

**ТАВРІЙСЬКИЙ ДЕРЖАВНИЙ АГРОТЕХНОЛОГІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ  
ІМЕНІ ДМИТРА МОТОРНОГО**



**КОВАЛЬОВ ОЛЕКСАНДР ОЛЕКСАНДРОВИЧ**

УДК 637.134

**ОБГРУНТУВАННЯ ПАРАМЕТРІВ СТРУМИННО-ЩІЛИННОГО  
ГОМОГЕНІЗАТОРА МОЛОКА З РОЗДІЛЬНОЮ ПОДАЧЕЮ ВЕРШКІВ**

Спеціальність 05.05.11 – машини і засоби механізації сільськогосподарського  
виробництва

**АВТОРЕФЕРАТ**  
дисертації на здобуття наукового ступеня  
кандидата технічних наук

Мелітополь – 2021



Дисертацією є рукопис

Робота виконана в Таврійському державному агротехнологічному університеті імені Дмитра Моторного Міністерства освіти і науки України.

Науковий керівник: доктор технічних наук, професор  
**Самойчук Кирило Олегович**,  
Таврійський державний агротехнологічний  
університет імені Дмитра Моторного, завідувач  
кафедри обладнання переробних і харчових  
виробництв імені професора Ф. Ю. Ялпачика.

Офіційні опоненти: доктор технічних наук, старший науковий співробітник  
**Братішко Вячеслав Вячеславович**,  
Національний університет біоресурсів і природокористування  
України, декан механіко-технологічного факультету

кандидат технічних наук, старший науковий співробітник  
**Ткач Віталій Васильович**,  
Національний науковий центр «Інститут механізації та  
електрифікації сільського господарства» НААН України,  
провідний науковий співробітник відділу біотехнічних  
систем в тваринництві та заготівлі кормів.

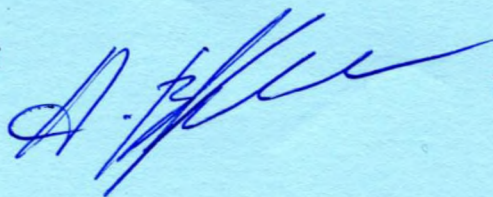
Захист відбудеться 6 травня 2021 року о 13.00 годині на засіданні спеціалізованої вченої ради Д. 18.819.01 Таврійського державного агротехнологічного університету імені Дмитра Моторного за адресою: 72310, Запорізька область, м. Мелітополь, пр-т Б. Хмельницького, 18, аудиторія 1.111.

З дисертацією можна ознайомитись у бібліотеці Таврійського державного агротехнологічного університету імені Дмитра Моторного за адресою: 72310, м. Мелітополь, ТДАТУ, пр-т Б. Хмельницького, 18

Автореферат та дисертація розміщені в мережі Internet за адресою <http://www.tsatu.edu.ua/nauka/n/specializovani-vcheni-radu/specializovana-vchena-rada-d-18-819-01/>

Автореферат розісланий 05 квітня 2021 року.

Вчений секретар спеціалізованої  
вченої ради



Вовк О.Ю.

## ЗАГАЛЬНА ХАРАКТЕРИСТИКА РОБОТИ

**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 не 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 (СЦГРВ), 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 СЦГРВ 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 СЦГРВ за умови високої енергоефективності і отримання дрібнодисперсної емульсії;

3. Розроблено методику розрахунку та промисловий зразок СЦГРВ, питомі енергетичні витрати якого в діапазоні продуктивності СЦГРВ 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 СЦГРВ [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 конференції 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.

## ОСНОВНИЙ ЗМІСТ РОБОТИ

У вступі обґрунтовано актуальність обраної теми дисертаційної роботи, сформульовано мету і задачі дослідження, викладено наукову новизну та практичне значення одержаних результатів, наведено відомості про їх практичну реалізацію.

У першому розділі «Стан питання, мета і задачі дослідження» проведено аналіз літературних джерел, результати якого дозволяють стверджувати про відсутність енергоефективних конструкцій, які здатні забезпечити зменшення середнього діаметра жирових кульок (СЖК) 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 (ДДФЕ). Протягом останніх десятиріч було досліджено процес ДДФЕ 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 емульсії. Такий принцип найкраще реалізується в гомогенізаторах струминного типу при

забезпеченні роздільної подачі знежиреного молока та вершків. До найбільш енергоефективних з досліджених типів відносяться кавітаційний гідродинамічний гомогенізатор, мікрофлюїдизатор, протитечійно–струминний та струминний гомогенізатор молока з роздільною подачею вершків. Однак перелічені типи гомогенізаторів мають недоліки, які полягають у високих значеннях СЖК, високих енерговитратах, підвищеному піноутворенні та високій швидкості облітерації каналів для подачі жирової фази. Тому з метою підвищення енергоефективності ДДФЕ при отриманні продукту з СЖК на рівні технологічно обумовлених значень та одночасному суттєвому зниженні енерговитрат необхідно проведення досліджень СЦГРВ.

