (додаток. Ж). Документація на струминно-щілинний гомогенізатор молока та методика його розрахунку передана до ПП ВКФ «Харчоналадка» (м. Мелітополь, Запорізької області), що підтверджено відповідним актом (додаток З).

5.2. Розробка промислового зразка СЩГРВ для гомогенізації молока

За допомогою методики, наведеної у попередньому розділі розроблено струминно-щілинний гомогенізатор молока (продуктивність 1,25 т/год і встановлена

потужність 8 кВт) для заміни клапанного гомогенізатора К5-ОГ2А-1.25 (продуктивність 1,25 т/год і встановлена потужність 11 кВт) [169, 182, 184].

В якості насоса, що забезпечує подачу вершків обрано шестеренний насос, BE-G20 HP 0.6, який забезпечує продуктивність подачі жирової фази на рівні 1000 кг/год. Для його приводу використовується використовується асинхронний електричний двигун АИРЕ 71 L-2 потужністю 0,55 кВт. Для подачі знежиреного молока до камери струминно–щілинного гомогенізатора молока рекомендовано обирати насос об’ємного принципу дії, наприклад шестеренний насос для харчових продуктів НШП–10, який має максимальну продуктивність на рівні 10 м^3/год при робочому тиску до 2,4 МПа. Для приводу харчового насосу подачі знежиреного молока використовується електричний двигун 3000 об/хв АИРС 112 М2 потужністю 7,5 кВт. Для його з’єднання з насосом подачі знежиреного молока, Між ним та двигуном встановлюється циліндричний редуктор 1ЦУ-160 з передаточним відношенням 2…2,5.

Машина являє собою зварний каркас, в верхній центральній частині якого змонтовано камеру гомогенізації. В нижній частині знаходиться електродвигун приводу обертання шестеренного насоса подачі знежиреного молока, який з’єднується з ним через редуктор. На нижній частині рами розташований і шестеренний насос з двигуном, що забезпечують подачу необхідної кількості вершків. Новизна конструктивних елементів гомогенізатора захищена патентами України, наведеними в додатку К [132, 133, 134, 135, 136, 137]. Оскільки розрахунок струминно–щілинного гомогенізатора ґрунтується на критеріальних залежностях класичної гідродинаміки, тому результати випробувань в умовах промислового виробництва у відношенні впливу на якість диспергування конструктивних і технологічних параметрів запропонованої машини не відрізняються від результатів, одержаних при обробці молока на лабораторному зразку СЩГРВ. Варіант конструктивного рішення струминно–щілинного гомогенізатора молока з роздільною подачею вершків, наведений на рис. 5.1.

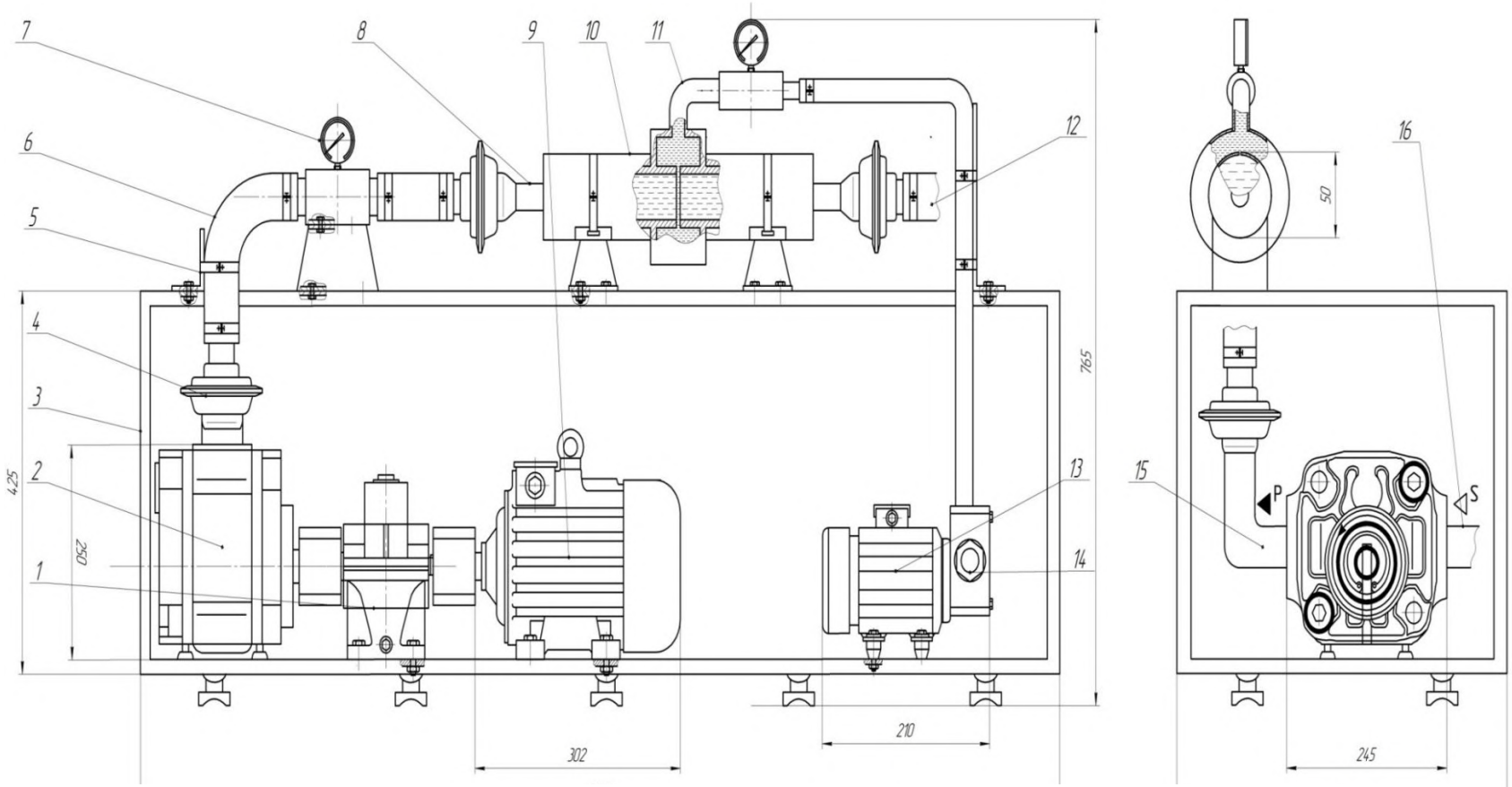


Рис. 5.1. – Промисловий зразок струминно–щілинного гомогенізатора молока:
1 – циліндричний редуктор 1 ЦУ–160; 2 – насос для подачі знежиреного молока НШП–10; 3 – зварна рама; 4 – з’єднувальний фланець; 5 – кронштейн; 6 – металева труба; 7 – манометр; 8 –патрубок подачі знежиреного молока 9 – електродвигун АИРС 112 М2; 10 – камера гомогенізації; 11 – патрубок подачі вершків; 12 – патрубок відведення гомогенізованої емульсії – патрубок відводу гомогенізованого продукта; 13 – електродвигун АИРЕ 712 L2; 14 – насос подачі вершків ВА–G 20 Н0.6; 15 – подача вершків; 16 – нагнітання вершків до камери гомогенізації;

Технічна характеристика СЩГРВ, складена на основі експлуатаційних випробувань, зведена до таблиці 5.2.

Таблиця 5.2

Технічна характеристика промислового зразка струминно–щілинного гомогенізатора молока

Показник	Значення
Продуктивність, т/год	2,5
Середній діаметр часток після обробки молока, мкм	0,80
Потужність електродвигуна приводу, кВт	8,0
Діаметр камери в місці найбільшого звуження, мм	4,0
Ширина кільцевої щілини, мм	0,7
Габаритні розміри, мм: - довжина - ширина - висота	 1400 525 765

В таблиці 5.3 наведено порівняльну характеристику розробленого гомогенізатора струминно–щілинного типу з клапанним та іншими перспективними видами диспергаторів [37, 86, 115, 122].

Таблиця 5.3

Порівняльна характеристика перспективних типів гомогенізаторів

Тип гомогенізатора	Продуктивність, т/год	Мінімальний діаметр часток після гомогенізації, мкм	Питомі енерговитрати, кВт/т
Клапанний, А1-ОГ2М-2,5	2,5	0,75	7,2

Клапанний К5–ОГА 10	10	0,8	7,4
Сопловий, ОГВ	1	1,0	4,4
Вихровий	5	0,77	3,8
Імпульсний	1	0,7	4
Протитечійно-струменевий	2	0,75	2,8
Струминний гомогенізатор з роздільною подачею вершків	2,5	0,8	0,8
Струминно–щілинний гомогенізатор	2,5	0,8	0,74

Впровадження СЩГРВ в технологічних лініях виробництва молока та молочної продукції відрізняється від використання клапанних машин можливістю одночасного проведення гомогенізації та нормалізації. Недоліком такого способу є необхідність проведення попередньої сепарації молока. Однак, враховуючи, те, що ця операція використовується для більшості технологій виробництва питного молока, впровадження такого рішення дозволяє досягти зниження питомих витрат енергії порівняно з енергоефективними конструкціями струминних гомогенізаторів ще на 8%.

5.3. Економічна ефективність впровадження струминно–щілинного гомогенізатора молока

В технологічних процесах переробки молочної продукції переважної більшості спеціалізованих підприємств України для диспергування застосовуються клапанні гомогенізатори Одеського механічного заводу типів К5-ОГА, А1-ОГ2М, К5-ОГ2А. Розроблена конструкція струминно–щілинного гомогенізатору здатна замінити такі диспергатори для виробництва питного молока в діапазоні жирності 2,5 – 3,5% та може бути використана при переробці кисломолочних продуктів та емульсій жирністю до 3,5%. Оцінити економічну ефективність використання

розробленого струминно–щілинного гомогенізатора молока для заміни диспергатора К5-ОГ2А-1.25, який використовується на МЖК «Південний» (м. Мелітополь Запорізької області). Для розрахунку скористаємось загальноприйнятою методикою [86, 122].

Розрахунок ґрунтується на даних МЖК «Південний», на якому здійснено впровадження, що підтверджує відповідний акт (додаток Л). Вартість та енергетичні витрати розробленої моделі ґрунтуються на даних ПП ВКФ «Харчоналадка» (м. Мелітополь Запорізької області) та підтверджуються характеристиками акту передачі технологічно– конструкторської документації (додаток З). Послідовність розрахунку надана у додатку Д. Отримані результати зведені до таблиці 5.4.

Таблиця 5.4

Порівняльні техніко-економічні показники струминно–щілинного гомогенізатора молока та клапанного гомогенізаторів

Найменування показника	Значення показників техніко-економічної ефективності	
	Клапанний гомогенізатор К5-ОГ2А-1,25	Розроблений гомогенізатор
Питомі капіталовкладення, грн/т	141,30	19,50
Ступінь зниження питомих витрат електроенергії, %	–	59,00
Ступінь зниження експлуатаційних витрат,%	–	40,00
Приведені витрати, грн/т	73,66	44,26
Економічний ефект на одну тонну молочної продукції, грн/т	–	29,40
Річний економічний ефект, грн	–	238350,00
Строк окупності, рік	–	0,36

Струминно–щілинний гомогенізатор, згідно результатів аналізу даних, наведених в табл. 5.2, 5.3, 5.4) характеризується меншими питомими витратами електроенергії, більшою зручністю в експлуатації та ремонті, нижчими масо-габаритними показниками. Наявність таких переваг при використанні струминно–щілинного гомогенізатору для гомогенізації молока дозволяє підвищити її конкурентоспроможність, що досягається за рахунок зниження собівартості одиниці молочної продукції [106].

Проведений економічний аналіз свідчить, що використання замість клапанного гомогенізатора К5-ОГ2А-1,25 струминно–щілинного гомогенізатора молока, та впровадження в виробництво, що проводилось на МЖК «Південний» довели зниження енергетичних витрат процесу диспергування на 59%. Такий економічний ефект досягається за рахунок зниження робочого тиску процесу, використання менш енергоємного способу роздільної гомогенізації та поєднання диспергування та нормалізації з дотриманням технологічних вимог до кожної з цих операцій. Суттєве підвищення ефективності диспергування жирової фази молока та відсутність в конструкції струминно–щілинного гомогенізатору швидкозношуваних механізмів, обумовили зниження експлуатаційних витрат на 40% [106]. Характеристики струминно–щілинного гомогенізатора молока дозволяють досягти при його використанні річного економічного ефекту на рівні 238350 грн при цьому термін його окупності не перевищує 0,36 роки.

Висновки за розділом 5

1. На підставі аналітичних та експериментальних досліджень запропонована методика обчислення конструкційних, технологічних, гідравлічних і енергетичних параметрів роботи струминно–щілинного гомогенізатору молока.

2. Розроблений промисловий зразок струминного гомогенізатора молока продуктивністю 1–10 т/год, що має встановлену потужність електродвигуна 8 кВт, дозволяє отримувати молочну емульсію з середнім діаметром жирових кульок 0,75–0,80 мкм, питомі енерговитрати розробленого гомогенізатора не перевищують 0,80кВт·год/т. Розроблена технічна документація передана до ПП ВКФ «Харчоналадка» (м. Мелітополь, Запорізької області).

3. Порівняльний аналіз найбільш поширених в молокопереробній промисловості і перспективних видів диспергаторів свідчить, що розроблений гомогенізатор забезпечує середній розмір жирових кульок згідно технологічно обумовлених вимог до якості питного молока при в 8–10 разів менших питомих енергетичних витратах процесу відносно клапанних гомогенізаторів молока.

4. Промисловий зразок струминно–щілинного гомогенізатору молока, був впроваджений на МЖК «Південний» (м. Мелітополь, Запорізької області) замість клапанного гомогенізатора К5-ОГ2А-1.25. При переробленому об’ємі молока за період випробувань, що склав 1250 тон, отриманий прибуток склав 36750 грн, що дорівнює 29,40 грн/т гомогенізованої емульсії.

5. Економічний ефект, який було досягнуто при заміні клапанної машини К5-ОГ2А-1.25 на струминно–щілинний гомогенізатор молока складає 238350тис. грн. за рік, що обумовлено зниженням експлуатаційних витрат на 40% і питомих витрат на 59%, при терміні окупності витрат, що не перевищує 0,36 роки.

ВИСНОВКИ

В дисертаційній роботі викладене нове вирішення науково-технічної задачі – зниженню енергоємності процесу гомогенізації молока як сировини для виготовлення молочних продуктів, шляхом обґрунтування параметрів СЩГРВ при збереженні високих показників якості емульсії.

1. В результаті проведеного аналізу гіпотез, механізмів та існуючих конструкцій для гомогенізації було доведена доцільність використання критерію Вебера як базової залежності для розрахунку параметрів гомогенізатора, в якому головною складовою є різниця швидкостей дисперсійної та дисперсної фаз. Визначено, що для СЩГРВ основним параметром, який обумовлює гомогенізацію є швидкість потоку знежиреного молока, яка повинна складати 60–90 м/с. Експериментально визначене критичне значення критерію Вебера, яке дорівнює 29.

2. Отримана математична модель гідродинамічного диспергування жирової фази молока в СЩГРВ, яка дозволила встановити, що для отримання гомогенізованого молока жирністю 3,5% з середнім діаметром жирових кульок 0,75–0,80 мкм необхідно використовувати камеру, внутрішні поверхні якої мають конічну форму, вершки 33–43% жирності, які треба подавати зі швидкістю 7–11 м/с, при цьому питомі енергетичні витрати процесу гомогенізації складають 0,85-0,87кВт·год/т.

3. Одержані та експериментально підтверджені математичні залежності, які пов'язують середній діаметр жирових кульок після диспергування, критерій Вебера з розмірами кільцевої щілини для СЩГРВ при проведенні одночасно з диспергуванням операції нормалізації. Встановлене раціональне значення ширини кільцевої щілини - 0,6 до 0,8 мм, і її довжини 8,7–8,9 мм.

4. Розроблено методику розрахунку основних параметрів та запропоновано конструктивну схему промислового зразку СЩГРВ, використання якого дозволяє отримати молочну емульсію з середнім діаметром жирових кульок, що дорівнює 0,75–0,80 мкм. При цьому питомі енерговитрати розробленого гомогенізатора не перевищують 0,80 кВт·год/т.

5. Здійснене впровадження промислового зразку гомогенізатора на МЖК «Південний» (м. Мелітополь, Запорізької області) замість клапанного гомогенізатора К5-ОГ2А-1.25. Отриманий прибуток 29,40 грн/т гомогенізованого молока, при цьому економічний ефект складає 238350 грн. за рік, що обумовлено зниженням експлуатаційних витрат на 40% і питомих витрат енергії на 59%, при терміні окупності витрат, що не перевищує 0,36 роки.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Абрамович Г.Н. Теория турбулентных струй. М: Эколит; 2011. 728 с.

2. Аерація молочних продуктів. *Молочное дело*. Київ, 2005. Вип.11. С.35.

3. Амбросимов В.М., Буркитбаев М.О. Определение дисперсных характеристик молока. *Техника в сельском хозяйстве*. 1993. № 4. С. 28–30.

4. Анискин С.В., Протодьяконова О.И. Течение газа в струйном газопромывателе при распаде струи жидкости на капли. *Химия и технология бумаги*. межвуз.сб-к научн.трудов. СПб. 2001. С.60–69.

5. Артемасов В.В. Интенсификация процессов гомогенизации и диспергирования при получении жидких комбинированных продуктов: автореф дис на получение степени канд. техн. наук: 05.18.12. Кемерово, 2004. 18 с.

6. Арсеньева Т.П. Развитие теоретических основ и разработка технологий низколактозных молочных продуктов с регулируемым жирнокислотным составом: автореф дис. на получение степени д-ра. техн. наук: 05.18.04/ С.-Петерб. гос. ун-т низкотемператур. и пищевых технологий. СПб, 2009. 423 с.

7. Бабич Д.В., Самойчук К.О. Методика визначення якості гомогенізації молока. *Збірник наукових праць магістрантів та студентів Таврійської державної агротехнічної академії.* Мелітополь. 2007. Вип.6. Т.3. С.14–17.

8. Балабышко А.М., Зимин А.И., Ружицкий В.П. Гидромеханическое диспергирование. М: Наука. 1998. 331 с.

9. Барановский Н.В. Влияние гидравлических факторов на степень дисперсности жира при гомогенизации молока: автореф дис. на получение степени канд. техн. наук. Моск. технол. ин-т мясной и молочной пром-сти. М, 1985. 183 с.

10. Басок Б.И., Накорчевский А.И., Рыжкова Т.С., Пироженко И.А. Экспериментальные исследования гидравлических и тепловых характеристик потока в роторно–пульсационных аппаратах. *Промышленная теплотехника*. 2001. Т.23. № 6. С.73–76.

11. Башта Т. М., Руднев С.С., Некрасов Б.Б. Гидравлика, гидромашины и гидроприводы. М: Альянс. 2010. 423с.

12. Белов. И.А. Моделирование турбулентных течений. учеб. пособие. СПб. Балт. гос. техн. ун-т. 2001. 108 с.

13. Бредихин С.А., Космодемьянский Ю.В., Юрин В.Н. Технология и техника переработки молока. М: Колос. 2001. 420 с.