У другому розділі «Теоретичні основи процесу струминно–щілинної гомогенізації молока» були проведені аналітичні дослідження процесу гомогенізації і встановлені залежності між параметрами процесу та його якісними і енергетичними характеристиками. Гомогенізуючий вузол СЦГРВ (рис. 1) складається з вхідної частини камери гомогенізації 2, та вихідної частини камери гомогенізації 5, патрубків подачі та відводу готового продукту 1 і 6, ємності з вершками 4 та кільцевої щілини 3. Попередньо знежирене молоко подається крізь патрубок 1. У торцевій поверхні вхідної частини камери гомогенізації 2 з ємності з вершками 4 крізь кільцеву щілину 3 зі швидкістю  $v_v$  подаються вершки. При входженні кільцевого струменя вершків до потоку знежиреного молока зростає швидкість ковзання жирової кульки відносно плазми, що призводить до підвищення критерія Вебера. При перевищенні критичного значення критерія відбувається руйнування жирових кульок – гомогенізація молока. Гомогенізоване молоко відводиться крізь патрубок 6.

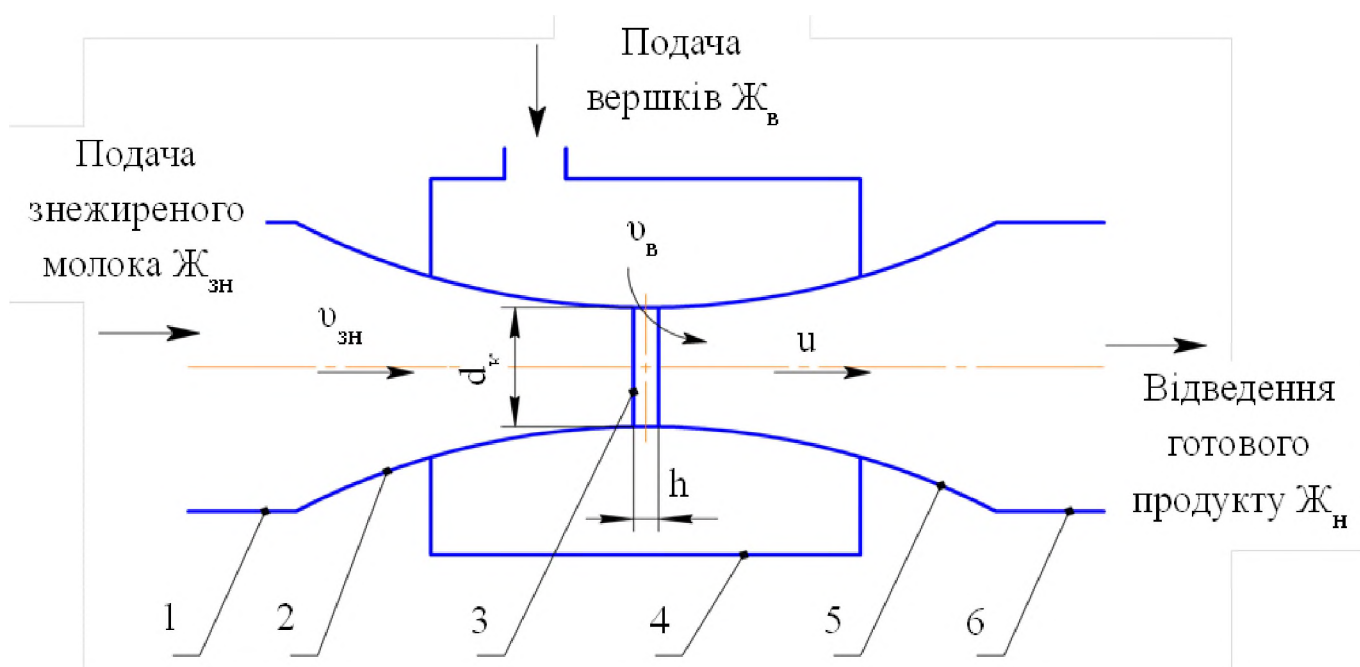


Рис. 1. Конструктивно–технологічна схема гомогенізуючого вузлу струминно–щілинного гомогенізатора молока. 1 – патрубок подачі знежиреного молока; 2 – вхідна частина камери гомогенізації; 3 – торцева частина вхідної частини камери гомогенізації; 4 – ємність з вершками; 5 – вихідна частина камери

гомогенізації;  $b$  – патрубок відведення гомогенізованого молока,  $v_{zn}$  – швидкість подачі знежиреного молока, м/с;  $d_k$  – діаметр конфузору в торцевій частині, м;  $v_e$  – швидкість подачі вершків, м/с;  $h$  – ширина кільцевої щілини, м;  $u$  – швидкість ковзання жирової кульки, м/с;  $J_e$ ,  $J_{zn}$ ,  $J_n$  – жирності відповідно вершків, знежиреного та нормалізованого молока, %.

При включенні жирової кульки до потоку, на неї діють сили, які обумовлюють її витягнення в напрямку його плину та руйнування при перевищенні значень сил Коріоліса, Магнуса, опору, інерції та турбофореzu над силами міжфазного натягу, що обумовлює її руйнування за механізмом Кельвіна–Гельмгольца й Релея Тейлора. Об'єднує ці механізми критерій Вебера. Для його визначення необхідно розрахувати значення швидкості ковзання жирової кульки відносно молочної плазми  $u$ , яке дорівнює різниці між швидкістю руху дисперсійної та дисперсної фаз молока. При подаванні вершків перпендикулярно потоку знежиреного молока  $u$  визначається як

$$u = k_{щ} v_{zn}, \quad (1)$$

де  $k_{щ}$  – коефіцієнт щілинної гомогенізації, який враховує вплив жирності  $J_e$ , швидкості  $v_e$  та ширини кільцевої щілини  $h$  для подачі вершків:  $k_{щ} = f(J_e, h, v_e)$ .