14. Бродский Ю.А., Гудрик В.Г. Чем заменить молочный жир? *Переработка молока*. 2004. Вып 2. С.18–19.

15. Будрик В.Г. Создание и исследование роторно-пульсационной установки для производства жидких и пастообразных молочных продуктов : автореф дис. на получение степени канд. техн. наук: 05.18.12/ Всерос. науч.-исслед. ин-т мясной пром-сти им. В.М. Горбатова. М, 2005. 191 с.

16. Бурыкин А.И. О физической модели процесса гомогенизации. *Молочная промышленность*. 2012. № 2. С. 30–32.

17. Бурыкин А.И. Некоторые расчеты к физической модели процесса гомогенизации. *Молочная промышленность*. 2012. №3. С. 18–19.

18. Бурыкин А.И. Сравнительная оценка процессов гомогенизации и распыления. *Молочная промышленность*. 2013. № 1. С. 40–41.

19. Бэтчелор Дж. К. Введение в динамику жидкости. пер. с англ.. В. П. Вахомчика и А. С. Попова/ под редакцией Г. Ю. Степанова. Репринтное издание. Москва-Ижевск. 2004. 757с.

20. Веремеев С.А., Семко А.Н. Взаимодействие импульсной затопленной струи жидкости с преградой. *Прикладна гідромеханіка*. 2008. Т. 10. №1. С. 3–9.

21. Владыкина Т.Ф. Гомогенизация молока и сливок. М: АгроНИИТЭИМИП. 1982. 287 с.

22. Гаркуша В.Б. Розробка і дослідження установки для обробки продуктів харчування надвисоким тиском: автореф. дис. на здобуття ступеню канд. техн. наук: 05.18.12/ Донецький державний університет економіки і торгівлі ім. М. Туган-Барановського. Донецьк, 2002. 20 с.

23. Гвоздєв О.В., Самойчук К.О., Кокоулін Е.П. До методики визначення якості гомогенізації молока. *Праці Таврійської державної агротехнічної академії*. 2005. Вип.25. С. 38–42.

24. Гельфанд Б.Е., Вьель Б., Гёкальп И., Шаво К. Безударное дробление капель. Временные характеристики. *Прикл. мех. и техн. физ.* 2001. Т. 42. №1. С. 72–76.

25. Голубева Л.В., Пономарев А.Н. Современные технологии и оборудование для производства питьевого молока. М: Дели принт. 2004. 179 с.

26. Горбатова К.К., Гунькова П.И. Биохимия молока и молочных продуктов под общ. ред. К.К. Горбатовой. 4-е изд., перераб. и доп. СПб: ГИОРД. 2010. 336с.

27. Горбатова К.К. Химия и физика молока. СПб: ГИОРД. 2003. 288 с.

28. Гордезиани В.С. Производство заменителей цельного молока. М: Агропромиздат. 1990. 272 с.

29. Гонор А.Л., Ривкинд В.Я. Динамика капли. Итоги науки и техники. М. 1982. т.17. С. 86–146.

30. ГОСТ. 27203-87 «Гомогенизаторы для молока. Основные параметры».

31. Грабов Л.Н., Мерщий В.И., Грабова Т.Л. Проблема трансформации энергии в системе «твёрдое тело – жидкость» при тонком и супертонком диспергировании. *Промышленная теплотехника*. 2001. Т.23. № 4–5. С.74–79.

32. Грановский В.Я. Новый гомогенизатор. М: Пищ. Пром-ть. 1998. №12. С.30–31.

33. Грановский В.Я. Сравнительная оценка диспергирующих устройств. *Молочная промышленность*. 1999. № 11. С. 37–38.

34. Гуликов А.В. Экспериментальное и теоретическое исследование процесса соударения капли жидкости с высокотемпературной стенкой: автореф. дис. на получение степени канд. техн. наук: 01.04.14/ Моск. гос. авиац. ин-т. М. 2007. 28 с.

35. Дейниченко Г.В., Самойчук К.О., Ковальов О.О., Пацький І.Ю. Дослідження діаметру каналу подавання вершків струминного гомогенізатора молока. *Праці ТДАТУ*. 2017. Вип. 17. Т.1. С. 195–206.

36. Дейниченко Г. В., Самойчук К.О., Ковальов О.О. Конструкції струминних диспергаторів жирової фази молока. *Праці ТДАТУ*. 2016. Вип. 16. Т. 1. С 219–227.

37. Дейниченко Г.В., Самойчук К.О., Ковальов О.О. Раціональні параметри струминного гомогенізатора молока. *Інноваційні аспекти розвитку обладнання*

харчової і готельної індустрії в умовах сучасності тези доповідей міжнар. конф. Харків: ХДУХТ, 2017. С 44–45.

38. Дейниченко Г.В., Самойчук К.О., Ковальов О.О. Струминні гомогенізатори молока. *Розвиток харчових виробництв, ресторанного та готельного господарстві торгівлі: проблеми, перспективи, ефективність* : тези доповідей міжнар. наук.-практ. конф. Харків: ХДУХТ, 2016. С. 44–45.

39. Дідур В.А., Савченко О.Д., Журавель Д.П., Мовчан С.І. Гідравліка та її використання в агропромисловому комплексі. Підручник. К: Аграрна освіта. 2008. 577 с.

40. Добросельский К.Г., Просянник А.Г. Симметрия уравнений Рейнольдса и полуэмпирические теории турбулентной затопленной струи. *Информатика и системы управления*. 2004. № 1. С.37–43.

41. Долинский А.А., Басок Б.И., Шурчкова Ю.А. Анализ эффективности гомогенизации эмульсии различными диспергирующими устройствами. *Экотехнологии и ресурсосбережение*. 1995. № 6. С.40–43.

42. Долинский А.А., Шурчкова Ю.А., Буримский В.К. Влияние некоторых параметров на диспергирование жировых шариков при адиабатном вскипании молока в вакууме. *Молочная промышленность*. 2002. № 2. С. 55–56.

43. Долинский А.А., Шурчкова Ю.А., Буримский В.К. Диспергирование жировых шариков при вакуумной гомогенизации. *Молочная промышленность*. 2003. № 2. С. 55–56.

44. Долинский А.А., Басок Б.И. Дисперсный анализ эмульсии при вакуумной технологии гомогенизации. *Экотехнологии и ресурсосбережение*. 1995. № 5. С. 33–36.

45. Долинский А.А., Шурчкова Ю.А., Буримский В.К. Исследование процесса эмульгирования при адиабатном вскипании многокомпонентных систем. *Молочная промышленность*. 1986. № 10. С. 45–47.

46. Долинский А.А., Накорчевский А.И., Корчинский А.А. Моделирование работы пульсационной установки с переменной геометрией рабочего объёма. докл. Акад. Наук Украины. 1994. № 2. С. 89–94.

47. Долинский А.А., Басок Б.И., Шурчкова Ю.А. Седиментационный анализ водно–жировых эмульсий при вакуумной технологии гомогенизации. *Экотехнологии и ресурсосбережение*. 1995. № 1. С. 26–29.

48. Драгун Н.А., Клятвина Т.С. Струйный эмульгатор для заменителей цельного молока. *Молочная промышленность*. 1986. № 3. С. 3–4.

49. Зайцев А.И., Бытев Д.О. Ударные процессы в дисперсно-пленочных системах. М: Химия. 1994. 176 с.

50. Зайчик Л.И., Алипченков В.М. Статистические модели движения частиц в турбулентной жидкости. М: Физматлит. 2007. 312 с.

51. Запевалов П.П., Керученко Л.С., Клятвина Т.С. Исследование процесса дробления жиров в потоке обезжиренного молока для получения жидкого ЗЦМ. Рациональное использование сырья и повышение эффективности производства заменителей цельного молока. *Труды ВНИМИ.* 1984. С. 39–42.

52. Захарова Л.М., Мазеева И.А., Галстян А.Г. Технология комбинированных молочных продуктов. Кемерово: КемТИПП. 2008. 100 с.

53. Иванец Г.Е., Остроумов Л.А., Плотников В.А. Применение роторно–пульсационного аппарата при производстве жидких комбинированных продуктов питания на молочной основе. *Достижения науки и техники АПК*. 2001. №7. С. 30–33.

54. Иванец В.Н., Бакин И.А., Иванец Г.Е. Интенсификация процессов гомогенизации и диспергирования при получении сухих, увлажненных и жидких комбинированных продуктов. *Техника и технология пищевых производств*. 2012. Кемерово: КемТИПП. №03. 154 с.

55. Иваницкий Г.К., Корчинский А.А., Матюшкин М.В. Математическое моделирование процессов в пульсационном диспергаторе ударного типа. *Промышленная теплотехника*. 2003. Т.25. № 1. С. 29–34.

56. Иваницкий Г.К. Моделирование процессов деформирования и дробления капель при движении в жидкости. *Промышленная теплотехника*. 1997. т.19. № 1. С.8–16.

57. Иваницкий Г.К. Численное моделирование динамики пузырьков в

явлениях акустической кавитации. *Промышленная теплотехника*. 2003. Т.25. № 1. С. 22–28.

58. Игнатович Э. Химическая техника. Процессы и аппараты Ч.2. М:Техносфера. 2007. 655 с.

59. Калинина Л.В., Ганина В.И. Технология цельномолочных продуктов. Сп.б: ГИОРД. 2008. 248 с.

60. Калицун В.И., Дроздов Е.В., Комаров А.С., Чижик К.И. Основы гидравлики и аэродинамики. учебник. 4-е изд. доп. и перераб. М: Стройиздат. 2003. 397 с.

61. Касаткин А.Г. Основные процессы и аппараты химической технологии. учебник для вузов, 10-е изд., стереотипное, доработанное. М: ООО ТИД «Альянс», 2004. 753 с.

62. Кирьянов Д.В. Mathcad 13. СПб. 2006. 592 с.

63. Ковальов О.О., Паляничка Н.О., Лебідь М.Р. Обґрунтування коефіцієнту струминної гомогенізації. *Агроекологічні аспекти виробництва та переробки продукції сільського господарства* : матеріали міжнар. наук.-практ. конф. Мелітополь-Кирилівка: ТДАТУ, 2018. С. 46.

64. Ковальов О.О., Лебідь М.Р. Теоретичні основи диспергування в щілинному гомогенізаторі молока. *Розвиток харчових виробництв,ресторанного та готельного господарств і торгівлі:проблеми, перспективи, ефективність* матеріали міжнар. наук.-практ. конф, присвяченої 80-річчю з дня народження ректора університету. Харків: ХДУХТ. 2018. С. 327–328.

65. Колмогоров А.Н. Избранные труды. Математика и механика. М: Наука. 1985. 470 с.

66. Кочубей О.В. Вдосконалення технології згущених молочних продуктів з використанням вакуумної гомогенізації: автореф. дис. на здобуття ступеню канд. техн. наук: 05.18.04/ Український держ. ун-т харчових технологій. Київ. 2000. 20 с.

67. Кривова А.Ю., Паронян В.Х. Технология производства парфюмерно-косметических продуктов. М: ДеЛи принт. 2009. 668 с.

68. Крусь Г.Н., Чекулаева Л.Г. Гомогенизация молока (технология молочных

продуктов). М: Агропромиздат. 1988. 60 с.

69. Крусь Г.Н., Шалыгина А.М., Волокитина З.В. Методы исследования молока и молочных продуктов. под ред. А.М. Шалыгиной. М: Колос. 2002. 368 с.

70. Курочкин А.А., Ляшенко В.В. Технологическое оборудование для переработки продукции животноводства. Учебник. М: Колос. 2001. 440 с.

71. Лойцянский Л.Г. Механика жидкости и газа. Учебник для вузов. 7-е изд., испр. М: Дрофа. 2003. 840 с.

72. Лопарев В.П. Экспериментальное исследование дробления капель жидкости в условиях нарастания внешних сил. Изв. АН СССР, *Механика жидкости и газа*. 1975. № 3. С.174–178.

73. Луканіна К. Протитечійно–струменева гомогенізація молока. *Харчова і переробна промисловість*. 1998. № 8. С.34.

74. Ламб Г. Гидродинамика. М. 2012. 929 с.

75. Лаптев А.Г., Башаров М.М., Фарахова А.И. Явления турбулентного переноса тонкодисперсных частиц в жидкой фазе динамических сепараторов. политематический электронный научный журнал КГАУ. 2011. № 68. С. 147–177.

76. Леженкін О. М., Самойчук К.О., Ковальов О.О., Паляничка Н.О., Верхоланцева В.О. Визначення шляху змішування та дотичних напружень в струминному гомогенізаторі молока. *Вісник Українського відділення Міжнародної академії аграрної освіти*. 2017. Вип. 5. 129–142 с.

77. Матвиенко О.В., Евтюшкин Е.В. Математическое моделирование турбулентного переноса дисперсной фазы в турбулентном потоке. *Вестник ТГПУ*. 2004. Вып. 6. С. 50–53.

78. Минько А.А. Статистический анализ в MS Excel. М: Вильямс. 2004. 448 с.

79. Мовчан В.Т., Шквар Е.А. Математическое моделирование пограничных слоев. *Прикладна гідромеханіка*. К: ІГМ. 2005. Т. 7. №3 – 4. С. 73–85.

80. Мухин А.А., Кузьмин Ю.Н., Гисин И.Б. Гомогенизаторы для молочной промышленности. М: Пищ. пром-ть. 1976. 66 с.

81. Нарынян А.Р., Поздеев В.А. Основы научных исследований. К: Изд – во Европейского унив – та. 2002. 110 с.

82. Новицкий Б.Г. Применение акустических колебаний в химико–технологических процессах. М: Химия. 1983. 191 с.

83. Нужин Е. В. Интенсификация гомогенизации за счет высокочастотных колебаний. *Вибрации в технике и технологиях*. 2002. № 3/24. С. 62–64.

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

85. Нужин Є.В. Про вплив параметрів потоку на процес гомогенізації. *Наукові праці ОДАХТ*. 1999. вип. 18, С.151–154.

86. Орешина М.Н. Разработка импульсного гомогенизатора на основе исследования дробления жировых шариков молока: автореф. дис. на получение степени канд. техн. наук: 05.18.12/ Орлов. гос. техн. ун-т. Орёл. 2001. 27 с.

87. Орешина М.Н. Совершенствование способов гомогенизации эмульсий. *сб. науч. трудов. Воронежской государственной технологической академии*. 2000. Вып. 10. С. 65–70.

88. Оноприйко А.В., Храмцов А.Г., Оноприйко В.А. Технология молочных продуктов мини-производств. Ростов-на-Дону: Март. 2004. 411 с.

89. Остроумов Л.А., Брагинский В.И., Осинцев А.М., Боровая Е.А. Численное моделирование процесса отстаивания молочного жира. *Хранение и переработка сельхозсырья*. 2000. №12. С. 11–15.

90. Пажи Д.Г., Галустов В.С. Основы техники распыливания жидкости. М: Химия. 1984. 256 с.

91. Пристрій для гомогенізації молока: пат. 11058. Україна, МКИ^5 А 01 J 11/16. № 20041008860 ; заявл. 16.05.2005; опубл. 29.10. 2005. Бюл. №12

92. Пристрій для гомогенізації: пат. 6601, Україна, МКИ^5 А 01 J 11/16. № 20041008342 ; заявл. 14.10.2004; опубл. 16.05. 2005. Бюл. № 5.

93. Петров А.Н., Григоров Ю.Г., Козловская С.Г., Ганина В.И. Геродиетические продукты функционального питания. М: Колос-пресс. 2001. 94 с.

94. Петров А.Н. Теория и практика повышения устойчивости жировой фазы консервов на молочной основе общего и специального назначения: автореф. дис. на получение степени д-ра. техн. наук: 05.18.04/Всерос. науч.-исслед. ин-т мясной

пром-сти им. В.М. Горбатова. Москва. 2010. 50 с.

95. Подвысоцкий А.М., Дубровский В.В. Критические условия разрушения капель газовым потоком. межведомственный научный сборник «Физика аэродисперсных систем». 1998. Вып. 37. С. 32–37.

96. Промтов М.А. Пульсационные аппараты роторного типа. Теория и практика. М: Машиностроение. 2001. 259 с.

97. Просеков А.Ю, Юрьева С.Ю. Технология молочных продуктов детского питания. Кемерово: КемТИПП. 2005. 278 с.

98. Ренсли Дж., Донелли Дж., Рида Н. Пища и пищевые добавки. Роль БАД в профилактике заболеваний. пер. с англ. Т.П. Мосоловой. М: Мир, 2004. 312 с.

99. Рогов И.А., Горбатов А.В., Свинцов В.Я. Дисперсные системы мясных и молочных продуктов. М: Агропромиздат. 1990. 320 с.

100. Самойчук К.О., Ковальов О.О., Івженко О.В. Аналіз методів оцінювання якості молока. *Праці ТДАТУ*. 2012. Вип. 12. Т.4. С. 222–230.

101. Самойчук К.О., Ковальов О.О. Аналіз сил дроблення жирових кульок в струминному гомогенізаторі. *Наукові праці півд. Філіалу НАУ біоресурсів та природокористування* «*Кримський аграрний університет*». 2013. Технічні науки. вип.153. С. 26–34.

102. Самойчук К.О., Ковальов О.О., Борохов І. В., Паляничка Н.О. Аналітичні дослідження енергетичних показників і параметрів якості струминно-щільового гомогенізатора молока. *Праці ТДАТУ*. 2019. Вип.19. Т.1.С. 3–18.

103. Самойчук К.О., Ковальов О.О. Аналітичні параметри процесу струминної гомогенізації молока з роздільною подачею вершків. *Наукові праці ОНАХТ*. 2013. Вип.43. С.77–81.

104. Самойчук К.О., Ковальов О.О. Використання нормалізації у струминному гомогенізаторі молока з роздільною подачею вершків. *Праці ТДАТУ*. 2014. Вип.14. Т.1. С. 37–45.

105. Самойчук К.О., Сєрков П.О., Ковальов О.О. Диспергатори замінників цільного молока. *Праці ТДАТУ*. Вип. 11. Т.2. С. 119–125.

106. Самойчук К.О Економічна ефективність впровадження струминного гомогенізатора молока щілинного типу. *Розвиток харчових виробництв ресторанного та готельного господарств і торгівлі: проблеми, перспективи, ефективність* : тези доповідей міжнар. наук.-практ. конф. Харків: ХДУХТ, 2019. С. 249–251.

107. Самойчук К.О., Ковальов О.О., Паляничка Н.О., Колодій О.С., Лебідь М.Р. Експериментальні дослідження параметрів струминного гомогенізатора молока з роздільною подачею вершків щільового типу. *Праці ТДАТУ*. 2019. Вип.19. Т.2. С 117 – 129.

108. Самойчук К.О., Ковальов О.О. Експериментальні дослідження струминного гомогенізатора з роздільним подаванням жирової фази. ДонНУЕТ. 2011. Вип.28. С.42–47.

109. Самойчук К.О., Ковальов О.О., Левченко Л.В. Енергетичні витрати перспективних конструкцій гомогенізаторів молока. *Наукові здобутки у вирішенні актуальних проблем виробництва та переробки сировини, стандартизації і продовольства* : матеріали міжнар. наук.-практ. конф. вчених, аспірантів і студентів. Київ: ЦП КОМПРИНТ, 2017. С. 315–316.