Введений коефіцієнт використовується для оцінки впливу на дисперсність молочної емульсії параметрів кільцевої щілини.

Для СЦГРВ умова руйнування жирових кульок:

$$We = \frac{2\rho_{пл} k_{щ}^2 v_{zn}^2 d_{cp}}{\sigma_{ж-п}} \geq We_k, \quad (2)$$

де  $d_{cp}$  – середній діаметр жирових кульок після диспергування, м;  $We_k$  – критичне значення критерію Вебера;  $\sigma_{ж-п}$  – поверхневий натяг на межі розділу молочної жир–плазма, Н/м;  $\rho_{пл}$  – густина плазми молока, кг/м<sup>3</sup>.

Середній діаметр жирових кульок після гомогенізації в СЦГРВ

$$d_{cp} = \frac{We_k \sigma_{ж-п} \varepsilon_k^2 l_{щ}^4}{2\rho_{пл} k_{щ}^2 \pi^2 Q_{zn}^2}, \quad (3)$$

де  $\varepsilon_k$  – коефіцієнт стиснення потоку знежиреного молока;  $l_{щ}$  – довжина кільцевої щілини, м;  $Q_{zn}$  – подача знежиреного молока, м<sup>3</sup>/с.

Найбільш високі значення швидкості, а отже і показників дисперсності можливо отримати при використанні камери гомогенізації конічної форми для якої коефіцієнт стиснення струменю має мінімальні значення ( $\varepsilon_k = 0,98$ ).

Формули (2) і (3) визначають осередненні значення параметрів процесу гомогенізації. Для отримання миттєвих значень гідродинамічних параметрів було проведено комп'ютерне моделювання в програмному комплексі кінцево-елементного аналізу ANSYS. Його результати свідчать, що необхідні для диспергування умови створюються при тиску  $\Delta p_{zn} = 12$  МПа при довжині щілини  $l_{щ} = 12,5$  мм ( $d_k = 5$  мм). Високі значення швидкості знежиреного молока на рівні 45–50 та 50–55 м/с можуть бути отримані відповідно при  $\Delta p_{zn} = 12$  МПа та  $d_k = 5$  мм або при  $\Delta p_{zn} = 4$  МПа та  $d_k = 4$  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.

При мінімальній ширині щілини 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 дифузору за кільцевою щілиною, що створює необхідні умови для якісного диспергування.

Конструктивні особливості СЦГРВ 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 СЦГРВ продуктивність  $Q_z$  визначається сумою подачі знежиреного молока  $Q_{zn}$  та вершків  $Q_v$ . При цьому продуктивність гомогенізатора можна виразити через подачу знежиреного молока або через подачу вершків за відомою формулою

$$Q_z = Q_{zn} \left( \frac{Ж_v - Ж_{zn}}{Ж_v - Ж_n} \right) = Q_v \left( \frac{Ж_v - Ж_{zn}}{Ж_n - Ж_{zn}} \right). \quad (4)$$

З виразу (4) знайдено залежність, яка пов'язує швидкості знежиреного молока та вершків (5)

$$l_{щ} h v_v = v_{zn} l_{щ}^2 \left( \frac{Ж_n - Ж_{zn}}{Ж_v - Ж_n} \right). \quad (5)$$

Залежності (5) та (2) дозволяють визначити СЖК з урахуванням нормалізації

$$d_{cp} = \frac{We_k \sigma_{ж-н} l_{щ}^2}{2 \rho_{пл} k_{щ}^2 \pi^2 h^2 v_v^2} \left( \frac{Ж_n - Ж_{zn}}{Ж_v - Ж_n} \right)^2. \quad (6)$$

Отримана залежність (7) для визначення потужності СЦГРВ  $P$ , яка складається з потужності насоса подачі вершків  $P_v$  та знежиреного молока  $P_{zn}$

$$P = Q_{zn}^3 \left( \frac{4 \rho_{zn} \pi^2}{\mu_k^2 l_{щ}^4} + \left( \frac{Ж_n - Ж_{zn}}{Ж_v - Ж_n} \right)^2 \frac{\rho_v}{2 \mu_v^2 h^2 l_{щ}^2} \right). \quad (7)$$

Залежність потужності СЦГРВ від подачі знежиреного молока має гіперболічний характер, при цьому потужність насоса подачі вершків при  $Q_{zn} = 1000$  л/год та ширині щілини,  $h = 0,6$  мм майже в 8 разів менше за потужність насоса, що використовується для подавання знежиреного молока. Питомі енерговитрати СЦГРВ, кВт·год/т визначаються з формули (8)

$$E_{пит} = \Delta p_{zn} \left( \delta \cdot \rho_{zn} + \frac{\mu_k^2 \cdot \pi^2 \cdot \rho_v}{2 \cdot h^2 \cdot \mu_v^2 l_{щ}^2} \left( \frac{Ж_n - Ж_{zn}}{Ж_v - Ж_n} \right)^3 \right) / \left[ \delta \cdot \rho_{zn} \cdot \rho_m \cdot \left( \frac{Ж_v - Ж_{zn}}{Ж_v - Ж_n} \right) \right], \quad (8)$$

де  $\mu_k$ ,  $\mu_v$  – коефіцієнти витрат відповідно конфузору та кільцевої щілини;  $\rho_v$ ,  $\rho_{zn}$ ,  $\rho_m$  – густини відповідно вершків, знежиреного молока та молока, кг/м<sup>3</sup>.