110. Самойчук К.О., Ковальов О.О. Механізми диспергування жирових кульок в струминному гомогенізаторі молока. *Наукові праці ОНАХТ*. 2016. Т.80. Вип. 1. С. 103–107.

111. Самойчук К.О., Ковальов О.О. Механізм руйнування жирових кульок у струминному гомогенізаторі з роздільним подаванням вершків: ДонНУЕТ. 2013. Вип. 30. С.148–155.

112. Самойчук К.О., Ковалев А.А., Бездитный А.А. Моделирование процесса струйной гомогенизации молока с раздельной подачей сливок. *Вестник МГУП*. 2015. Вип.2 (19). С. 69–76.

113. Самойчук К.О., Ковальов О.О., Лубко Д.В. Моделювання параметрів струминного гомогенізатора молока щілинного типу. *Праці ТДАТУ*. 2018. Вип 18, т. 2. С. 286–294.

114. Самойчук К.О., Ковальов О.О. Обґрунтування гідродинамічних

параметрів процесу струминної гомогенізації молока з роздільною подачею вершків. *Наукові праці ОНАХТ*. 2014. Вип. 46. Т.2 С. 314–319.

115. Самойчук К.О. Обгрунтування параметрів та режимів роботи протитечійно-струменевого гомогенізатора молока: автореф. дис. на здобуття ступеню канд. техн. наук: 05.18.12/ Донецький нац. ун-т економіки і торгівлі ім. М. Туган-Барановського. Донецьк. 2008. 155 с.

116. Самойчук К.О., Ковалев А.А., Палянычка Н.А. Обоснование основных параметров струйного гомогенизатора молока. *Международный научный институт «Educatio»*. 2015. №9. Ч. 1. С. 114–118.

117. Самойчук К.О., Ковальов О.О., Колодій О.С., Сєрий І.О. Оптимізація експериментальних параметрів та визначення експериментального значення критерію Вебера струминно-щілинного гомогенізатора молока. *Праці ТДАТУ*. 2019. Вип.19. Т.3. С 78–85.

118. Самойчук К.О., Ковальов О.О. Перспективи струминного гомогенізатора молока. Проблеми якості,стандартизації,сертифікації та метрологічного забезпечення: тези доповідей конференції. Херсон: ХДАУ, 2013. С.71–72.

119. Самойчук К.О., Ковальов О.О., Левченко Л.В. Перспективні способи диспергування жирової фази : тези доповідей міжнар. наук.-практ. конф., присвяченої 50-річчю заснування Харківського державного університету харчування та торгівлі. Харків: ХДУХТ, Ч. 1. С. 280–281.

120. Самойчук К.О., Ковалев А.А. Перспективы использования струйно-щелевого диспергатора для создания тонкодисперсных эмульсий в сельском хозяйстве. *Техническое и кадровое обеспечение инновационных технологий в сельском хозяйстве* : материали междунар. науч.-практ. конф. Минск: БГАТУ, 2019 Ч2. С 188-190

121. Самойчук К.О., Ковальов О.О. Підвищення ефективності струминного гомогенізатору молока з роздільною подачею вершків. *Інноваційні енерготехнології* : Зб. праць 5-ї наук.-практ. конф. Одеса: ОНАХТ, 2015. С 246–252.

122. Самойчук К. О. Розвиток наукових основ гідродинамічного диспергування молочних емульсій : автореф. дис. на здобуття ступеню д-ра техн.

наук: 05.18.12/ Харківський держ. ун-т харч. та торгівлі. Харків. 2018 . 44 с.

123. Самойчук К.О., Ковальов О.О. Розробка лабораторного зразка струминного гомогенізатору з роздільною подачею вершків. *Праці ТДАТУ*. 2011. 77–84 с.

124. Самойчук К. О., Ковалев А. А. Струйно-щелевой гомогенізатор для переработки молока. П*ереработка и управление качеством сельскохозяйственной продукции* : Сб. статей 4-й междунар. науч.-практ. конф. Минск: БГАТУ, 2019. С. 118–120.

125. Самойчук К. О., Сєрий І. С., Ковальов О. О. Розробка промислового зразку та оцінка економічної ефективності впровадження струминно-щілинного гомогенізатора молока. Праці ТДАТУ. 2020. Вип.20. Т.1. С 15–25.

126. Самойчук К.О., Ковальов О.О. Струминно-щілинний гомогенізатор молока з роздільною подачею вершків. *Інноваційні аспекти розвитку обладнання харчової і готельної індустрії в умовах сучасності* матеріали 3-ї міжнар. наук.-практ. конф. Харків: ХДУХТ, 2019. 77-78 с.

127. Самойчук К.О., Ковальов О.О. Струминний гомогенізатор – нормалізатор молока. *Інноваційні аспекти розвитку обладнання харчової і готельної індустрії в умовах сучасності* : тези доповідей міжнар. конф. Харків: ХДУХТ, 2015. С. 93–94.

128. Самойчук К.О., Ковальов О.О. Теоретичні основи диспергування в струминному гомогенізаторі молока : тези доповідей міжнар. наук.-практ. конф., присвяченої 75-річчю з дня народження ректора університету (1988-1991рр.), д.т.н., проф., член-кореспондента ВАСГНІЛ Бєляєва М.І. Харків: ХДУХТ, 2013. Ч.І. С. 382–383.

129. Самойчук К.О., Ковальов О.О., Султанова В.О. Якість та енергетична ефективність процесу струминної гомогенізації молока з роздільною подачею вершків. *Праці ТДАТУ*. 2015. Вип.15. Т.1. С. 241–249.

130. Соколов В.Н., Яблокова М.А. Аппаратура микробиологической промышленности. Ленинград. *Машиностроение*. 1988. 278 с.

131. Спосіб гомогенізації молока: пат. 7777, Україна, МКИ^5 А 01 J 11/16. № 20041008860; заявл. 29.10.2004; опубл. 15.07. 2005. Бюл. № 7.

132. Струминний гомогенізатор молока з роздільною подачею вершків: пат. 94041, Україна, МКИ[5] A01J 11/00. № u201405239; заявл. 19.05.2014; опубл. 27.10.2014. Бюл. № 20.

133. Спосіб гомогенізації та нормалізації молока: пат. 94048, Україна, МКИ[5] A01J 11/00. № u201405343 ; заявл. 19.05.2014; опубл. 27.10.2014. Бюл. № 20.

134. Струминний гомогенізатор молока з зустрічною подачею вершків: пат. 131217, Україна, МПК A01J 11/16. № u201807061 ; заявл. 23.06.2018; опубл. 10.01.2019. Бюл. № 1.

135. Струминний гомогенізатор молока з роздільною подачею вершків: пат. 106522, Україна, МКИ5 A01J 11/16. № u201511244; заявл. 16.11.15; опубл. 25.04.2016. Бюл. № 8.

136. Струминний гомогенізатор молока з роздільною подачею вершків: пат. 131218, Україна, МПК A01J 11/16. № u201807062; заявл. 23.06.2018; опубл. 10.01.2019. Бюл. № 1.

137. Струминний гомогенізатор молока з роздільною подачею вершків: пат. 122548, Україна, МКИ5 A01J 11/16. № u 122548 (13); опубл 10.01.2018 Бюл №1.

138. Старичков А.И. Структурообразование дисперсных систем. *Пищевая промышленность*. 2000. №11. С. 38–40.

139. Степанова Л.И. Справочник технолога молочного производства. Т.1. Цельномолочные продукты. СПб: ГИОРД. 2000. 384 с.

140. Сурков В.Д., Липатов Н.Н., Золотин Ю.П. Технологическое оборудование предприятий молочной промышленности. М: Лёгкая и пищевая промышленность. 1983. 432 с.

141. Твердохлеб Г.В., Сажинов Г.Ю., Раманаускас Р.И. Технология молока и молочных продуктов. М: ДеЛи принт. 2006. 616 с.

142. Тихонова Е.М. Качественное единство–великолепный продукт! (Гомогенизация в производстве молочных продуктов). *Молочная промышленность*. 2003. № 9. С. 58–59.

143. Ткаченко А.Н. Кавитационные техника и технологи. Киев: Техника. 2001. 462 с.

144. Урьев Н.Б. Высококонцентрированные дисперсные системы М.: Химия, 1980. 320 с.

145. Фиалкова Е.А. Гидро– и термодинамика вихревой гомогенизирующей головки. Сборник научн. трудов *Актуальные проблемы техники и технологии переработки молока*. 2006. Барнаул. №3. С. 208–212.

146. Фиалкова Е.А. Гомогенизация. Новый взгляд: монография–справочник Спб: ГИОРД. 2006. 392с.

147. Фриш У. Турбулентность. Наследие А.Н. Колмогорова: пер. с англ. А.Н. Соболевского/ под ред. М.Л. Бланка. 1998. М: Фазис. 346 с.

148. Фролов С.В. Арсентьева Т.П., Куцакова В.Е. Механизм гомогенизации применительно к молочно–растительным смесям. *Хранение и переработка сельхозсырья*. 2001. №8. С. 11–14.

149. Фурсова Т.П., Зобкова З.С., Зимин А.Ф. Определение рациональных режимов гомогенизации при производстве кисломолочных напитков со стабилизирующими добавками. *Хранение и переработка сельхозсырья*. 2001. №10. С. 24–26.

150. Харитонов В.Д., Фёдоров А.Д., Монахов Г.В., Михалкина Г.С. Новое слово в технологии переработки молока. *Молочная промышленность*. 2002. № 3–4. С. 178–179.

151. Харша, Ли. Связь между турбулентным напряжением трения и кинетической энергии турбулентного движения. *Ракетная техника и космонавтика*. 1970. Т.8. №8. С. 179–181.

152. Хоролжав Р., Тамара М., Нямаа Д., Есиков С.А. Кавитационное воздействие на физико–химические свойства молока. *Гидропривод машин различного технологического назначения.* 1997. Красноярск. С. 66–68.

153. Чекулаева Л.В., Чекулаев Н.М. Сгущённые молочные консерви. 1982. М: Лёгкая и пищ. пром–сть. 264 с.

154. Чекулаева Л.В., Полянский К.К., Голубева Л.В. Технология продуктов консервирования молока и молочного сырья. учеб. пособие для вузов. 2002. М: ДеЛи принт. 249 с.

155. Шалыгина А.М., Калинина Л. В. Общая технология молока и молочных продуктов. 2006. М: Колос. 199 с.

156. Шестаков С.Д. Методика оптимизации процесса кавитационной дезинтеграции для обработки жидких пищевых сред. *Хранение и переработка сельхозсырья*. 2001. №10. С. 31–35.

157. Шкарупа В.Ф. Товарознавство продовольчих товарів. Продукти тваринного походження. К: Київський національний торговельно–економічний університет. 2004. 288с.

158. Шквар.Є.О. Математичне моделювання засобів керування примежовими шарами. *Застосування обчислювальної техніки, математичного моделювання та математичних методів у наукових дослідженнях* : тези доповідей всеукр. наук. конф. Львів: ЛДУ. 1996. С. 98.

159. Шлихтинг Г. Теория пограничного слоя. 1974. М: Наука. 712 с.

160. Шмойлова Р.А., Минашкин В.Г., Садовникова Н.А., Шувалова Е.Б. Теория статистики 4–е изд/ под ред. Р.А. Шмойлова. 2004. М: Финансы и статистика. 655с.

161. Штербачек З., Тауск П. Перемешивание в химической промышленности. 1963. Ленинград: Государственное научно-техническое изд-во химической литературы. 417 с.

162. Шурчкова Ю. А. Разработка нового способа диспергирования в жидкой среде и создание на его основе технологических процессов и оборудования для пищевой промышленности: автореф. дис. на получение ступени д-ра техн. наук: 05.18.12/ К: НАН Украины, Институт технической теплофизики.1994. 51 с.

163. Ядута А.З. Интенсификация процесса получения комбинированных продуктов в роторно-пульсационном аппарате : дис. на получение ступени канд. техн. наук: 05.18.12/ Кемер. технол. ин-т пищевой пром. Кемерово. 2009. 173с.

164. Якубчак О.М. Фізичні та біохімічні властивості молока. *Молочное дело*. 2005. №12. С. 36–37.

165. Ansari M.A., Kim K.Y., Kim S.M. Numerical study of the effect on mixing of the position of fluidstream interfaces in a rectangular microchannel. *Microsystem*

Technologies 16. 2010. P. 1757–1763.

166. Bailly C., Comte-Bellot G. Turbulence. *Springer*, 2015. 360p.

167. Bothe D., Stemich C., Warnecke H.J. Computation of scales and quality of mixing in a T-shapedmicroreactor. *Computers & Chemical Engineering* 32, 2008. 108–114p.

168. Bothe D., Stemich C., Warnecke H.J.,. Fluid mixing in a T-shaped micro-mixer. *Chemical Engineering Science* 61, 2006. 2950–2958p.

169. Bylund G. Homogenizers. In: Dairy Processing Handbook. Chapter 6.3. Teknotext AB (Ed.) Tetra Pak Processing Systems ABS-221 86 Lund, Sweden. 2003. 115-122p.

170. Cortes-Quiroza C.A., A. Azarbadeganb M. Effect of channel aspect ratio of 3-D T-mixer on flow patterns and convective mixing for a wide range of Reynolds number Zangenehb a Department of Biochemical Engineering, University College London, 1996 AIChE Journal 42(11), 3181–3190p.

171. Chung C.K., Shih T.R. Effect of geometry on fluid mixing of the rhombic micromixers, *Microfluid Nanofluid* 4. 2008, 419–425p.

172. Fani A., Camarri S., Salvetti M. Investigation of the steady engulfment regime in a three-dimensional T-mixer. In: Physics of Fluids 25 (6), 2013, P 319–326.

173. Galletti C., Roudgar M., Brunazzi E., Mauri R. Effect of inlet conditions on the engulfment patternin a T-shaped micro-mixer. Chemical Engineering Journal 185–186. 2012. P. 300–313.

174. Glasgow I., Aubry N. Enhancement of microfluidic mixing using time pulsing. Lab on a Chip 3, 2003, 114–120.

175. Glawdel T., Elbuken C., Ren C. Droplet formation in microfluidic T-junction generators operating in the transitional regime, I. Experimental observations. Phys. Rev. E 2012, 85 p.

176. Goullet A., Glasgow I., Aubry N. Effects of microchannel geometry on pulsed flow mixing. Mech. Res. Comm. 2006, 33, 739–746.

177. High pressure and high temperature processing in milk technologies. *Food Ingredients and Analysis International* . UK. 2000. P. 35–41.

178. Hussong J., Lindken R., Pourquie M., Westerweel J.. Numerical study on the flow physics of a Tshaped micro mixer, in: Ellero, M., et al. (Eds.), IUTAM Symposium on Advances in Micro- and Nanofluidics. *Springer*, Heidelberg. 2009, P. 191–205.

179. Jeong J, Hussain F (1995) On the identification of a vortex. *J Fluid Mech* 285:69–94.

180. Innings F. Visualization of the Drop Deformation and Break-Up Process in a High Pressure Homogenizer. *Chemical Engineering & Technology*. Vol. 28, Issue 8, 2005. P. 882–891.

181. Kang D.J., Song C.H., Song, D.J. Junction contraction for a T-shaped microchannel to enhance mixing. *Mech. Res. Comm*. 2012, 33. P. 739–746.

182. Kessler A. HG Food and bioprocess engineering: dairy technology. Germany.Verlag. 2002. V.5. P. 694.

183. Kovalyov A., Samoichuk K., Palyanychka N., Verkholantseva V., Yanakov V. Experimental investigations of the parameters of the jet milk homogenizer with separate cream supply. *Technology audit and production reserves*. 2017. № 3/3 (35). pp 33–39.

184. Kiurchev S., Samoichuk K., Kovalyov O., Leshchij R. Method of calculation of an industrial model of jet-slot milk homogenizer. TEKA. QUARTERLY JOURNAL OF AGRI-FOOD INDUSTRY – 2020, Vol. 19, No. 4, 23-30pp.

185. Kruif C.G. Supra–aggregates of Casein Micelles as a Prelude to Coagulation. *NIZO Food Research*, Kernhemseweg 2, 6718 ZB Ede, The Neizerlands, 1998.

186. Lee C. Y., Wang W.T., Liu C.C, Fu L.M. Passive mixers in microfluidic systems: A review. *Chemical Engineering Journal*, 288, 2016. pp. 146–160.

187. Lindken R, Westerweel J, Wieneke B Stereoscopic micro particle imagevelocimetry. Exp Fluids 41. 2006 P. 161–171

188. Liao Y.X., Lucas D. A literature review of theoretical models for drop and bubble breakup in turbulent dispersions. Chem. Eng. Sci. 2009, 64, 3389–3406.

189. Liu H., Zhang Y. Droplet formation in a T-shaped microfluidic junction. J. Appl. Phys. 2009, 106 p.

190. Lockwood F.C., Salooja A.P., Syed S.A. Thermal-Fluid Dynamics Theory of Two-Phase Flow. Paris: Eyrolles, 1980p.

191. Manhart M., Peukert J., Schwarzer H. Numerical and experimental investigation of the turbulent flow and mixing in a static T-mixer. Eur fl eng summermeeting, ASME, FEDSM. 2006. Miami, Florida 98246.

192. Moaveni S. Finite Element Analysis Theory and Application with ANSYS Pearson, 2008. 868p.

193. Oever J., Spannenburg N., Offerhaus H., Herek J., Mugele F. Acoustic micromixer fabricated by in-chip direct laser writing of microstructures. *Journal of Micro/nanolithography*, MEMS and MOEMS. 2015. 14, P. 1–7.

194. Paquin P. Technological properties of high pressure homogenizers: the effect of fat globules, milk proteins, and polysaccharides. *International Dairy Journal*, Volume 9, Issues 3-6, 1999. P. 161-418

195. Reuter H. Relations between fat globule size distribution. H. Reuter, H. Randhahn. Brief communications 20th International Dairy Congress, Paris, 1978, p. 281–282.

196. Roudgar M., Brunazzi E., Galletti C., Mauri R. 2012. Numerical study of split T-micromixers, *Chemical Engineering & Technology* 35, 1291–1299.

197. Sagaut P., Cambon C. Homogeneous Turbulence Dynamics. Cambridge University Press, 2008. XVI. 463 p.

198. Samoichuk K., Kovalyov A., Oleksiienko V., Palianychka N., Dmytrevskyi D., Chervonyi V., Horielkov D., Zolotukhina I., Slashcheva A. Determination of fat milk dispersion quality in the jet-slot type milk homogenizer. Eastern-European Journal of Enterprise Technologies. 2020. № 5/11 (107). pp 16–24.

199. Soustelle M. Handbook of Heterogenous Kinetics. Hoboken,London: ISTE Ltd and John Wiley & Sons, Inc, 2010. 941 p.

200. Stankiewicz A., Moulijn I.A. Process intensification. Jnd. Eng. Chem. Res. 2002. V.41. P. 1920–1924.

201. Stroock, A.D., Dertinger, S.K., Whitesides G.M., Ajdari, A. Patterning flows using grooved surfaces. Anal. Chem 74. 2002, P. 5306–5312.

202. Tartar L. The General Theory of Homogenization. Lecture Notes, *Springer*, Verlag Berlin Heidelberg, 2009, 470 p.

203. Vankova N., Tcholakova S., Denkov S., Ivanov I., Vulchev V. Emulsification in turbulent flow, Mean and maximum drop diameters in inertial and viscous regimes. *Colloid Interface Sci*. 2007, P. 363–380.

204. Walstra P., Geurts T.J., Noomen A., Jellema A., Van Boekel M.A.J.S. Dairy technology: Principles of Milk Properties and Processes. Part II: Processes. New Уогк: Marcel Dekker, Inc., 1999. 246 p.

205. Walstra P, Wouters J T M., Geurts T J. Homogenization. In: Dairy Science and Technology. Second Edn. Taylor & Francis Group, LLC. Boca Raton London New York. 2006. 279 p.

206. Ward K., Fan Z. H. Mixing in microfluidic devices and enhancement methods. *Journal of Micromechanics and Microengineering* 25, 2015, P. 239–245.

207. Wong S, Ward M, Wharton C. (2004) Micro T-mixer as a rapid mixing micromixer. Sens Actuators, B, Chem 100. P. 359–379.

208. Yu S., Jeon T.J., Kim S. M. Active micromixer using electrokinetic effects in the micro/nanochannel junction. Chemical Engineering Journal 197. 2012, P. 289–294.

ДОДАТКИ

Додаток А

Гомогенізація та стабільність молочної емульсії

Гомогенізація дозволяє зменшити відстоювання вершків та скоротити втрати цінного з точки зору харчової та енергетичної цінності молочного жиру зі споживчою тарою, при транспортуванні та зберіганні. Гомогенізований продукт не розшаровується при тривалому зберіганні, є більш придатним до транспортування. Гомогенізація підвищує в'язкість молока,та як наслідок покращує смакові якості гомогенізованої емульсії. Гомогенізація проводиться:

– при виробництві молока та вершків та сприяє придбанню однорідності (смаку, кольору, жирності) емульсії [88, 93, 154];

– при обробітку нафти перед її ретифікацієй на НПЗ внаслідок чого вихід світлих нафтопродуктів збільшується на 5 – 10% [61, 168];

– в фармацевтиці для отримання лікарських форм, оскільки лікарська речовина в формі емульсії швидше всмоктується до організму при будь – якому способі введення, пом´ягшує подразнюючу дію на слизові оболонки, прискорює протікання фізико–хімічних процесів в шлунково – кишковому тракті [130, 201];

– при виробництві кисломолочних продуктів (сметани, кефіру, йогурту) для підвищення міцності та покращення консистенції білкових згустків та запобігання утворення жирової пробки на поверхні продукту [154, 155, 201];

– в парфумерній промисловості для отримання тонкодисперсних структур, забезпечення їх стійкості при зберіганні [61, 67,];

– при виробництві клеїв для підвищення якості склеювання та зменшення його витрат при застосуванні [61, 206].

Під терміном «гомогенізація» в молочній промисловості можна розуміти декілька явищ. При її проведенні ОЖК розриваються, кульки втрачають стійкість та поділяються. Гомогенізацію молока можна представити як зменшення середнього розміру жирових кульок до стану коли масова доля жиру приблизно врівноважується речовиною ОЖК. При цьому жирова кулька знаходиться в стабільному колоїдному стані, а її розміри складають близько 1 мкм [98, 139,194].

– емульсію з середнім розміром часток можна створювати на роторно–пульсаційних апаратах, обробка емульсії в якіх в багатьох випадках створює продукт з достатнім СЖК, особливо при додаванні до продукту емульгатору. Однак, якщо цього не достатньо, тоді для створення тонкої, нероздільної емульсії необхідно використовувати плунжерний гомогенізатор [88, 98, 153].

– гомогенізація продуктів пастоподібної консистенції використовується для створення однорідної за всією поверхнею та глибиною маси та здійснюється за допомогою спеціальних місильних машин, або гомогенізаторів типу М6–ОГА, які використовуються при виготовленні вершкового масла [13, 70, 80].

– гомогенні водні системи (емульсії) в першу чергу характеризуються однорідністю структури та відсутністю поверхні розділу, як показника ступеню молекулярної взаємодії між поверхнею речовин та водою [155, 194].

Стабільність молока як натуральної емульсії жиру в молочній плазмі обумовлена наявністю адсорбційних ОЖК і значною мірою залежить від їх структурно-механічних властивостей. В ряді досліджень встановлено, що на поверхні жирових кульок адсорбовані білки, фосфатиди, мідь, залізо, різні ферменти. Білки складають близько 60% складу оболонок, фосфатиди близько 35%. Окремі компоненти оболонки пов’язані з нею неоднаково міцно-одні з них віддаляються при промиванні, перемішуванні молока або зміні температури. Наприклад, білок евглобулін, адсорбований на оболонках при температурі 44ºС, але при нагріванні до 48,8ºС або при перемішуванні він переходить в молочну плазму, інші компоненти зберігаються у складі оболонки навіть при тривалій дії на молоко різних факторів [21, 27, 59]. Лужна фосфатаза концентрується на ОЖК, кисла пов'язана з білками.

У розбавлених емульсіях типу «олія у воді», які характеризуються незначною концентрацією жиру (менше 0,1%) і високою дисперсністю, коалесценція крапель є мало вірогідною. Стійкість концентрованих емульсій створюється наявністю адсорбційних шарів емульгатора на поверхні розподілу фаз. Для отримання стійкої емульсії необхідне створення умов, перешкоджаючих злиттю окремих крапель в утворення більш великого розміру [13, 51, 144].

Початок дестабілізації можна виявити по зменшенню дисперсності жиру, тобто по зменшенню поверхні розділу «молочний жир–плазма». Ступінь дестабілізації молочного жира залежить від структурно-механічних властивостей оболонок жирових кульок, концентрації солей в молочній плазмі, кількості жира в загальному об’ємі продукта. Часткова дестабілізація молочного жира відбувається при сепарації і згущенні, при цьому частина жирових кульок коалесціює, відбувається збільшення їх середнього розміру [59, 139, 144].

Максимальна стабільність вершків спостерігається при pH 6,0–7,0. Ступінь дестабілізації молочного жира посилюється як при підвищенні, так і при пониженні pH. Стабільність молочного жира максимальна поблизу ізоелектричної точки оболонкового білка, отже при найбільш стійкій структурі поверхневого шару. При порушенні сольової рівноваги молока також посилюється дестабілізація молочного жиру. Будь-яке порушення рівноважної структури молочного жиру, незалежно від її причин, погіршує якість кінцевого продукта [13, 70, 139].

Порушення цілісності ОЖК в результаті гомогенізації молочної сировини призводить до виділення рідкого жиру на поверхню оболонки. Підвищення кількості вільного жира призводить до дестабілізації молочно–жирової емульсії. При підвищенні тиску кількість вільного жира зменшується, що свідчить про міцність знову утворених ОЖК [26, 51, 93]. Стабільність ДФ молочних сумішей після гомогенізації значно підвищується, а білкової–знижується, особливо при високій концентрації молочного жиру в продукті та підвищеному тиску диспергування [9, 25, 112].

Додаток Б

Технологія роздільної гомогенізації та замінники молочного жиру

Головний метод зниження енергоємності процесу гомогенізації засновано на попередньому виділенні низькожирних (12%) вершків проведенням сепарації, гомогенізації їх на при температурі 70ºС та тиску 10–15 МПа та нормалізації вершків знежиреним молоком (роздільна гомогенізація). Гомогенізовані вершки змішуються в потоці зі знежиреним молоком, що надходить з сепаратора – вершковідділювача, та подаються до секції пастеризації пастеризаційно-охолоджувального устаткування. Вершки можна гомогенізувати також перед їх змішуванням зі знежиреним молоком при отриманні нормалізованої емульсії. Нормалізація виконується за жиром, білком та іншими компонентами, з огляду на це вона може проводитись до та після теплової обробки [69, 139, 155, 194]. В безперервному методі нормалізація відбувається одночасно з очищенням від механічних домішок за оптимально рекомендованої температури 40–45°С [69, 70, 155].

На підприємствах невеликої потужності нормалізація проводиться змішуванням в резервуарах. До певної кількості незбираного молока при ретельному перемішуванні додають необхідну кількість знежиреного молока або вершків, розрахованих з рівняння матеріального балансу. Для запобігання утворенню жирової пробки, молоко гомогенізують за температури 62–63°С та тиску 12,5–15 МПа [13, 28, 80].

Внаслідок механічного впливу на сировину відбувається пошкодження ОЖК, що веде до зміни дисперсності молочного жира, коли жирові кульки починають утворювати скупчення. Ферменти оболонок десорбують до плазми, що призводить до підвищення їх активності та прискорення псування молока. Для запобігання бактеріального забруднення та псування молочної сировини до переробки, необхідно не тільки дотримуватись санітарних та ветеринарних правил його отримання, але й забезпечити стійкість молока при зберіганні та транспортуванні.

Молоко до переробки очищують, проводять теплову та механічну обробку, зберігають [25, 26, 88].

При первинній обробці молока застосовують обладнання для транспортування молока, очищення, охолодження та зберігання до відправлення на переробку або реалізацію. При охолодженні до 6–7ºС з´єднання тригліцерідів кристалізуються, зменшуючись в об’ємі. Охолодження молока нижче 0ºС призводить до руйнування ОЖК та втраті ними стабільності, тому температура охолодження молока повинна бути не нижче 6ºС [139, 154].

Свіже молоко володіє бактерицидними властивостями. Для їх збереження після доїння молоко охолоджують до температури, значення якої не перевищує 10ºС. Тривалість витримки охолодженого молока до відправлення на переробні підприємства не повинна перевищувати 20 год за умови підтримання вказаної температури. В процесі тривалого зберігання охолодженого молока на фермах та заводах при 3–5ºС на протязі декількох діб відбувається зміна майже всіх структурних компонентів складу молока. До більш значної зміни схильні білки та жири, менше змінюються солі та вітаміни. Внаслідок порушення білкової та жирової структури погіршуються органолептичні, фізико–хімічні та технологічні властивості молока. В процесі переходу жиру з рідкого стану до твердого підвищується в’язкість та густина молока. Зміна білкової системи молока проявляється в послабленні гідрофобних зв´язків та підвищенні дисперсності казеїну, внаслідок чого спостерігається зміна технологічних властивостей молока [26, 27, 182].

При охолодженні, зберіганні та переробці молока відбувається перерозподіл мінеральних речовин, зниження кількості водорозчинних вітамінів та підвищення активності деяких ферментів. Частина фосфатази набуває властивостей розчинника та переходить до плазми молока. В процесі зберігання охолодженого молока змінюється агрегатний стан триацетілгліцеринів молочного жиру. Внаслідок цього порушується структура ОЖК, які втрачають міцність та стають більш схильними до проникності рідкого жиру, внаслідок чого настає дестабілізація ДФ з утворенням

вільного жиру. При перемішуванні молока збільшується ступінь дестабілізації, відбувається гідроліз вільного жиру під дією ліполітичних ферментів [28, 52, 139].

Для збереження термостійкості молока відібране за якістю молоко очищують, після чого швидко охолоджують до 4±2°С. Очищення молока доцільно проводити без підігріву, при температурі його надходження на первинну обробку [13, 59].

Сильне руйнування ОЖК та підвищення активності ліпази обумовлено інтенсивним механічним впливом на молоко при транспортуванні, а також багаторазовому перемішуванні та перекачуванні в процесі тривалого зберігання, за низьких температур. При цьому відбувається частковий перехід фосфоліпідів з ОЖК до плазми. Швидкість цього процесу залежить від температури охолодження, тривалості зберігання, ступеню механічного впливу на молоко [84, 98].

Одним з параметрів, що впливають на ефективність очищення є температура молока. В холодному молоці внаслідок підвищення його в’язкості зменшується швидкість часток, що погіршує очищення. Температура підігріва молока знаходиться в межах 30–45ºС. За вказаної температури осадження механічних забруднень більш ефективне, внаслідок збільшення швидкості руху часток. Можливе очищення молока без підігріва, що є ефективним за кислотності молока не вище 18°Т, та чітко визначеного вмісту мікрофлори в 1 мл молока [13, 26, 182].

Очищення молока бажано проводити при температурі 35–45ºС з метою зменшення в’язкості рідинної системи, що сприяє підвищенню ефективності процесу за якої тригліцериди молочного жиру знаходяться в рідкому стані, внаслідок чого не відбувається підсбиття жирової фази та знижуються її втрати. Таку температуру має свіже отримане молоко, тому відцентрове очищення треба проводити протягом 2 год після доїння. Крім того, в цей період молоко зберігає бактерицидними властивостями, тому очищення не знижує стійкості молока, тоді як очищення в більш пізній період призводить до погіршення стійкості при зберіганні. За більш високих температур відбувається руйнування жирових кульок внаслідок дестабілізації білково-лецитинових оболонок. При цьому ефективність знежирення знижується, оскільки дрібні частки жирових кульок залишаються в знежиреному молоці. При відцентровому очищенні та сепарації суттєвих змін в складових

частинах білків та ліпідів нема, загальні втрати білків, жиру та зміна жирових кульок незначні [148, 155, 194].

Якщо після очищення молоко переробляють не одразу, його необхідно терміново охолодити до 2–4°С на пластинчастому охолоджувачі та направити на резервування. Тривалість резервування не повинна перевищувати 48 год, оскільки навіть при 2–4°С в молоці можуть з’явитись психрофільні бактерії. Ферменти, які виділяються можуть викликати ліполіз молочного жира та частковий гідроліз білка. Зміна послідовності прийомів обробки сирого молока, коли охолодженню до 6–8°С передує пастеризація не викликає погіршення якості молока при зберіганні [13, 139].

Насоси призначені для перекачування молочної сировини при її прийомці, для подачі та відкачування з обладнання, а також для межопераційного транспортування продукту. При перекачуванні та перемішуванні емульсії в ній паралельно протікають процеси зменшення кількості дрібних жирових кульок та часткове диспергування жирових кульок, які мають великі значення СЖК. На зміну нативних властивостей молока впливають турбулентні течії з можливим підсосом повітря. Для максимального виключення цих явищ трубопроводи для передачі молока роблять якомога коротше, уникають встановлення в них клапанів та поворотних ділянок, монтують труби малого діаметра при використані насосів з високими показниками продуктивності [9, 39, 140].

Ефективність сепарації залежить від вмісту жира в молоці, розмірів і дисперсності жирових кульок. Чим крупніше частки, тим швидше вони відділяються. Механічний і тепловий вплив на молоко призводить до перерозподілу в ньому жирових кульок. Частина кульок агрегується, інші, утворюючи скупчення, поділяються на множину дрібних. Тому необхідно зберегти вихідні розміри жирових кульок та уникати зайвих механічних впливів на молоко. Порушення стабільності відбувається при відцентровому очищенні та сепаруванні. Найменші втрати жира зі знежиреним молоком спостерігаються при сепарації парного молока, яке не підлягало механічній чи тепловій обробці [139, 154, 182].

Сепарація при високій температурі спрощує технологічну схему переробки молока. Отримані вершки та знежирене молоко можна використовувати для

подальшої переробки без пастеризації. Однак за високотемпературної сепарації збільшується руйнування жирових кульок, утворюється велика кількість молочного слизу, різко підвищується піноутворення в молоці, вершках та знежиреному молоці. Піна в молоці, знежиреному молоці та вершках негативно відображається на їх подальшій тепловій обробці. Різниця температур прогріву піни та продукту може складати до 10–15ºС і призвести до того, що в спіненому продукті зберігається більше мікроорганізмів та патогенних форм [18, 115, 182].

При проведенні сепарації без нагріву жирова фаза емульсії підлягає меншому впливу та вершки є більш стабільними, але дана технологія призводить до зниження ефективності знежирення, що обумовлюється підвищеною в'язкістю та зменшенням швидкості спливання жирових кульок [3, 70, 140].

Особливої уваги при виробництві вершково-рослинних сумішей повинно приділятись процесу отримання стабільної гомогенної емульсії молочно-рослинних вершків, оскільки саме на цьому етапі виробництва закладається стабільність показників якості як свіжих продуктів, так і виробів, які підлягають зберіганню. З метою збереження стабільності жирової емульсії не слід подавати на сепарацію вершки з масовою часткою жира більш 35–40%. Оптимальна температура їх сепарації складає 65–70°С. Її підвищення призводить до витоплювання жиру та дестабілізації жирової складової емульсії [59, 138, 194].

Завдяки використанню в рецептурах рослинних жирів і білків білково-ліпідна композиція геропродукту набуває підвищеної харчової та енергетичної цінності. Молочно-рослинна ліпідна складова емульсій відрізняється підвищеною збалансованістю, порівняно з молочним жиром за рахунок вмісту в ній поліненасичених кислот, токоферолів, фосфатидів та інших біологічно активних речовин, що входять до складу рослинних олій [14, 54, 93]. Рослинні жири використовують в технології молочної продукції частіше у вигляді замінників молочного жиру, які отримують шляхом спеціальної обробки (рафінація, гідрогенізація, переетирифікація) [93, 98, 99].

Отримання стійкої молочно-рослинної суміші ускладнює недостатня стабільність молочних вершків. Використання для виробництва емульсій

високожирних молочних вершків з масовою часткою жиру, максимально наближеною до значення цього показника в готовому продукті, значно полегшує процес отримання стійкої емульсії та спрощує процес нормалізації високожирної суміші за вологою. Температура компонентів (високожирні вершки, розплавлений рослинний жир) при складанні високожирної молочно-рослинної суміші повинна складати 65±5°С. Даний температурний режим забезпечує мінімальні різниці густини та в'язкості компонентів, що змішуються, що забезпечує високі показники стабільності емульсії. Швидкість подачі рослинного жиру до високожирні вершків або високожирних вершків в рослинну ДФ повинна бути не більш 1500 кг/год. Молочно-рослинну суміш емульгують до візуального отримання стійкої емульсії, при цьому зайвий механічний вплив може призвести до дестабілізації молочної емульсії [148, 157, 194].

Зазвичай на 3 частини жиру коров'ячого молока (за вагою) додають 1 частину рослинного масла. При цьому враховують, щоб вміст лінолевої кислоти склав 15% добутку жирних кислот. Деякі джерела вказують на раціональне співвідношення рослинних та тваринних жирів як 30:70, а жирних кислот наступне (%): насичених-30, моно насичених-60, поліненасичених-10. Молочно-рослинна суміш обробляється на двоступінчастому гомогенізаторі при тиску 10 МПа на першому ступені, 4 МПа на другому, тепловій обробці при 90°С з витримкою 10хв, охолодження до 6°С та зберігання до використання [164, 182, 194].

Підвищення харчової та біологічної цінності продукту може відбуватись за рахунок збалансування жирно кислотного складу продукту. Температура плавлення рослинного жиру в середньому складає близько 36°С. Температура при складанні високо жирної рослинної суміші повинна складати близько 65±5°С. Вказаний температурний режим забезпечує мінімальну різницю густин компонентів, що позитивно впливає на стабільність емульсії [59, 70, 98, 177].