Аналіз залежності (8) свідчить, що найменших енерговитрат можна досягти при використанні конфузора і дифузора у формі коноїди. Продуктивність 1000 кг/год можливо забезпечити при тиску подачі знежиреного молока 0,8 МПа, при цьому питомі енерговитрати складають 0,78–0,80 кВт·год/т.

Використання вершків жирністю нижче 20% при виготовленні молока жирністю 2–4% (рис. 2) призводить до суттєвого збільшення питомих витрат енергії що пояснюється збільшенням тиску, необхідного для забезпечення проходження вершків крізь кільцеву щілину для забезпечення заданої вихідної жирності гомогенізованого молока.

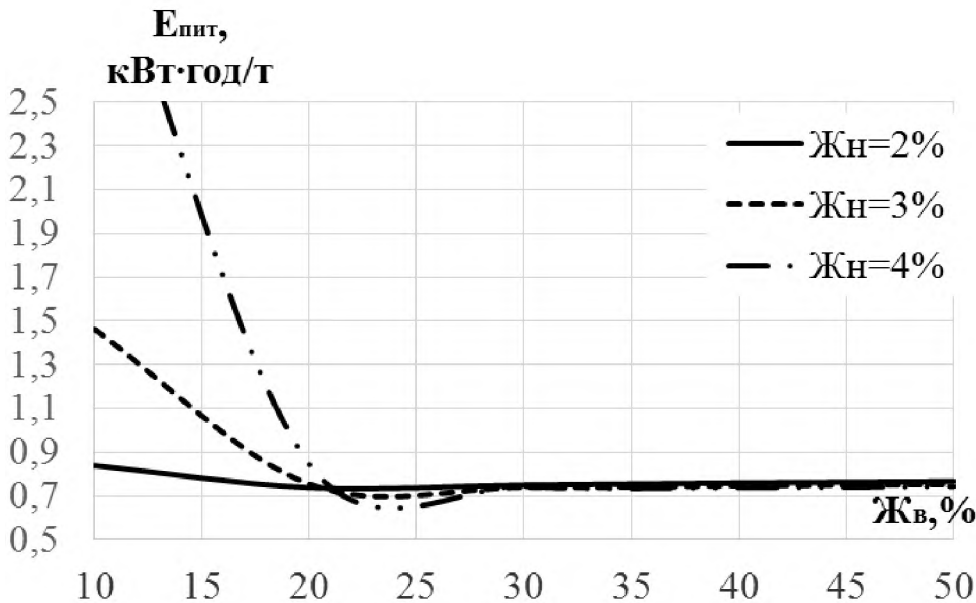


Рис. 2. Залежність питомих енерговитрат  $E_{пит}$  від жирності вершків  $Ж_в$  та нормалізованого молока  $Ж_н$  (при  $l_{щ} = 9,4$  мм;  $Ж_{зн} = 0,05\%$ ;  $h = 0,5$  мм;  $\mu_в = 0,3$ ;  $Q_{зн} = 1000$  кг/год,  $\mu_к = 0,98$ ).

Процес диспергування молока в СЦГРВ має забезпечувати зменшення середнього розміру жирових кульок до рівня 0,8–0,85 мкм при мінімальних енергетичних витратах. Гідравлічні, конструктивні і технологічні параметри гомогенізатора, які відповідають таким вимогам, будемо вважати оптимальними. Для підвищення дисперсності жирової фази при гомогенізації молока в СЦГРВ (зменшення  $d_{cp}$ ) необхідно виконання умов (9)

$$(We_k, \sigma_{ж-н}, \epsilon_k, l_{щ}) \rightarrow \min; (k_{щ}, Q_{зн}) \rightarrow \max. \quad (9)$$

Зниження питомих енерговитрат процесу гомогенізації в СЦГРВ можна досягти при виконанні наступних умов (10)

$$(\mu_k, \mu_в, h, Ж_в) \rightarrow \max; (Q_{зн}, Ж_{н.м}) \rightarrow \min. \quad (10)$$

Аналіз результатів теоретичних досліджень свідчить, що довжина кільцевої щілини в місці найбільшого звуження має складати 8,7–8,9 мм найбільш енергоефективним є використання камери з конічним профілем внутрішніх поверхонь, при цьому енерговитрати диспергування будуть складати близько 0,98 кВт·год/т.

У третьому розділі «Програма та методика теоретичних та експериментальних досліджень» описані методи дослідження, що використовуються для експериментальної перевірки адекватності та уточнення залежностей, отриманих в результаті аналітичних досліджень. Визначені межі варіювання факторів та розроблена програма експериментальних досліджень.

Загальний вигляд лабораторної установки для дослідження процесу струминно-щілинної гомогенізації молока наведено на рис. 4.

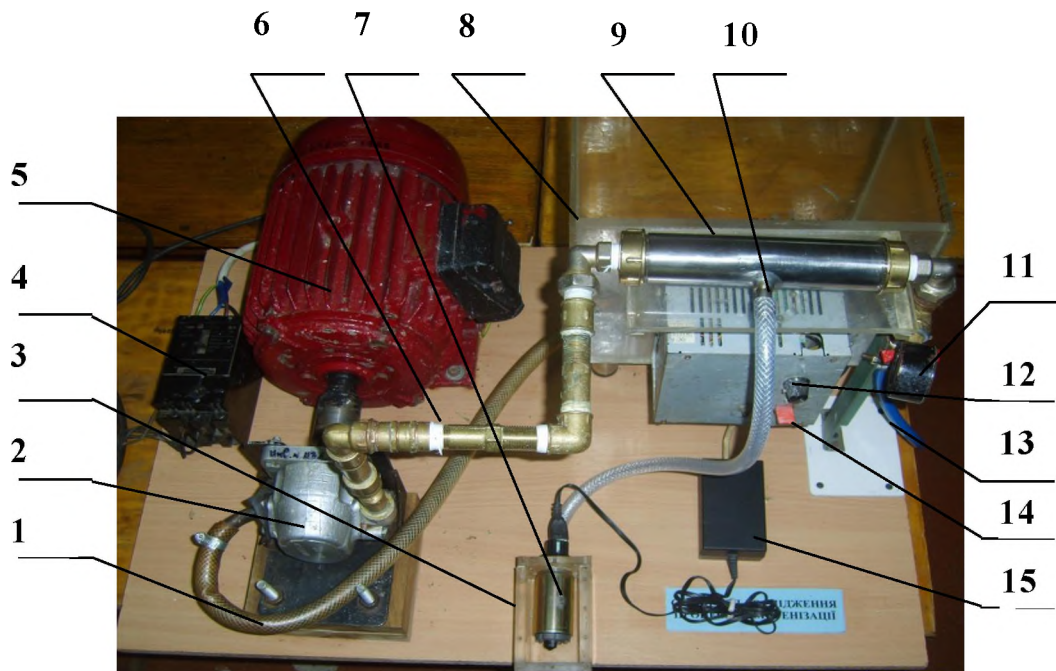


Рис. 4. Лабораторна установка СЩГРВ. 1 – гнучкий трубопровід для подачі знежиреного молока; 2 – насос шестеренний типу НШ; 3 – ємність з вершками; 4 – пакетний вимикач; 5 – електричний трифазний двигун; 6 – трубопровід; 7 – насос подачі дисперсної фази; 8 – ємність із знежиреним молоком; 9 – гомогенізуючий вузол; 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.

Установка (рис. 4), 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. Знежирене молоко насосом 2 крізь трубопроводи 6 подається до гомогенізуючого вузлу 9, де в торцевій частині вхідної частини камери гомогенізації до нього з ємності з вершками 3 за допомогою насосу 7 через гнучкий шланг 10 перпендикулярно до руху потоку знежиреного молока подається струмінь вершків. 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 шланг 14 у спеціальну ємність.

Для дослідів використовували молоко за ДСТУ 2661–94. Проаналізовано існуючі та обґрунтовано вибір методу визначення якості гомогенізації – мікрофотографування з подальшим дослідженням зразків за допомогою цифрової



камери та програми Microsoft Visual Studio. Після отримання дослідних даних виконувалась їх перевірка на наявність грубих похибок дослідження, визначався СЖК та визначався коефіцієнт варіації після ДДФЕ.

У четвертому розділі «Експериментальні дослідження процесу струминно-щілинної гомогенізації молока» було доповнено математичну модель процесу ДДФЕ, здійснено її перевірку на адекватність і проведено обґрунтування раціональних параметрів СЦГРВ. Аналіз залежності, зображеної на графіку (рис. 5) свідчить, що збільшення довжини щілини в межах діапазону, обраного при проведенні експерименту справляє незначний вплив на зміну СЖК в усьому діапазоні швидкостей руху знежиреного молока (30–110 м/с).

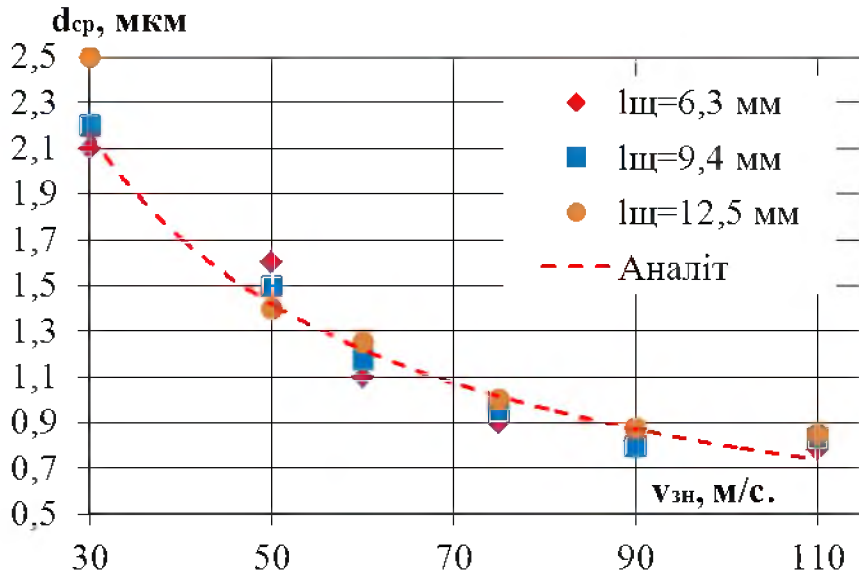


Рис. 5. Графік залежності середнього діаметра жирових кульок після диспергування  $d_{cp}$  від швидкості знежиреного молока  $v_{зн}$  та довжини щілини в місці найбільшого звуження  $l_{щ}$  при  $h=0,6$  мм,  $J_{г}=40\%$  (для теоретичного графіку прийнято  $We_{к}=28$ ,  $\sigma=0,1$ ,  $k_{ш}=0,5$ ).