Теплова обробка, зокрема нагрів молока до 65ºС руйнує до 95% бактерицидних речовин, а при збільшенні температури до 80ºС -100%. Охолодження молока після доїння збільшує захисну дію бактерицидних речовин, уповільнює розмноження молочнокислих бактерій та ріст кислотності молока. Теплова обробка

впливає на зміну білків вітамінів, відбувається інактивація майже всіх ферментів, змінюються фізико-хімічні, технологічні властивості молока. При тепловій обробці порушені ОЖК відновлюються за рахунок абсорбції казеїну та сироваткових білків. Кількість білків в оболонках жирових кульок при гомогенізації збільшується до 2–5 разів. При обробці руйнується більша частина ферментів. Найбільш чуттєвими до нагрівання є такі ферменти як амілаза, каталаза, нативна ліпаза, лужна фосфатаза [6, 26, 29].

Вже за невеликого нагріву жир всередині захисних оболонок ДФ починає плавитись, а за температури вище 61°С помітні зміни відбуваються з білковою частиною оболонок. Найбільшого впливу зазнають сироваткові білки молока, спочатку відбувається їх денатурація, після чого білкові сполуки утворюють діасульфідні зв’язки. Внаслідок теплової денатурації молоко придбає специфічний смак кип’яченого молока або присмак пастеризації. Внаслідок агрегації денатурованих білків зі зменшенням ступеню дисперсності може відбутися їх коагуляція. Ступінь денатурації сироваткових білків залежить від температури та тривалості нагрівання. Для більшості з них процес денатурації починається при температурі біля 70ºС. Найбільш нестійкими є імуноглобуліни та сироватковий альбумін. Більш термостійкі β-лактоглобулін та α- лактоальбумін та протеозопептона фракція [29, 52].

Казеїн більш термостійкий, він коагулює при нагріванні свіжого молока до 130–150ºС. Але високі температури теплової обробки викликають зміну складу й структури казеїнаткальційфосфатного комплексу [13, 139, 155]. При пастеризації та стерилізації порушується співвідношення форм солей кальцію в плазмі молока. На ефективність пастеризації негативно впливає наявність піни, що пов'язано з тим, що теплопровідність піни значно нижче теплопровідності молока [59, 70].

На жирову частину молока теплова обробка суттєвого впливу не здійснює, однак ОЖК зазнають деяких змін – спостерігається перехід білків та фосфоліпідів з їх поверхні до плазми. При пастеризації дисперсність молочного жиру підвищується, а його відстоювання сповільнюється, оскільки жирові кульки

втрачають здатність до агрегації внаслідок денатурації білкових компонентів їх оболонок [97, 98, 139].

При гомогенізації та пастеризації молока від 5 до 15% фосфоліпідів переходять з ОЖК до дисперсійної фази. При сепарації молока 65–70% фосфоліпідів переходять у вершки. При гомогенізації спостерігається зменшення діаметру білкових структур, стрімке зростання загальної поверхні жирових кульок, досягається сольовий баланс молока, а в плазмі збільшується кількість розчиненого кальцію [84, 141].

В процесі теплової обробки спостерігається руйнування вітамінів, ступінь деструкції яких визначається температурою та тривалістю теплової обробки емульсії. Найбільш суттєвими є втрати вітаміну С, менше руйнуються вітамін А та каротин, а вміст вітаміну B_2 практично не змінюється. При стерилізації молока денатурація білків ОЖК є більш глибокою, при проведенні операції порушується їх цілісність, що призводить до злиття окремих жирових кульок та витоплювання вільного жира. Найбільш ефективною з позиції забезпечення мінімального впливу є стерилізація протягом декількох секунд за температури 130–150°С [70, 139, 141, 182].

При прямому нагріванні молока до 140–142°С відбувається денатурація сироваткових білків з утворенням часток білка, які мають великий розмір. Щоб в процесі зберігання білкові частки не випадали в осад можливою альтернативою може бути проведення гомогенізації після стерилізації. В цьому випадку одночасно з руйнуванням жирових кульок при гомогенізації відбувається руйнування часток денатурованого білка [26, 98].

В промисловості частіше використовують режим пастеризації 75–76°С з витримкою 15–20с, який забезпечує гігієнічну надійність, ліквідацію патогенної мікрофлори, забезпечення харчової та біологічної цінності молока [139, 141, 155]. Можливою є також так звана низькотемпературна пастеризація (термізація), яка виконується при 62–63°С з короткочасною витримкою протягом 15–20с або тривала пастеризація при 63–65°С з витримкою 30 хв [154, 194].

Аналіз можливих схем здійснення технологічної обробки з найменшою дестабілізацією білкової та жирової фази дозволив навести звичайну та альтернативну технологію обробітку знежиреного молока для отримання питного молока заданої жирності при проведенні гомогенізації одночасно з нормалізацією продукту (рис Б.1.) [13, 139, 141, 182].

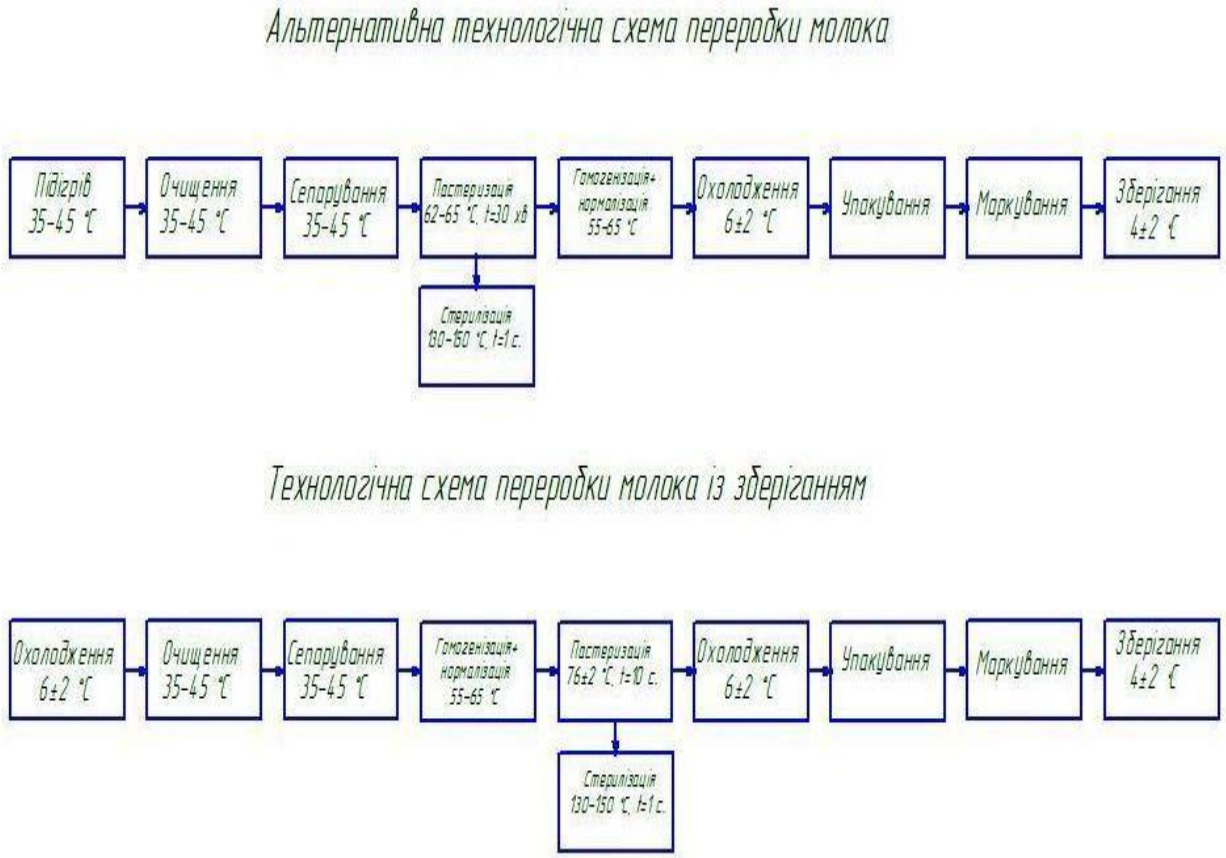


Рис. Б.1. Можливі технологічні схеми проведення нормалізації одночасно з гомогенізацією

Проведення гомогенізації після пастеризації призводить до підвищення ефективності процесу, оскільки дисперсність молочного жиру в цьому випадку вище, ніж у випадку проведення гомогенізації до пастеризації.

Додаток В

Огляд існуючих конструкцій клапанних гомогенізаторів молока та основних факторів процесу диспергування в клапанній щілині

Ефективність гомогенізації залежить від гідравлічних умов в зоні клапанної щілини. Ці умови визначаються тиском гомогенізації, від значення якого залежить швидкість руху рідини в щілині та висота клапанної щілини. Ступінь диспергування залежить від тиску, конструкції гомогенізуючої головки, рівномірності подачі компонентів суміші та попередньої обробки продукту. Експериментальні дослідження, проведені Барановським, дозволили встановити, що основним фактором, що визначає дисперсність емульсії, є швидкість потоку на початку клапанної щілини, де й відбувається вирішальна стадія процесу, яка відбувається внаслідок різкої деформації крапель при переформуванні потоку [9, 140, 169].

Наступна механічна дія на емульсію при її русі в щілині та при ударі струменю за межами клапану помітно не впливає на дисперсність емульсії, незважаючи на те, що градієнт швидкості при русі потоку в щілині та швидкість струменю змінюються в широкому діапазоні. На дисперсність емульсії не впливає також зміна довжини шляху, який проходить емульсія під клапаном. Відсутність суттєвого впливу швидкості удару на виході струменю та поперечного градієнту швидкості в щілині на дисперсність пояснюється тим, що вони діють в той час, коли процес руйнування часток завершено внаслідок їх деформації при вході в клапанну щілину, тому вплив вторинних факторів не може проявитись [140, 203].

Збільшення тиску гомогенізації призводить до зменшення середнього діаметру та діапазону розподілу за розмірами жирових кульок. За даними Н.В.Барановського, середній діаметр жирових кульок при тиску до 12–14 МПа зменшується більш інтенсивно, ніж при тиску від 14 до 20 МПа, а при тиску більш 20 МПа практично не зменшується, що пояснюється з точки зору гідравлічних передумов процесу [9, 84, 155].

З підвищенням тиску гомогенізації посилюється механічний вплив на емульсію, зростає дисперсність жиру, а СЖК зменшується. За даними ВНИКМИ,

при тиску 15МПа СЖК складає 1,43 мкм, а ефективність гомогенізації 74%, при тиску 20 МПа СЖК зменшується до 0,97 мкм, а ефективність зростає до 80%. Підвищення тиску можна досягнути, обладнав гомогенізатор двома чи трьома клапанами. Однак, підвищення тиску призводить до збільшення витрат електроенергії, тому оптимальний тиск процесу повинен складати не більше 10–20 МПа. Необхідні значення робочого тиску гомогенізації залежать від виду та складу продукту, зі збільшенням вмісту жиру та сухих речовин в продукті рекомендується використовувати режими з більш низькими значеннями цього параметру, що обумовлено необхідністю зниження витрат енергії [9, 25, 204].

Найбільша теоретична швидкість залежить від тиску гомогенізації і може бути розрахована за формулою Торічелі (В1)

$$\boldsymbol{v_1} = \sqrt{2g\frac{\Delta p}{\gamma}} \quad (B1)$$

Головний фактор процесу-швидкість $\boldsymbol{v_1}$– з підвищенням тиску збільшується пропорційно до квадратного кореня перепаду тиску $\Delta \boldsymbol{p}$ та його зміни при значеннях тиску вище 20 МПа виражена достатньо слабко. Отже, технологічні результати процесу гомогенізації знаходяться у відповідності до гідравлічних залежностей.

Звідси можна отримати емпіричну формулу, дійсну для звичайних умов гомогенізації цільного молока за температури 60°С та для діапазону тиску 3–20 МПа [9, 205].

$$\boldsymbol{d_{cp}} = \frac{\boldsymbol{3.8}}{\sqrt{\Delta \boldsymbol{p}}}. \quad (B.2)$$

З даної формули можна визначити тиск гомогенізації, необхідний для отримання заданого ступеню дисперсності. Ефективність гомогенізації молока визначається робочим тиском, температурою, швидкістю руху продукта при проходженні крізь гомогенізуючу головку, її конструктивними особливостями, складом та властивостями компонентів, що складають ОЖК, кислотністю, а також послідовністю технологічних операцій. Робочий тиск гомогенізації являє собою різницю тиску продукту до та після гомогенізуючої головки. Його величина визначається нероздільністю молочної емульсії при даному СЖК та витратах

енергії. Нероздільність емульсії залежить від швидкості відстоювання молочного жира [26, 54, 94].

Гомогенізатори клапанного типу відносяться до енергоємних та метало ємних конструкцій: в залежності від тиску та продуктивності витрата електроенергії в них змінюється від 36 до 140 кВт/год, при цьому загальна вага гомогенізатора може знаходитись в межах 600–4000 кг. При виробництві цільного молока розмір жирових кульок змінюється з 3–4 мкм до 0,7–0,8 мкм. За ефективністю впливу на молоко без значних небажаних змін його властивостей всі інші машини поступаються клапанним гомогенізаторам високого тиску [84, 140, 205].

Найбільшого розповсюдження набули клапанні гомогенізатори, які складаються з насосу високого тиску та гомогенізуючої головки. До гомогенізуючого клапану рідкий продукт може подаватись за допомогою одно, двох чи багатоплунжерних насосів, які здатні забезпечувати рівномірну подачу та спроможні створити високий тиск. Разом з цим для зниження витрат енергії та зниження ваги конструкції за кордоном створені гомогенізатори низького тиску. 5–7 МПа. Продукт подається шестеренним насосом та може застосовуватись для гомогенізації в’язких продуктів. Режим їх роботи дозволяє отримати ефект гомогенізації достатній для виробництва цільного гомогенізованого молока [140].

Робота з модернізації гомогенізаторів клапанного типу спрямована на: спрощення конструкції та зниження металомісткості [59, 80], підвищення продуктивності [13, 204], зниження енергозатрат [169, 203, 204], підвищення ступеню гомогенізації [84, 86, 169], підвищення ефективності процесу [94, 154, 169].

Відомий спосіб гомогенізації, розроблений фірмою Officine Meccaniche Soavi Bruno (Італія) здатен знизити витрати електроенергії до 25% при забезпеченні СЖК на рівні 2 мкм [204]. Для цього молоко попередньо сепарується, знежирене молоко та вершки по трубопроводам надходять до відповідних колекторів гомогенізатора. В апараті процеси сепарації та гомогенізації відбуваються безперервно. З колектору вершки по каналу надходять в щілину між сідлом і клапаном, далі до трубопроводу, куди надходить знежирене молоко.

Відмінною рисою пристрою для гомогенізації рідини, запропонованим фірмою Alfa–Laval Bergedorfer Eisenverke GmbH (Німеччина) є те, що його гомогенізуюча щілина має змінний перетин, що підвищує ефективність гомогенізації [80, 169].

Гомогенізатори фірми Gaulin можуть збільшити ефект гомогенізації на 25% при застосуванні гідравлічної системи HVA за рахунок зниження амплітуди коливань гомогенізуючих клапанів завдяки відсутності стискання масла, що забезпечується за рахунок пульсуючої подачі продукту, що гомогенізується [84, 205].

Лінійка гомогенізаторів всіх типів фірми Rannie з гомогенізуючою багатоступінчастою головкою з роторним клапаном моделі LW працюють при низькому тиску (9,5 МПа) та забезпечують ефект гомогенізації аналогічний ефекту, який досягається при тиску 13,5 МПа, що дає змогу економити до 50% електроенергії. Однак існує декілька негативних моментів, пов’язаних з експлуатацією таких машин, серед яких: обмеженість застосування для обробки продуктів з різними показниками в’язкості, відсутність ефективного проведення ряду операцій, при використанні яких необхідно створення технологічних ліній або їх комплектація додатковим обладнанням [22, 41, 169].

В ході диспергування в клапанному гомогенізаторі при переході з зони з малими швидкостями руху (молокопровід та нагнітаюча камера) до зони великих швидкостей (плоска клапанна щілина) передня частина жирової кульки витягується, від неї відриваються невеликі частки. В залежності від форми щілини клапани можуть бути плоскі, тарілчаста, конічні або конічні рифлені, при цьому висота клапанної щілини складає біля 0,7 мм. Швидкість руху жирової кульки в нагнітаючий камері гомогенізуючої головки складає 9 м/с, а в клапанній щілині 150–200 м/с, при цьому кількість жирових кульок збільшується в 200 – 500 разів, а сумарна поверхня в 6–10 разів [9, 59, 140].

Внаслідок проведеного патентного огляду можна відзначити, що сідло та клапан можуть бути встановлені в підшипниках, розташованих в нерухомому

корпусі, з можливістю обертання в протилежні боки під дією потоку продукту [80, 140].

В пристрою для гомогенізації рідини, запропонованому фірмою Alfa–Laval Bergedorfer Eisenverke GmbH (Німеччина) реалізован принцип, за яким гомогенізуюча щілина має змінний перетин, що підвищує ефективність гомогенізації [169]. Гомогенізатори фірми Gaulin за рахунок зниження амплітуди коливань гомогенізуючих клапанів можуть збільшити ефект гомогенізації на 25%. Такий ефект при застосуванні гідравлічної системи HVA досягається завдяки відсутності стискування масла, що забезпечується за рахунок пульсуючої подачі продукту, який гомогенізується [13, 205]. Двохступінчасту гомогенізацію з великим перепадом тисків на обох ступенях застосовують при виробництві високожирних молочних продуктів (вершки, суміші морозива та ін.) вона дозволяє розсіювати скупчення кульок, що утворюються.

Робились спроби замінити багатоплунжерний насос клапанного гомогенізатору відцентровим. В першому випадку насос використовувався лише для створення необхідного тиску, після чого молоко надходило до диспергуючого пристрою. В іншому-для диспергування використовувався весь шлях проходження молока від центра диску відцентрового насосу до його периферії. Сама конструкція диска забезпечує активний механічний вплив на частки молочної емульсії. Найбільше розповсюдження такі диспергатори (емульсори) отримали при обладнанні цехів з виробництва замінників цільного молока [28, 48, 88].

Запропонована конструкція гомогенізуючого клапану з рядом з’єднаних радіальних кільцевих проточок, які розташовані на поверхні робочих органів гомогенізатора. Гіпотезою руйнування є дія сили опору кульки при русі в молоці, що досягається за умови створення турбулентного режиму течії. Диспергування в даному випадку може відбуватись поступовим перетворенням кульки зі сферичної форми до еліпсоїду, потім до форми «парашуту» ,що є різновидом вібраційного руйнування крапель [87, 122]. Це є сумнівним твердженням, оскільки для руйнування за таким механізмом необхідна висока частота коливань, яка не створюється в робочій зоні гомогенізатора [115].

Для підвищення ступеню гомогенізації запропоновано пристрій в якому в зоні подачі продукту з площини між сідлом та клапаном монтуються пружні пластини, розміщені в площині, перпендикулярній до вісі клапана. Продукт, проходячи між сідлом та клапаном попадає на пластини, які вібрують. Коливання пластин, розповсюджуючись в продукті, який обробляється викликають додатковий гомогенізуючий ефект, що підвищує загальний ступінь гомогенізації [140, 146, 205].