Найменший СЖК, що знаходиться в межах технологічно обумовлених значень можливо досягти при швидкості подачі знежиреного молока, яка знаходиться в діапазоні 60–90 м/с. Слід зазначити, що при перевищенні швидкості подачі знежиреного молока більше 90–100 м/с, дисперсність майже не змінюється.

Аналіз отриманої залежності, зображеної на рис. 6 свідчить, що зменшення СЖК до технологічно обумовлених показників та нижче можна досягти шляхом підвищення жирності вершків, або зниженням швидкості подачі вершків.

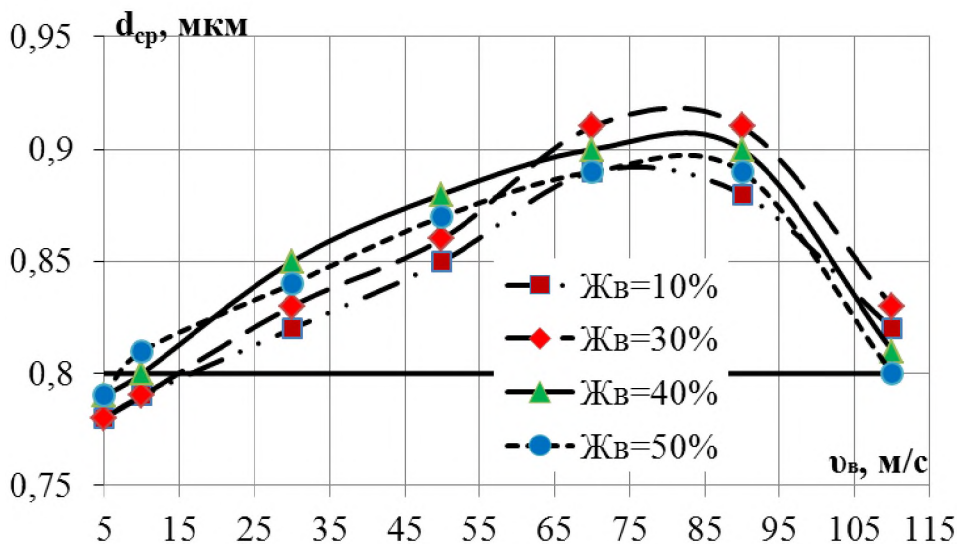


Рис. 6. Графік залежності середнього діаметра жирових кульок  $d_{cp}$  від швидкості вершків  $v_{в}$  і жирності вершків  $J_{в}$ , які додаються при нормалізації молочної емульсії при  $h=0,5$  мм,  $J_{н}=3,5\%$ ,  $l_{щ}=9,4$  мм,  $v_{зн}=60$  м/с.

Значення СЖК після диспергування в межах технологічно обумовлених показників досягається при швидкості подачі вершків  $v_e = 5-40$  м/с та при швидкості, що перевищує 100 м/с. Це пояснюється тим, що в діапазоні значень швидкості подачі вершків  $v_e = 40-100$  м/с забезпечується мінімальна різниця між швидкостями руху дисперсійної та дисперсної фаз емульсії. Високу дисперсність продукту дозволяє отримати режим, який передбачає подачу вершків зі швидкістю  $v_e \geq 100$  м/с. Але при цьому енергетичні витрати на створення потоку високої швидкості будуть високими, отже енергоефективність гомогенізації в СЦГРВ знизиться. Тому найбільш ефективною з точки зору якості гомогенізації та енерговитрат є подача вершків зі швидкістю менше 40 м/с.

Аналіз експериментальної залежності, наведеної на рис. 7 свідчить, що найгірші показники дисперсності забезпечуються при швидкості подачі вершків, яка складає  $v_e = 60$  м/с, що пояснюється низькою різницею між швидкостями знежиреного молока та вершків, що є необхідною умовою подрібнення жирових кульок.

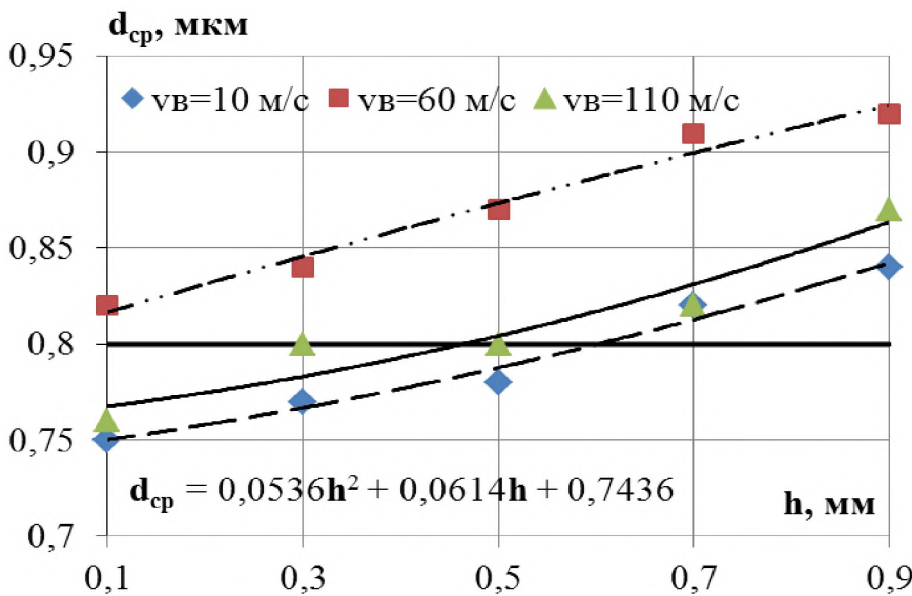


Рис. 7. Графік залежності середнього діаметра жирових кульок після диспергування  $d_{cp}$  від ширини щілини камери гомогенізації в місці найбільшого звуження  $h$  і швидкості вершків  $v_e$  при  $\mathcal{J}_n = 3,5\%$ ,  $l_{ш} = 9,4$  мм,  $v_{zn} = 60$  м/с.