Розглянуті можливі напрямки модернізації конструкцій найбільш поширених в молокопереробній промисловості клапанних гомогенізаторів дозволяє стверджувати, що їх практична реалізація може забезпечити підвищення ефективності процесу диспергування. Разом з цим слід відзначити, що запропоновані авторами конструктивні зміни конструкцій клапанних диспергаторів не дозволяють знизити енерговитрати процесу більше ніж на 7–15%.

Додаток Г

Механізми, за рахунок яких відбувається руйнування жирових кульок

Процеси, які відбуваються в зоні граничного шару

Граничний шар являє собою зону біля поверхні звуження конфузора СЩГРВ в якому спостерігається високий градієнт швидкості в повздовжньому напрямку, а отже руйнування жирових кульок може відбуватися найбільш ефективно. Для оцінки впливу на процес руйнування граничного шару необхідно оцінити його величину, яка пов’язана з шляхом змішування та дотичними напруженнями, що виникають внаслідок дії сил опору руху жирової кульки в потоці.

Біля стінки камери відбувається ковзання рідини, в межах граничного шару дотичні сили зростають в напрямку вісі ***y***, а за межами граничного шару дотичні сили не мають помітного впливу. Збільшення товщини граничного шару, відбувається внаслідок включення часток, загальмованих завдяки дії сил в'язкості та тертя між дрібними об’ємами потоку та частками дисперсної фази [12, 71]. З іншого боку оцінити товщину граничного шару є достатньо складним завданням. Деякі джерела вказують, що за розвиненої турбулентності граничний шар може займати всю площу обмежену стінками камери [74, 159].

Сили в'язкості, які діють в граничному шарі викликають появу дотичних напружень, які зменшують швидкість потоку дисперсійного середовища та викликають утворення вихорів. За межами граничного шару вплив в'язкості зазвичай проявляється слабо, в цьому випадку силами тертя можна знехтувати, а градієнт швидкості не досягає таких великих значень, як в граничному шарі. Картина течії близька до тієї, яку дає ідеальна рідина з домінуючим впливом сили опору, згідно отриманого рівняння руху жирової частки (2.1) [54, 61].

Шлях змішування як міру турбулентності запропонував Л.Прандтль як відстань, яку повинна пройти частка ДФ у вихорі, виникаючому за турбулентної течії при проникненні часток зі струменю до потоку знежиреного молока, поки їх швидкості не зрівняються. Шлях змішування збільшується за мірою збільшення

турбулентності, будемо оцінювати його значення в межах коливання діаметра камери гомогенізатору в місці найбільшого звуження конфузору, що змінюється в межах 2–4 мм. Величина шляху змішування $l_{зм}$ визначається емпіричною умовою теорії, запропонованої Прандтлем, згідно якої [1, 74]

$$l_{зм} = kd_к, \qquad (Г.1)$$

де k – універсальний коефіцієнт пропорційності, що не залежить від числа Рейнольдса $k \approx 0{,}39$;

$d_к$ – діаметр камери гомогенізатора в місці найбільшого звуження конфузору, при $d_к$=2..4мм, $l_{зм}$ дорівнює відповідно 0,78…1,56 мм.

Такий характер залежності пояснюється тим, що пульсації мають більш високі значення, де вище швидкість, при цьому шлях змішування пропорційний діаметру камери конфузору в місці найбільшого звуження $d_к$ [20, 159].

В новій теорії Прандтля, яка враховує не молекулярну структуру рідини а характеристики турбулентного руху, він визначив, що характерний масштаб пульсаційної швидкості v_y дорівнює градієнту осередненої швидкості помноженому на характерний масштаб довжини $l_{зм}$, який він назвав шляхом змішування. Градієнт швидкості в напряму, перпендикулярному до стінок внутрішніх поверхонь конфузору має високі значення, при цьому за межами граничного шару дотичні напруження мають низькі значення [20, 158]. Величину дотичних напружень можна розрахувати за формулою [159]

$$\tau \sim \mu_{пл} v_{пл} \sqrt{\frac{2\rho_{пл} u_c}{\pi \mu_{пл} d_к}}. \qquad (Г.2)$$

Коефіцієнт динамічної в'язкості $\mu_{пл}$ при 60°С приблизно дорівнює $7 \cdot 10^{-4}$Па·с. Згідно наведених формул (2.3) та (2.5) середня швидкість рідини дорівнює 24,5 м/с, а дотичні напруження при діаметрі конфузора в місці найбільшого звуження 4мм складають $7{,}9 \cdot 10^{-5}$Па; при діаметрі 2 мм відповідно $1{,}1 \cdot 10^{-4}$Па.

В граничному шарі градієнт швидкості $\partial u/\partial y$ в напрямку, перпендикулярному до стінки є дуже великим, а в’язкість $\mu_{пл}$ як би мала вона не була оказує вагомий вплив на течію, оскільки дотичні напруження, які викликані тертям можуть

приймати високі значення [158]. Товщина граничного шару пропорційна до кореню квадратного з кінематичної в'язкості

$$\delta = \sqrt{\nu} = \sqrt{1,5 \cdot 10^{-6}} \,. \qquad (Г.3)$$

Граничний шар являє собою область руху рідини в якому величини сили тертя та інерції мають однаковий порядок, на підставі чого можна оцінити товщину граничного шару [130, 173, 188].

$$\delta \sim \sqrt{\frac{\pi \mu_{пл} d_к}{2 \rho_{пл} \nu}} \,. \qquad (Г.4)$$

Згідно наведених формул (Г.3) та (Г.4) товщина граничного шару дорівнює відповідно $1,2 \cdot 10^{-3}$ та $3,8 \cdot 10^{-2} \ldots 5,3 \cdot 10^{-2}$ мм. Різниця між отриманими значеннями пояснюється приблизністю розрахунку коефіцієнта динамічної в'язкості плазми молока та величини шляху змішування.

З отриманих результатів можливо зробити висновок, що діаметр конфузору в місці найбільшого звуження камери гомогенізатора повинен дорівнювати мінімально можливих значеннь, оскільки при цьому зростатимуть дотичні напруження, які зменшують швидкість вершків. При високих значеннях швидкості знежиреного молока виконання цієї вимоги буде створювати необхідні умови для ефективного диспергування в зоні граничного шару. Але зважаючи на незначну товщину граничного шару, в ньому подрібнюється незначна частина жирових кульок, внаслідок чого розглядати його в якості основного фактору подрібнення недоцільно.

Тангенційні напруження

Передача кількості руху викликана як тангенційними напруженнями між менш та більш рухомими шарами рідини так і турбулентним проникненням часток з струменю ДФ до потоку знежиреного молока. Швидкість руху частки втягнутої до руху менше швидкості руху потоку знежиреного молока. Кожен шар рідини, приведений до руху залучає наступні шари рідини, які до цього знаходились в стані

спокою. Різниця швидкостей руху крапель та знежиреного молока обумовлює появу тангенційних напружень, що викликає деформацію крапель, яка матиме достатньо високі значення для початку руйнування [161].

Проти деформації крапель під дією тангенційних напружень діє поверхневий натяг між фазами, який змушує краплю гранично скоротивши поверхню прийняти форму шару. Взаємодія цих сил обумовлює форму краплі та можливість її руйнування. Найбільш інтенсивне руйнування крапель відбувається в місці екстремальної різниці в швидкостях руху фаз, тобто в місці найбільшого звуження конфузору в центральній частині камери гомогенізації. При зниженні поверхневого натягу, що буде відбуватись зі збільшенням температури, довжина струменю буде збільшуватись, що буде сприяти диспергуванню молочної емульсії [4, 188].

Згідно теорії гідродинамічного граничного шару достатньо великі значення дотичних напружень та сил внутрішнього тертя, які спричиняють руйнування можуть виникнути лише за наявності достатньо високих градієнтів швидкості.

$$\tau = \mu \frac{du}{dy}. \qquad (Г.5)$$

Високі значення градієнтів швидкості можуть виникати в двох випадках. По–перше, при русі рідини поблизу твердої поверхні, оскільки на поверхні швидкість дорівнює нулю, по–друге, поблизу зони контакту двох потоків рідини, які мають істотну різницю в швидкостях. В запропонованій лабораторній установці СЩГРВ забезпечуються обидві умови створення великих градієнтів швидкості.

Шлях змішування зі зростанням турбулентності значно збільшується, тому тангенційні напруження та масообмін в потоці суттєво зростають [161].

$$\theta = l\rho_м^2 (\frac{du}{dy})^2, \qquad (Г.6)$$

де θ – тангенційні напруження, за умови розвиненої турбулентності впливом ламінарного тертя можна знехтувати, тоді $\theta = du/dy$.

Критичні умови руйнування крапель визначаються значенням числа Вебера, на початку руйнування крапель. Хінце для визначення руйнування крапель

пропонує використовувати відносне число Вебера та виразити його як відношення тангенційної напруги до міжфазного натягу [71, 137].

$$We_{кр} = \frac{\theta d_к}{\sigma}. \qquad (Г.7)$$

Збільшення критерію Вебера показує, що тангенційні напруження по відношенню до міжфазного натягу зростають, внаслідок збільшується деформація крапель. За досягнення критичних значень числа Вебера відбувається руйнування крапель. З іншого боку зростання числа Вебера веде до зменшення СЖК та як наслідок підвищення стійкості отриманих емульсій, що відображається на збільшенні терміну придатності та енергетичної цінності продукту [9, 166].

Осциляція

Під дією потоку знежиреного молока, який виникає внаслідок турбулентних пульсацій, збуджується осциляція крапель, яка може бути причиною їх руйнування. З теорії коливань відомо, що кінетична енергія осциляції залежить по–перше від співвідношення частоти збуджуючої сили та власної частоти коливань системи; по–друге від величини в’язкого демпфування [119, 61, 130].

Власна частота коливань краплі дорівнює

$$\omega_к = \omega_к^* \sqrt{1 - \delta_з}, \qquad (Г.8)$$

де $\omega_к$ – частота гармонійних коливань краплі;

$\delta_з$ – декремент затухання, що характеризує в’язке демпфування краплі.

Для частоти гармонійних коливань краплі Лемб [72, 90] отримав рівняння підтверджене експериментальними даними

$$\omega^*_к = 14\left(\frac{\delta_{пл}}{(3\rho_в + 2\rho_{пл})d^3}\right)^{0,5}. \qquad (Г.9)$$

Безрозмірний декремент затухання для випадку осциляції рідкої краплі за даними праці [67,161]

$$\delta_з = \frac{1,62(\mu_в + 2\mu_{пл})}{\sqrt{\delta_{пл} d\ (3\rho_в + 2\rho_{пл})}}. \qquad (Г.10)$$

Для рідин з невеликою в'язкістю ($\mu_в+2\mu_{пл}\leq 30\cdot 10^{-3}$Па·с) та крапель з розміром $d_к>1$мм декремент затухання не перевищує $\delta_з\leq 0,5$.

Характерна частота турбулентних пульсацій краплі в потоці знежиреного молока

$$\omega_m = 2\pi\sqrt{\frac{\Delta u^2{}_y}{d}}, \qquad (Г.11)$$

За абсолютною величиною Δu_y можна порівняти з пульсаційною складовою швидкості u', яка коливається від діапазону значень середньої швидкості в межах ±30%. Пульсаційні швидкості змінюються вздовж та поперек потока та можуть набувати позитивних та від'ємних значень. Відхилення від середньої швидкості за різних значень тиску дорівнює від 16,8 м/с до 31,2 м/с. При виникненні вимушуючої сили з частотою коливань краплі, відбувається явище резонансу $\omega_к=\omega_m$, коли енергія осциляцій та амплітуда коливань зростають до високих значень [74, 147].

Згідно формул (Г.8) – (Г.11) $\omega_к^*=9,0\cdot 10^6$; $\delta_з=1,43$; $\omega_к=5,9\cdot 10^7$; характерна частота пульсацій краплі ω_m в залежності від значення Δu_y буде знаходитись в межах $4,7\cdot 10^4$–$1,0\cdot 10^5$. Отримані дані свідчать про те, що осциляція в процесі диспергування присутня, але вирішального впливу, який би відбувся за досягнення резонансу не має.

Інші фактори і механізми

Жирова кулька, яка при перемішуванні включається до потоку знежиреного молока в умовах розвиненої турбулентності потока та створюваних ним тангенційних напружень, спочатку розривається на циліндри, з яких в подальшому утворюються тонкі стрічки, після чого від них відриваються краплі великого розміру, які поділяються на більш дрібні. Розвиток цього процесу буде залежати від гідродинамічних параметрів потоку [1, 84, 86]. Процес вибухового руйнування розглянуто в праці [4, 130].

Механізм руйнування крапель під впливом турбулентних пульсацій зазвичай розглядають, виходячи з теорії локальної ізотропної турбулентності, розробленої

А.Н.Колмогоровим та А.М.Обуховим [147, 166]. Сутність її в наступному: за великих значень ***Re*** на потік рідини, що рухається з деякою середньою швидкістю в камері накладаються турбулентні пульсації першого порядку, які являють собою хаотичні переміщення одне відносно другого окремих об'ємів рідини з масштабом $\lambda_1 \leq 1$, при швидкості цих переміщень $u_1 \approx \upsilon_{зн}$ [130]. А.Н.Колмогоров, аналізуючи рух крапель в турбулентному потоці припустив, що руйнування відбувається внаслідок деформації під дією різниці динамічних напорів знежиреного молока, які перевищують сили міжфазного натягу [1, 77, 161, 166]

$$\frac{C\rho_м \Delta u_y^2}{2} \geq \frac{4\sigma_м}{d}, \qquad (Г.12)$$

де C– коефіцієнт пропорційності, наближений до одиниці;

Δu_y – різниця швидкостей знежиреного молока, які діють на відстані $y=\pm 1/3 d_к$, м/с;

$\sigma_м$ – поверхневий натяг знежиреного молока, Н/м.

Значення нерівності за формулою (Г.12) дорівнює $1{,}5 \cdot 10^6 \geq 1{,}3 \cdot 10^6$ та $5{,}0 \cdot 10^6 \geq 1{,}3 \cdot 10^6$ відповідають дійсності. Це свідчить, що вищенаведене рівняння описує умови руйнування краплі при впливу на неї динамічних напорів, в пристінних шарах рідини. Об'єм пристінних шарів є невеликим, основний відсоток жирових кульок зазнає руйнування в турбулентному ядрі потоку [20, 40, 49, 75].

Розглянемо можливе руйнування жирових кульок в умовах відсутності збудження тиску для характерного часу деформації крапель та періоду власних коливань з часом перебування часток в зоні взаємодії з струменем знежиреного молока [24, 71]. Процес руйнування крапель за відсутності зіткнення залежить від часу знаходження крапель всередині струменю

$$\delta t = d / \upsilon_{\perp}, \qquad (Г.13)$$

де $\upsilon_{\perp}$– швидкість руху жирових крапель в поперечному до потоку напрямку руху плазми молока,м/с.

Згідно результатів аналітичних та експериментальних досліджень найбільш близької за принципом дії конструкції струминного гомогенізатора молока з роздільною подачею вершків оптимальними значеннями швидкості знежиреного

молока є 60 м/с, при цьому швидкість подачі вершків жирністю 50% через канал подачі вершків діаметром 0,7 мм складав від 20 до 30 м/с. Незважаючи на відсутність прямого впливу різниці швидкостей на СЖК та енерговитрати процесу можна констатувати, що швидкість знежиреного молока в 2-3 рази повинна перевищувати швидкість подачі вершків [114, 122]. Використаємо ці дані для розрахунку можливості руйнування крапель жиру в потоці знежиреного молока без вдару [24, 162, 188].

$$We_{\perp} = \rho_{м} \upsilon_{\perp}^{2} d \ / \sigma < We_{m} = \rho_{м} \upsilon_{зн} d \ / \sigma . \qquad (Г.14)$$

При виконанні умови (Г.14) на краплю діють П–подібні гідродинамічні сили з амплітудою We_m та тривалістю дії $\theta \approx \delta t$, що виконується для процесу струминної гомогенізації де значення $We_{\perp}$ для діапазону зміни швидкості подачі вершків коливається в діапазоні 12,4–27,9, а значення We_m складає 111,8

Час миттєвого руйнування крапель розраховується

$$t_{м} = d \ u^{-1} (\rho_{в} \rho_{пл})^{0,5} . \qquad (Г.15)$$

де u – відносна швидкість руху краплі в потоці знежиреного молока, $u=(\upsilon_{\perp}^{2}+\upsilon_{зн}^{2})^{0,5}$.

Відносна швидкість коливається в діапазоні 63–67 м/с. Час миттєвого руйнування крапель (згідно Г.15), який знаходиться в діапазоні значень 4,7 10^{-5}–4,4 10^{-5}с та періоду власних коливань краплі, що знаходиться в межах 3,5 10^{-10}–7,9 10^{-10}с з часом перебування крапель в зоні руйнування, який складає в залежності від швидкості вершків $1 \cdot 10^{-7}$–$1,5 \cdot 10^{-7}$с свідчать про те, що руйнування жирових крапель відбувається квазістатично та суттєво залежить від числа Вебера.

Додаток Д

Розрахунок економічної ефективності впровадження струминно–щілинного гомогенізатора молока з роздільною подачею вершків

Дані для розрахунку економічної ефективності приведені в таблиці Д.1

Таблиця Д.1

Вихідні дані для розрахунку

Показники	Од. вим.	Базовий варіант К5-ОГ2А-1,25	Струминний гомогенізатор	Обґрунтування
1	2	3	4	5
Маса апарата	т	0,78	0,14	Техн. характеристика
Прейскурантна ціна	тис. грн.	520	68	Дані ПП «Молокозавод-ОЛКОМ»
Продуктивність апарата	т/год	1,25	1,25	Техн. характеристика
Встановлена потужність	кВт	11	8	Техн. характеристика
Балансова вартість апарата	тис. грн.	682	85	Розрахункові дані
Обслуговуючий персонал	чол.	1	1	Дані ПП «Молокозавод-
Річний обсяг виробництва молочної продукції	т/рік	5000	5000	Дані ПП «Молокозавод-ОЛКОМ»
Річне завантаження машини	год/рік	4000	4000	Дані ПП «Молокозавод-ОЛКОМ»
Кількість змін роботи	змін/дн.	2	2	Дані ПП «Молокозавод-
Кількість апаратів	шт.	1	1	Дані ПП «Молокозавод-ОЛКОМ»

Середня собівартість сировини (молока)	грн./кг	12,5	12,5	Дані ПП «Молокозавод-ОЛКОМ»
Середньоденна заробітна плата з нарахуваннями	грн.	280,00	280,00	Дані ПП «Молокозавод-ОЛКОМ»
Вартість виробничої площі	тис. грн.	**24,8**	12,5	Дані ПП «Молокозавод-ОЛКОМ»
Витрати праці на виробництво 1 тони продукції	люд.дн.	0,12	0,10	Розрахункові дані
Норма амортизаційних відрахувань для обладнання	%	12,8	12,8	Норми амортизаційних відрахувань
Норма амортизаційних відрахувань для будинків	%	3,1	3,1	Норми амортизаційних відрахувань
Норматив для відрахувань на утримання і ремонт обладнання	%	6	6	Норми амортизаційних відрахувань
Норматив відрахувань на утримання і поточний ремонт будинків	%	2	2	Норми амортизаційних відрахувань

Прейскурантну ціну розробленого гомогенізатора визначимо за формулою

$$Ц_п = \left(M^{п-н} \cdot C^{п-н} + C_o\right) \cdot 1,15, \qquad (Д.1)$$

де $Ц_п$ – прейскурантна ціна гомогенізатора, грн;

$M^п$ – маса гомогенізатора без комплектуючих покупних виробів, кг, $M^{п-н}$=140кг;

$C^п$ – собівартість 1 кг деталей машини без комплектуючих покупних виробів, грн/кг, $C^{п-н}$=220 грн/кг;

C_0 – загальна вартість комплектуючих покупних виробів за прейскурантними

цінами, грн; C_0=28000 грн;

1,15 – коефіцієнт, що враховує середнє перевищення оптової ціни над собівартістю.

$$Ц_п = (140 \cdot 220 + 28000) \cdot 1,15 = 67620 грн.$$

Балансова вартість апарата визначається шляхом додавання до її прейскуратної ціни торгово-транспортних і складських витрат у розмірі 12,5% і витрат на монтаж на робочому місці в розмірі 10...15% прейскурантної ціни.

Капітальні вкладення впровадження гомогенізатора наведені в табл. Д.2.

Таблиця Д.2

Розрахунок капітальних вкладень

Показники	Од. вим.	К5-ОГ2А-1,25	Струминний гомогенізатор
Балансова вартість апарата	тис. грн.	682	85
Вартість виробничої площі	тис. грн.	24,8	12,5
Разом:	тис. грн.	706,8	97,5
Річний обсяг виробництва	тон	5000	5000
Питомі капітальні витрати	грн./т	141,3	19,5

Приведені витрати на одну тонну переробленого молока визначаються по формулі

$$C = C_{зп} + A_{об} + A_{буд} + P_{об} + P_{буд} + C_е, \qquad (Д.2)$$

де C – приведені витрати на виробництво 1т продукції, грн;

$A_{об}$, $A_{буд}$– відрахування на амортизацію, відповідно, устаткування й будівель, грн.

$$A_{об} = \frac{Б_{об} \cdot Н_а^{об}}{Q_р}, \quad і \quad A_{зд} = \frac{Б_{буд} \cdot Н_а^{буд}}{Q_р}, \qquad (Д.3)$$

де $Б_{об}$, $Б_{буд}$ – балансова вартість устаткування (апарата) і виробничої площі, грн;

$Н_а^{об}$, $Н_а^{буд}$ – норма відрахувань на амортизацію, відповідно, устаткування й будівель, %;

$Q_р$ – річний обсяг виробництва продукції, т;

$Р_{об}$, $Р_{буд}$ – відрахування на ремонт, відповідно, устаткування й будівель, грн.

$$Р_{об} = \frac{Б_{об} \cdot Н_р^{об}}{Q_р}, \qquad \text{і} \qquad Р_{зд} = \frac{Б_{зд} \cdot Н_р^{буд}}{Q_р}, \tag{Д.4}$$

де $Н_р^{об}$, $Н_р^{буд}$ – норма відрахувань на ремонт, відповідно, устаткування й будівель, %;

$C_е$ – питома вартість електроенергії, грн.

$$C_е = Р_е \cdot Ц_е / Q_р, \qquad \text{Д.5)}$$

де $Р_е$ – споживана потужність за рік роботи, кВт;

$Ц_е$ – вартість електроенергії, грн/кВт·год.

Результати розрахунків приведених витрат наведені в табл. Д.3.

Таблиця Д.3

Приведені витрати на одну тонну переробленого молока

Показники	од. вим.	К5-ОГ2А-1,25	Розроблений гомогенізатор
Заробітна плата з нарахуваннями	грн.	$0,12 \cdot 250 = 30,00$	$0,10 \cdot 280 = 28,00$
Амортизація обладнання	грн.	$\frac{682000 \cdot 0,128}{5000} = 17,46$	$\frac{85000 \cdot 0,128}{5000} = 2,18$
Амортизація будинків	грн.	$\frac{24800 \cdot 0,031}{5000} = 0,15$	$\frac{12500 \cdot 0,031}{5000} = 0,08$
Утримання і поточний ремонт обладнання	грн.	$\frac{682000 \cdot 0,06}{5000} = 8,18$	$\frac{85000 \cdot 0,06}{5000} = 1,02$

Утримання і поточний ремонт будинків	грн.	$\frac{24800 \cdot 0,02}{5000} = 0,10$	$\frac{12500 \cdot 0,02}{5000} = 0,05$
Витрати на електроенергію	грн	$\frac{11 \cdot 4000 \cdot 2,02}{5000} = 17,77$	$\frac{8 \cdot 4000 \cdot 0,02}{5000} = 12,93$
Разом:	грн.	**73,66**	**44,26**

Ступінь зниження експлуатаційних витрат визначається за формулою

$$C_{зн} = \frac{C_1 - C_2}{C_1} \cdot 100\%, \qquad (Д.6)$$

де $C_{зн}$ – ступінь зниження експлуатаційних витрат, %;

C_1 – приведені витрати на виробництво 1т продукції клапанного гомогенізатора, грн;

C_2– приведені витрати на виробництво 1т продукції струминного гомогенізатора, грн.;

$$C_{зн} = \frac{73,66 - 44,26}{73,66} \cdot 100\% = 40\%.$$

Ступінь зниження питомих витрат електроенергії визначимо

$$C_e = \frac{C_{e1} - C_{e2}}{C_{e1}} \cdot 100\%, \qquad (Д.7)$$

де C_{e1} – питома вартість електроенергії базової машини, грн/т;

C_{e2} – питома вартість електроенергії розробленої машини, грн/т.

$$C_э = \frac{17,77 - 7,20}{17,77} \cdot 100\% = 59\%.$$

Річний економічний ефект від використання струминного гомогенізатора з роздільною подачею вершків розраховується за формулою

$$E_ф = З_1 - З_2, \qquad (Д.8)$$

або

$$E_ф = \left[\left(C_1 + E_н \cdot K_1\right) - \left(C_2 + E_н \cdot K_2\right)\right] \cdot Q_р, \qquad (Д.9)$$

де $E_ф$ – річний економічний ефект, грн;

$З_1$ і $З_2$– приведені витрати на одиницю продукції, виготовленої за допомогою базової й нової техніки, грн;

$Е_н$ – нормативний коефіцієнт відрахувань на використання капіталовкладень, $Е_н$=15%;

$К_1$ і $К_2$– питомі капітальні витрати на одиницю продукції, виробленої за допомогою базової й нової техніки, грн.

Тоді економічний ефект за приведеними витратами на одну тонну молочного продуту становитиме

$$Е_ф = 73,66 - 44,26 = 29,40 \text{ грн/т.}$$

Річний економічний ефект від використання розробленого пристрою для гомогенізації молока

$$Е_ф = \left[(73,66 + 0,15 \cdot 141,30) - (44,26 + 0,15 \cdot 21,80)\right] \cdot 5000 = 238350 \text{ грн.}$$

Термін окупності капіталовкладень визначається за формулою

$$Т_{ок} = \frac{Б_В}{Е_ф}, \qquad (Д.10)$$

де $Б_в$ – балансова вартість гомогенізатора, грн;

$Т_{ок}$ – термін окупності капіталовкладень, рік.

$$Т_{ок} = \frac{85000}{238350} = 0,36 \text{ роки.}$$

Додаток Ж
(довідковий)

Акт впровадження результатів досліджень процесу струминної гомогенізації молока з роздільною подачею вершків у навчальний процес

Затверджую

Проректор з НПР

к.т.н., доц О. П. Ломейко

АКТ ВПРОВАДЖЕННЯ

За матеріалами наукових досліджень процесу гомогенізації молочної промисловості асистента кафедри "Обладнання переробних і харчових виробництв ім проф Ф. Ю. Ялпачика" О.О. Ковальова, авторським колективом у складі О. О. Ковальова, К. О. Самойчука підготовлені методичні вказівки "Дослідження процесу струминної гомогенізації молока з роздільною подачею вершків" для студентів напряму підготовки 6. 050503 "Машинобудування" спеціальності 133 "Галузеве машинобудування" з дисципліни "Технологічне обладнання переробних та харчових виробництв", "Обладнання малих переробних і харчових виробництв".

Результати дослідження використовуються при виконанні курсових і дипломних робіт і проектів, пов´язаних з гомогенізацієй в молокопереробній галузі, а також в науково-дослідних роботах студентів і аспірантів.

В.о зав каф ОПХВ
ім Ф. Ю. Ялпачика В. О. Олексієнко
к. т. н., доц

Додаток З
(довідковий)

Акти передачі науково-технічної документації матеріалів досліджень струминного гомогенізатора з роздільною подачею вершків

Затверджую
Директор ПП ВКФ «Харчоналадка»
Петров В.А._____
" 26 " квітня 2018 р.

АКТ
передачі науково-технічної документації
на виготовлення струминного гомогенізатора молока з роздільною подачею жирової фази
за результатами науково-дослідної роботи

Комісія у складі: директора ПП ВКФ «Харчоналадка» з однієї сторони і представників Таврійского державного агротехнологічного університету (ТДАТУ): канд. техн. наук, доцента, в.о. зав каф. ОПХВ ім. професора Ф.Ю. Ялпачика Загорко Н.П., канд. тех. наук, доцента Самойчука К.О., асистента Ковальова О.О. з іншої сторони, підписали акт про те, що підприємством "Харчоналадка" отримано від ТДАТУ матеріали досліджень і розробки струминного гомогенізатора з роздільною подачею жирової фази молока, створеного на кафедрі обладнання переробних і харчових виробництв імені професора Ф.Ю. Ялпачика.

Матеріали включають наступну інформацію:

1. Конструктивно-технологічну схему струминного гомогенізатора молока з роздільною подачею жирової фази (згідно патентів України на корисні моделі №№ 94041, 94048, 106522, 122548), технічний опис, фотографії.

2. Результати аналітичних і експериментальних досліджень і оптимізації конструктивно-технологічних параметрів струминного гомогенізатора молока з роздільною подачею жирової фази.

3. Рекомендації з настроювання та експлуатації струминного гомогенізатора молока з роздільною подачею жирової фази для отримання

заданого ступеня диспергування жирової фази молочної емульсії з найменшими питомими енерговитратами.

Результати виконаної науково-дослідної роботи мають високу практичну значимість і будуть використані при освоєнні промислового випуску струминного гомогенізатора молока з роздільною подачею жирової фази на підприємстві.

Від ПП ВКФ "Харчоналадка"
директор
_____ /В.А. Петров/

Від ТДАТУ
к.т.н., доц. в.о. зав. каф. ОПХВ
імені проф. Ф.Ю. Ялпачика
_____ Н.П. Загорко
к.т.н., доцент
_____ К.О. Самойчук
асистент
_____ О.О. Ковальов

Додаток К
(довідковий)

Патенти за результатами досліджень дисертаційної роботи

Патент на корисну модель № 94041

УКРАЇНА

ПАТЕНТ

НА КОРИСНУ МОДЕЛЬ

№ 94041

СТРУМИННИЙ ГОМОГЕНІЗАТОР МОЛОКА З РОЗДІЛЬНОЮ ПОДАЧЕЮ ВЕРШКІВ

Видано відповідно до Закону України "Про охорону прав на винаходи і корисні моделі".

Зареєстровано в Державному реєстрі патентів України на корисні моделі **27.10.2014.**

Заступник Голови Державної служби інтелектуальної власності України Л.В. Висоцька

Державна служба інтелектуальної власності України
Ідентифікаційний код 37552556
№1

УКРАЇНА

(19) UA (11) 94041 (13) U

(51) МПК (2014.01)
A01J 11/00

ДЕРЖАВНА СЛУЖБА ІНТЕЛЕКТУАЛЬНОЇ ВЛАСНОСТІ УКРАЇНИ

(12) ОПИС ДО ПАТЕНТУ НА КОРИСНУ МОДЕЛЬ

(21) Номер заявки: u 2014 05239

(22) Дата подання заявки: 19.05.2014

(24) Дата, з якої є чинними права на корисну модель: 27.10.2014

(46) Публікація відомостей про видачу патенту: 27.10.2014, Бюл.№ 20

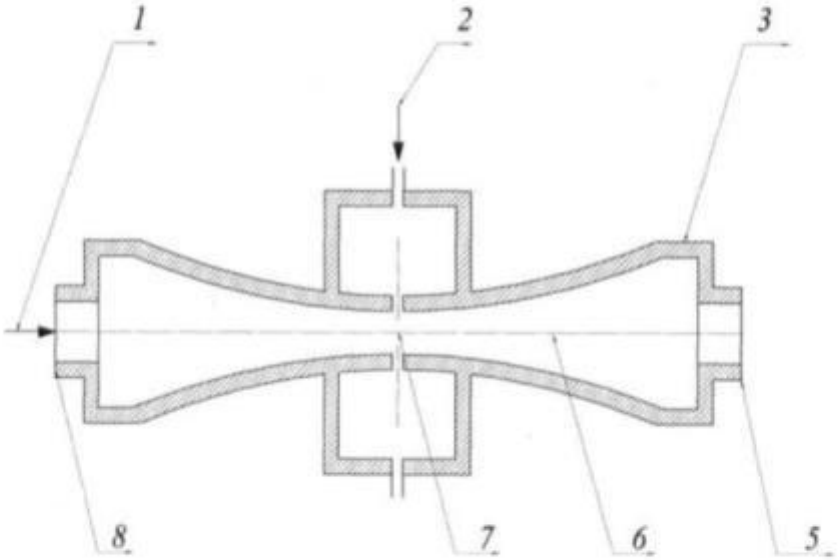
(72) Винахідник(и):
Самойчук Кирило Олегович (UA),
Ковальов Олександр Олександрович (UA),
Ялпачик Федір Юхимович (UA)

(73) Власник(и):
ТАВРІЙСЬКИЙ ДЕРЖАВНИЙ АГРОТЕХНОЛОГІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ,
пр. Б. Хмельницького, 18, м. Мелітополь, Запорізька обл., 72312 (UA)

(54) СТРУМИННИЙ ГОМОГЕНІЗАТОР МОЛОКА З РОЗДІЛЬНОЮ ПОДАЧЕЮ ВЕРШКІВ

(57) Реферат:

Струминний гомогенізатор молока з роздільною подачею вершків містить корпус з центральним каналом, в місці найбільшого звуження якого розташовані канали для ежектування вершків. Діаметри каналів для ежектування вершків виконані у відповідності до мінімальних діаметрів струменів вершків і розташовані радіально та симетрично відносно осі центрального каналу.



Фіг. 1

UA 94041 U

Патент на корисну модель № 94048

УКРАЇНА

ПАТЕНТ

НА КОРИСНУ МОДЕЛЬ

№ 94048

СПОСІБ ГОМОГЕНІЗАЦІЇ ТА НОРМАЛІЗАЦІЇ МОЛОКА

Видано відповідно до Закону України "Про охорону прав на винаходи і корисні моделі".

Зареєстровано в Державному реєстрі патентів України на корисні моделі **27.10.2014.**

Заступник Голови Державної служби інтелектуальної власності України Л.В. Висоцька

Державна служба інтелектуальної власності України
Ідентифікаційний код 37552556
№1

УКРАЇНА

(19) UA (11) 94048 (13) U

(51) МПК (2014.01)
A01J 11/00

ДЕРЖАВНА СЛУЖБА ІНТЕЛЕКТУАЛЬНОЇ ВЛАСНОСТІ УКРАЇНИ

(12) ОПИС ДО ПАТЕНТУ НА КОРИСНУ МОДЕЛЬ

(21) Номер заявки: u 2014 05343

(22) Дата подання заявки: 19.05.2014

(24) Дата, з якої є чинними права на корисну модель: 27.10.2014

(46) Публікація відомостей про видачу патенту: 27.10.2014, Бюл.№ 20

(72) Винахідник(и):
Самойчук Кирило Олегович (UA),
Ковальов Олександр Олександрович (UA),
Ялпачик Федір Юхимович (UA)

(73) Власник(и):
ТАВРІЙСЬКИЙ ДЕРЖАВНИЙ АГРОТЕХНОЛОГІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ,
пр. Б. Хмельницького, 18, м. Мелітополь, Запорізька обл., 72312 (UA)

(54) СПОСІБ ГОМОГЕНІЗАЦІЇ ТА НОРМАЛІЗАЦІЇ МОЛОКА

(57) Реферат:

Спосіб гомогенізації та нормалізації молока, при якому вершки подаються по каналах, які виконані в місцях найбільшого звуження центрального каналу пристрою.

UA 94048 U

Патент на корисну модель № 106522

УКРАЇНА

ПАТЕНТ

НА КОРИСНУ МОДЕЛЬ

№ 106522

СТРУМИННИЙ ГОМОГЕНІЗАТОР МОЛОКА З РОЗДІЛЬНОЮ ПОДАЧЕЮ ВЕРШКІВ

Видано відповідно до Закону України "Про охорону прав на винаходи і корисні моделі".

Зареєстровано в Державному реєстрі патентів України на корисні моделі **25.04.2016.**

В.о. Голови Державної служби інтелектуальної власності України А.А.Малиш

Державна служба інтелектуальної власності України
Ідентифікаційний код 37552556
№1

УКРАЇНА

(19) UA (11) 106522 (13) U

(51) МПК
A01J 11/16 (2006.01)

ДЕРЖАВНА СЛУЖБА ІНТЕЛЕКТУАЛЬНОЇ ВЛАСНОСТІ УКРАЇНИ

(12) ОПИС ДО ПАТЕНТУ НА КОРИСНУ МОДЕЛЬ

(21) Номер заявки: **u 2015 11244**

(22) Дата подання заявки: **16.11.2015**

(24) Дата, з якої є чинними права на корисну модель: **25.04.2016**

(46) Публікація відомостей про видачу патенту: **25.04.2016, Бюл.№ 8**

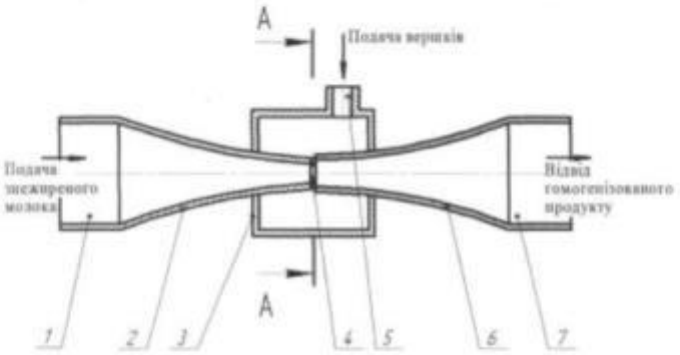
(72) Винахідник(и):
Самойчук Кирило Олегович (UA),
Дейниченко Григорій Вікторович (UA),
Ковальов Олександр Олександрович (UA)

(73) Власник(и):
ТАВРІЙСЬКИЙ ДЕРЖАВНИЙ АГРОТЕХНОЛОГІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ,
пр. Б. Хмельницького, 18, м. Мелітополь, Запорізька обл., 72310 (UA)

(54) СТРУМИННИЙ ГОМОГЕНІЗАТОР МОЛОКА З РОЗДІЛЬНОЮ ПОДАЧЕЮ ВЕРШКІВ

(57) Реферат:

Струминний гомогенізатор молока з роздільною подачею вершків містить корпус з центральним каналом, в місці найбільшого звуження якого розташовані канали для ежектування вершків. Корпус виконано з конфузора і дифузора, між малими діаметрами яких утворені щілинні канали, причому менший діаметр дифузора більший за менший діаметр конфузора.