Високі показники дисперсності, які забезпечуються при швидкості подачі вершків  $v_e = 110$  м/с пояснюються перебігом процесу подібно до диспергування в клапанних гомогенізаторах, та є економічно неефективним. Отже, найкращі показники дисперсності можна забезпечити при значеннях швидкості подачі вершків до 10 м/с.

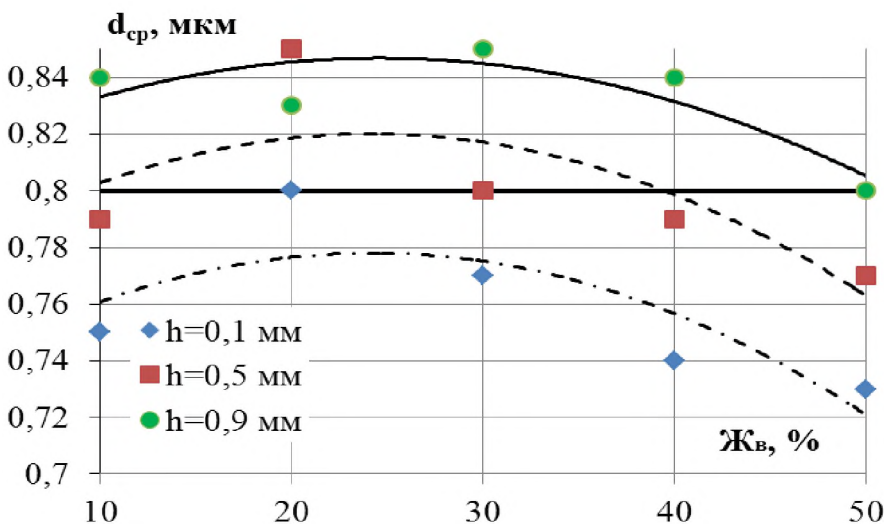


Рис. 8. Графік залежності середнього діаметра жирових кульок  $d_{cp}$  від жирності вершків  $\mathcal{J}_в$ , та ширини щілини камери гомогенізації в місці найбільшого звуження  $h$  при  $\mathcal{J}_n = 3,5\%$ ,  $l_{ш} = 9,4$  мм,  $v_{zn} = 60$  м/с.

Аналіз отриманої залежності (рис. 8) свідчить, що забезпечити зменшення СЖК до технологічно обумовлених показників можливо при використанні камери, що має якомога меншу ширину кільцевої щілини і використання вершків жирність яких складає 30–50%. З графіку на рис. 8 видно, що найкращі показники дисперсності забезпечуються при  $h=0,1$  мм, оскільки висока швидкість ковзання жирових кульок охоплює більшу частину перерізу струменя вершків.

Проведений дисперсний аналіз емульсії свідчить про збільшення СЖК в діапазоні 0,5–1 мкм з 55% для струминного гомогенізатора молока з роздільною подачею вершків до майже 65% у струминно-щілинному гомогенізаторі молока. Молоко до гомогенізації характеризується такими параметрами: середній діаметр жирових кульок  $d_{cp}=2,49$  мкм, дисперсія  $\sigma=1,66$ , коефіцієнт варіації  $V=33\%$ . Для молока після обробки в клапанному гомогенізаторі:  $d_{cp}=0,85$  мкм,  $\sigma=0,51$   $V=18\%$  (при тиску 20 МПа), при цьому після обробки продукту в струминно-щілинному гомогенізаторі  $d_{cp}=0,79$  мкм,  $\sigma=0,48$   $V=15\%$ .

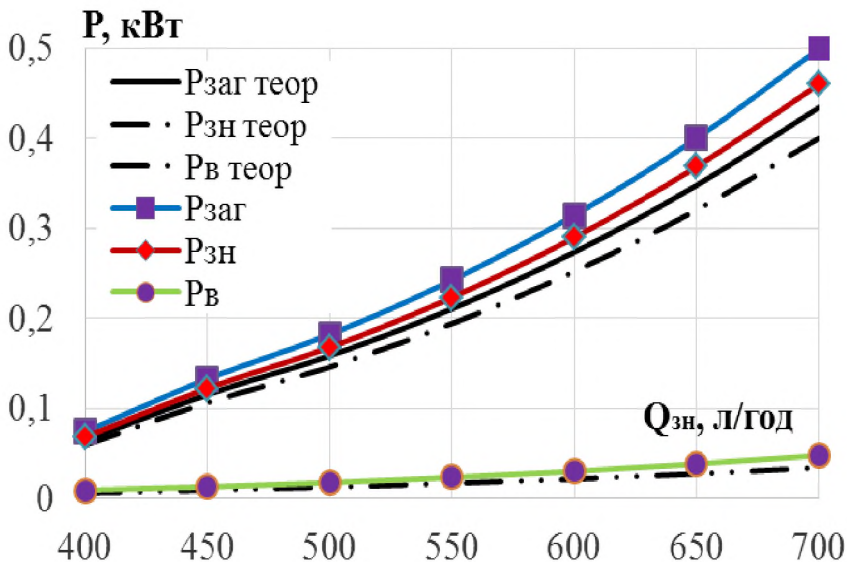


Рис. 9. Графік залежності потужності насосів для подачі знежиреного молока, вершків та сумарної потужності від продуктивності струминно-щілинного гомогенізатора молока ( $J_n=3,5\%$ ;  $J_g=40\%$ ;  $h=0,5$  мм;  $\mu_g=0,25$ ;  $\mu_k=0,98$ ,  $l_{щ}=9,4$  мм).