Фіг. 1

UA 106522 U

Патент на корисну модель № 122548

УКРАЇНА

ПАТЕНТ

НА КОРИСНУ МОДЕЛЬ

№ 122548

СТРУМИННИЙ ГОМОГЕНІЗАТОР МОЛОКА З РОЗДІЛЬНОЮ ПОДАЧЕЮ ВЕРШКІВ

Видано відповідно до Закону України "Про охорону прав на винаходи і корисні моделі".

Зареєстровано в Державному реєстрі патентів України на корисні моделі **10.01.2018.**

Заступник міністра економічного розвитку і торгівлі України М.І. Тітарчук

МІНІСТЕРСТВО ЕКОНОМІЧНОГО РОЗВИТКУ І ТОРГІВЛІ УКРАЇНИ ІДЕНТИФІКАЦІЙНИЙ КОД 37508596

УКРАЇНА

(19) UA (11) 122548 (13) U

(51) МПК
A01J 11/16 (2006.01)
B01F 5/02 (2006.01)

МІНІСТЕРСТВО ЕКОНОМІЧНОГО РОЗВИТКУ І ТОРГІВЛІ УКРАЇНИ

(12) ОПИС ДО ПАТЕНТУ НА КОРИСНУ МОДЕЛЬ

(21) Номер заявки: **u 2017 08561**
(22) Дата подання заявки: **21.08.2017**
(24) Дата, з якої є чинними права на корисну модель: **10.01.2018**
(46) Публікація відомостей про видачу патенту: **10.01.2018, Бюл.№ 1**

(72) Винахідник(и):
Кюрчев Володимир Миколайович (UA),
Самойчук Кирило Олегович (UA),
Ковальов Олександр Олександрович (UA),
Пацький Ігор Юрійович (UA)

(73) Власник(и):
ТАВРІЙСЬКИЙ ДЕРЖАВНИЙ АГРОТЕХНОЛОГІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ,
пр. Б. Хмельницького, 18, м. Мелітополь, Запорізька обл., 72310 (UA)

(54) СТРУМИННИЙ ГОМОГЕНІЗАТОР МОЛОКА З РОЗДІЛЬНОЮ ПОДАЧЕЮ ВЕРШКІВ

(57) Реферат:

Струминний гомогенізатор молока з роздільною подачею вершків містить корпус з направляючими, які утворюють центральний канал, в місці найбільшого звуження якого розташований канал для ежектування вершків. Одна з направляючих встановлена з можливістю поперечних коливань відносно до осі камери і з'єднана зі збудником вібрації.

UA 122548 U

Патент на корисну модель № 131217

УКРАЇНА

ПАТЕНТ

НА КОРИСНУ МОДЕЛЬ

№ 131217

СТРУМИННИЙ ГОМОГЕНІЗАТОР МОЛОКА З ЗУСТРІЧНОЮ ПОДАЧЕЮ ВЕРШКІВ

Видано відповідно до Закону України "Про охорону прав на винаходи і корисні моделі".

Зареєстровано в Державному реєстрі патентів України на корисні моделі **10.01.2019.**

Заступник міністра економічного розвитку і торгівлі України Ю.П. Бровченко

МІНІСТЕРСТВО ЕКОНОМІЧНОГО РОЗВИТКУ І ТОРГІВЛІ УКРАЇНИ ІДЕНТИФІКАЦІЙНИЙ КОД 37508596

УКРАЇНА

(19) UA (11) 131217 (13) U

(51) МПК
A01J 11/16 (2006.01)

МІНІСТЕРСТВО ЕКОНОМІЧНОГО РОЗВИТКУ І ТОРГІВЛІ УКРАЇНИ

(12) ОПИС ДО ПАТЕНТУ НА КОРИСНУ МОДЕЛЬ

(21) Номер заявки: **u 2018 07061**

(22) Дата подання заявки: **23.06.2018**

(24) Дата, з якої є чинними права на корисну модель: **10.01.2019**

(46) Публікація відомостей про видачу патенту: **10.01.2019, Бюл.№ 1**

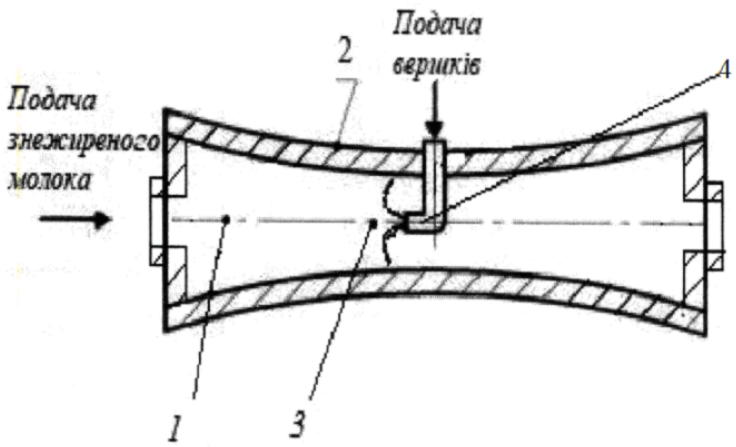
(72) Винахідник(и):
Кюрчев Володимир Миколайович (UA),
Самойчук Кирило Олегович (UA),
Ковальов Олександр Олександрович (UA),
Лебідь Михайло Романович (UA)

(73) Власник(и):
ТАВРІЙСЬКИЙ ДЕРЖАВНИЙ АГРОТЕХНОЛОГІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ,
пр. Б. Хмельницького, 18, м. Мелітополь, Запорізька обл., 72310 (UA)

(54) СТРУМИННИЙ ГОМОГЕНІЗАТОР МОЛОКА З ЗУСТРІЧНОЮ ПОДАЧЕЮ ВЕРШКІВ

(57) Реферат:

Струминний гомогенізатор молока з зустрічною подачею вершків містить корпус з центральним каналом подачі знежиреного молока, в місці найбільшого звуження якого розташований канал для подачі вершків. Канал для подачі вершків виконано зігнутим.



Фіг. 1

UA 131217 U

Патент на корисну модель № 131218

УКРАЇНА

ПАТЕНТ

НА КОРИСНУ МОДЕЛЬ

№ 131218

СТРУМИННИЙ ГОМОГЕНІЗАТОР МОЛОКА З РОЗДІЛЬНОЮ ПОДАЧЕЮ ВЕРШКІВ

Видано відповідно до Закону України "Про охорону прав на винаходи і корисні моделі".

Зареєстровано в Державному реєстрі патентів України на корисні моделі **10.01.2019.**

Заступник міністра економічного розвитку і торгівлі України Ю.П. Бровченко

МІНІСТЕРСТВО ЕКОНОМІЧНОГО РОЗВИТКУ І ТОРГІВЛІ УКРАЇНИ ІДЕНТИФІКАЦІЙНИЙ КОД 37508396

МІНІСТЕРСТВО ЕКОНОМІЧНОГО РОЗВИТКУ І ТОРГІВЛІ УКРАЇНИ

УКРАЇНА (19) **UA** (11) **131218** (13) **U**

(51) МПК
A01J 11/16 (2006.01)

(12) ОПИС ДО ПАТЕНТУ НА КОРИСНУ МОДЕЛЬ

(21) Номер заявки: **u 2018 07062**

(22) Дата подання заявки: **23.06.2018**

(24) Дата, з якої є чинними права на корисну модель: **10.01.2019**

(46) Публікація відомостей про видачу патенту: **10.01.2019, Бюл.№ 1**

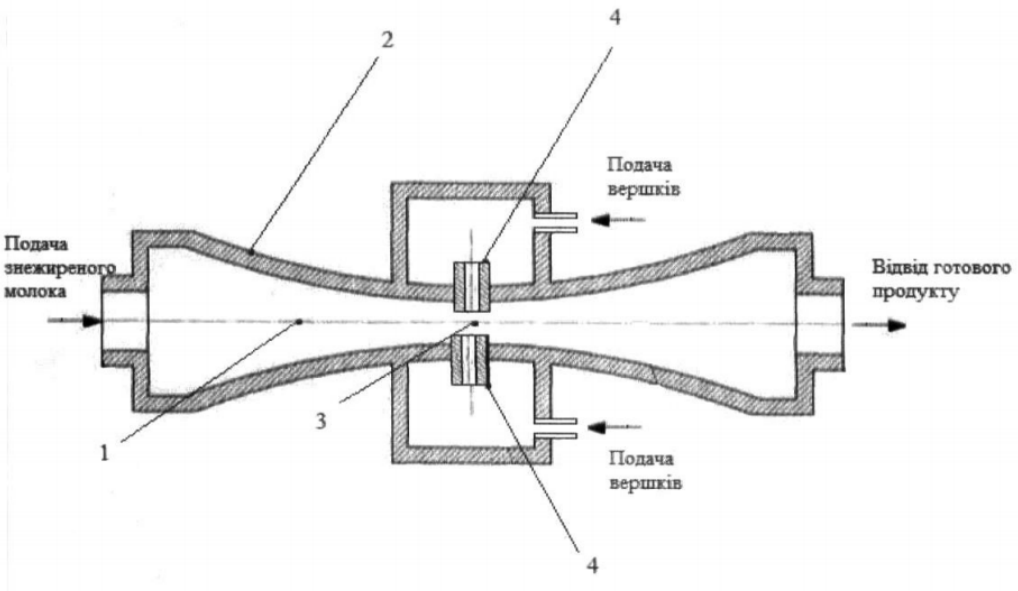
(72) Винахідник(и):
Кюрчев Володимир Миколайович (UA),
Самойчук Кирило Олегович (UA),
Олексієнко Вадим Олександрович (UA),
Ковальов Олександр Олександрович (UA),
Лебідь Михайло Романович (UA)

(73) Власник(и):
ТАВРІЙСЬКИЙ ДЕРЖАВНИЙ АГРОТЕХНОЛОГІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ,
пр. Б. Хмельницького, 18, м. Мелітополь, Запорізька обл., 72310 (UA)

(54) СТРУМИННИЙ ГОМОГЕНІЗАТОР МОЛОКА З РОЗДІЛЬНОЮ ПОДАЧЕЮ ВЕРШКІВ

(57) Реферат:

Струминний гомогенізатор молока з роздільною подачею вершків містить корпус з центральним каналом подачі знежиреного молока, в місці найбільшого звуження якого розташовані канали для подачі вершків, в якому канали для подачі вершків розташовані співвісно один навпроти одного.



UA 131218 U

Додаток Л
(довідковий)

Акт впровадження у виробництво

ЗАТВЕРДЖУЮ:
Виконавчий директор ПП
"Молокозавод-ОЛКОМ"
_____ О. Г. Сємак

АКТ

ВПРОВАДЖЕННЯ В ВИРОБНИЦТВО НАУКОВО-ТЕХНЧНИХ РОЗРОЬОК

Комісія у складі головного інженера ПП "Молокозавод-ОЛКОМ" Радченка Є.В., начальника цеху Артьоменко О.Ю. з однієї сторони і представників Таврійського державного агротехнологічного університету (ТДАТУ): канд. техн. наук., доцента., в.о. зав кафедри Обладнання переробних і харчових виробництв імені професора Ф.Ю. Ялпачика (ОПХВ) Загорко Н.П., канд., техн., наук., доцента кафедри ОПХВ Самойчука К.О і асистента кафедри ОПХВ Ковальова О.О з іншої сторони склали акт про те, що 29 травня 2018р результати наукової роботи Самойчука К.О., Ковальова О.О. було випробувано при гомогенізації молока на ПП "Молокозавод-ОЛКОМ".

Найменування впровадження . Струминний гомогенізатор молока з роздільною подачею вершків згідно формул патентів України на корисні моделі: № 94041 та 94048 Бюл №20 від 27.10.2014., 106522 Бюл №8 від 25.04.2016 та 122548 Бюл № 1 від 10. 01. 2018.

Ким запропонована до впровадження науково-технічна розробка ТДАТУ програми науково-дослідних робіт на 2010–2015 роки підпрограма "Розробка технологій і технічних засобів підвищення ефективності виробництва й переробки молока" державний реєстраційний номер №0111U002551 і програми науково-дослідних робіт на 2016–2020 роки "

Розробка технологій і технічних засобів для переробки і зберігання сільськогосподарської продукції та процесів і обладнання харчових виробництв" державний реєстраційний номер №0116U002730.

Найменування підприємства, де здійснено впровадження

ПП "Молокозавод-ОЛКОМ"

Строки впровадження 2018 р.

Об'єм впровадження 300 т переробленого молока.

Виконані наступні роботи: перевірка основних технічних параметрів струминного гомогенізатора молока з роздільною подачею вершків та оцінка дисперсних показників молочної емульсії після гомогенізації в запропонованому гомогенізаторі і гомогенізаторі клапанного типу.

Економічний ефект від впровадження Використання струминного гомогенізатора молока з роздільною подачею вершків дозволяє досягти зниження питомих витрат на 73% і експлуатаційних на 55% відносно аналогічних показників для клапанних гомогенізаторів молока

Відповідальні виконавці впровадження:

Від ПП "Молокозавод-ОЛКОМ"

Головний інженер

_____ Є.В. Радченко

Начальник цеху

_____ О.Ю. Артьоменко

Від ТДАТУ

к.т.н., доц., в.о зав. кафедрою ОПХВ імені професора Ф.Ю. Ялпачика

_____ Н.П. Загорко

к.т.н., доц., кафедри ОПХВ імені професора Ф.Ю. Ялпачика

_____ К.О. Самойчук

асистент кафедри ОПХВ імені професора Ф.Ю. Ялпачика

_____ О. О. Ковальов

Додаток М
(довідковий)
Сертіфікати учасника конференцій

MINISTRY OF EDUCATION AND SCIENCE OF UKRAINE

Kharkiv State University of Food Technology and Trade

Dmytro Motornyi Tavria State Agrotechnological University

Certificate

of Advanced Training

Hereby, organizing committee of Third International Scientific and Practical Conference **«Innovative Aspects in Food and Hospitality Industry Equipment Development Under Present Conditions»** confirms that

04–06.09.2019

Alexander Kovalev

has undergone the advanced training by his participation in the above mentioned conference

Rector of Kharkiv State University of Food Technology and Trade, Dr.Tech.Sc., Professor **Oleksandr Cherevko**

Rector of Dmytro Motornyi Tavria State Agrotechnological University, Dr.Tech.Sc., Professor **Volodymyr Kyurchev**

MINISTRY OF EDUCATION AND SCIENCE OF UKRAINE

Kharkiv State University of Food Technology and Trade

Tavria State Agrotechnological University

Sertificate
of Advanced Training

Second International Scientific and Practical Conference

Innovative Aspects in Food and Hospitality Industry Equipment Development under Present Conditions

05-07 September 2017

Kharkiv – Melitopol – Kyrylivka, Ukraine

Hereby, organizing committee of Second International Scientific and Practical Conference «Innovative Aspects in Food and Hospitality Industry Equipment Development Under Present Conditions»

confirms that

Oleksandr Koval'ov

has undergone the advanced training by his participation in the above mentioned conference

Rector of Kharkiv State University of Food Technology and Trade, Dr.Tech.Sc., Professor — **Oleksandr Cherevko**

Rector of Tavria State Agrotechnological University, Dr.Tech.Sc., Professor — **Volodymyr Kyurchev**

EDUCATIO
per aspera ad astra

Сертификат

«Научные перспективы XXI века. Достижения и перспективы нового столетия»

Ковалёв Александр Александрович

ОБОСНОВАНИЕ ОСНОВНЫХ ПАРАМЕТРОВ СТРУЙНОГО ГОМОГЕНИЗАТОРА МОЛОКА

Международный Научный Институт "Education" EDUCATIO

Вершинин Б.М., д.э.н., профессор

СЕРТИФІКАТ

Учасника

Ковальов Олександр Олександрович

Міжнародна науково-практична конференція

«СОЦІАЛЬНО-ЕКОНОМІЧНИЙ РОЗВИТОК АГРАРНОЇ СФЕРИ: ІНЖЕНЕРНО-ЕКОНОМІЧНЕ ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ»

присвячена 120-річчю НУБіП України

м. Бережани, Тернопільська обл., Україна
19-20 квітня 2018 року

Директор ВП НУБіП України
"Бережанський агротехнічний інститут",
д.е.н., професор Жибак М.М.

MINISTRY OF EDUCATION AND SCIENCE OF UKRAINE

Tavria State Agrotechnological University

Kharkiv State University of Food Technology and Trade

SERTIFICATE

of Advanced Training

Melitopol – Kyrylivka Ukraine

08–11 September 2015

International Scientific and Practical Conference

Hereby, organizing committee of International Scientific and Practical Conference

«Innovative Aspects in Food and Hospitality Industry Equipment Development Under Present Conditions»

confirms that

Oleksandr Koval'ov

has undergone the advanced training by his participation in the above mentioned conference

Rector of
Tavria State Agrotechnological University,
Dr.Tech.Sc., Professor
Volodymyr Kyurchev

Rector of
Kharkiv State University of Food Technology and Trade,
Dr.Tech.Sc., Professor
Oleksandr Cherevko

Міністерство освіти і науки України
Таврійський державний агротехнологічний університет
імені Дмитра Моторного (Україна)
Білоруський державний аграрний технічний університет (Білорусь)
Варшавський політехнічний університет (Польща)
Економічний університет у Вроцлаві (Польща)
Інститут технологічно-природничий (Польща)
Вроцлавський університет природничих наук (Польща)
Аграрний університет Ім. Гуго Коллонтая (Польща)

Сертифікат

Виданий

Ковальову О.О.

за участь у

І Міжнародній науково-практичній конференції молодих учених «Технічне забезпечення інноваційних технологій в агропромисловому комплексі»

01-26 лютого 2021 р., м. Мелітополь

Голова оргкомітету
д.т.н., професор, член-кореспондент
НААН України, ректор ТДАТУ

В.М. Кюрчев

MINISTRY OF EDUCATION AND SCIENCE OF UKRAINE
Dmytro Motornyi Tavria State Agrotechnological University
Department of Equipment of Processing and Food Production
Department of Technology of Processing and Storage of Agricultural Products
Intercultural Gastronomic Communiti

UHBDP MEDA Canada

CERTIFICATE

OF PARTICIPATION
is hereby granted to

Kovalov Oleksandr

for participating in the International Scientific and Practical Conference
INNOVATIONS IN TECHNOLOGY AND EQUIPMENT OF HOTEL AND RESTAURANT, FOOD AND PROCESSING INDUSTRIES
(8 hours of advanced training, Melitopol, Ukraine, November 24, 2020)

Rector of
Dmytro Motornyi Tavria State Agrotechnological University,
Dr. Tech. Sc., Professor Volodymyr Kyurchev