Аналіз графіку, наведеного на рис. 9 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.

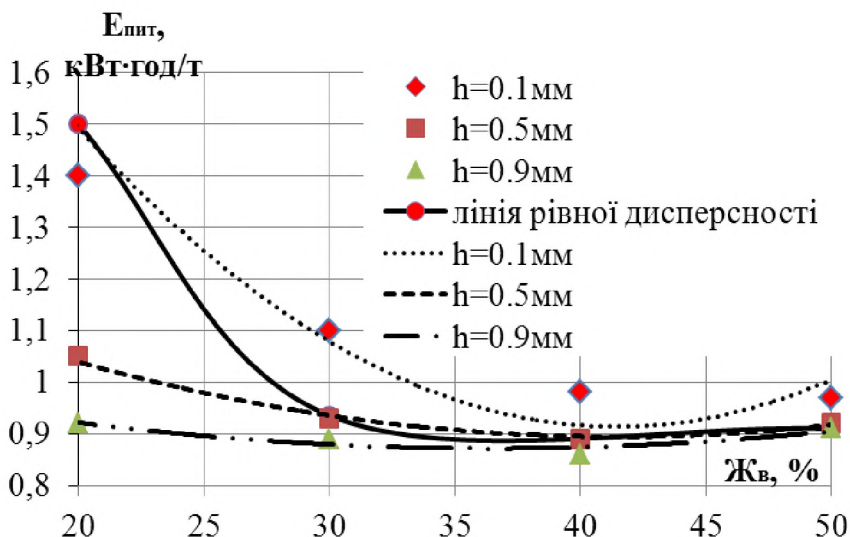


Рис. 10. Оптимізація жирності вершків, що використовуються при нормалізації знежиреного молока до жирності 3,5% та ширини щілини в струминно-щілинному гомогенізаторі молока (при  $J_n=3,5\%$ ;  $\mu_g=0,3$ ;



$\mu_k=0,98, l_{ш}=9,4$  мм;  $Q_{zn}=1000$  кг/год).

Результати проведеної оптимізації (рис. 10) свідчать, що раціональними параметрами СЦГРВ, які забезпечують мінімальні витрати енергії є ширина щілини  $h=0,6\dots 0,8$  мм, використання вершків жирністю 33–43%, при цьому енерговитрати диспергування складають 0,88–0,92 кВт·год/т.

Результати оптимізації швидкості та жирності вершків (рис. 11) свідчать, що забезпечити мінімізацію енерговитрат для отримання молочної емульсії жирністю 3,5%, можливо при використанні вершків жирністю 33–43%, при швидкості подачі вершків, 7–11 м/с. Енерговитрати процесу при цьому складають 0,85–0,87 кВт·год/т гомогенізованого молока.

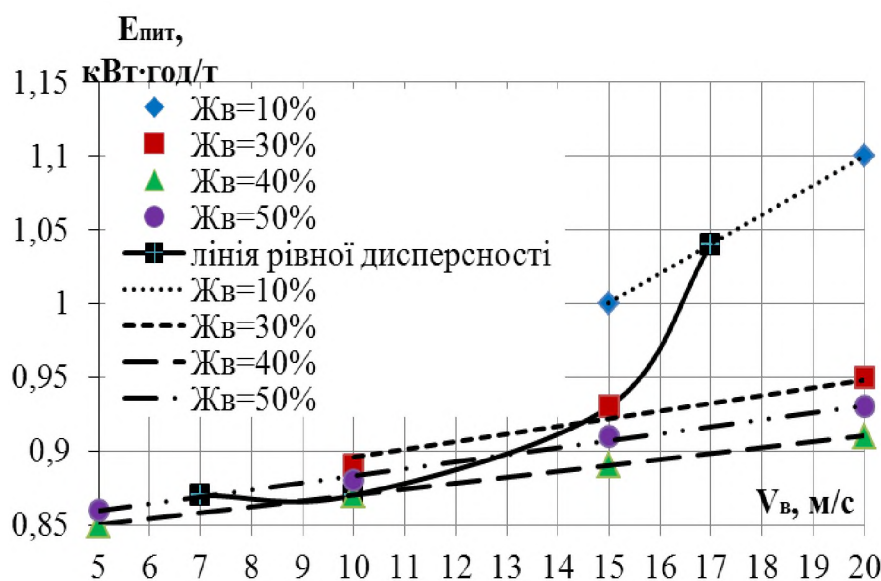


Рис.11. Оптимізація швидкості та жирності вершків, що використовуються при нормалізації в СЦГРВ (при  $J_n=3,5\%$ ;  $h=0,5$  мм;  $\mu_v=0,3$ ;  $\mu_k=0,98, l_{ш}=9,4$  мм;  $Q_{zn}=1000$  кг/год).

Залежності (2), (3), (6) та умова (9) свідчать, що для забезпечення СЖК на рівні технологічно обумовлених показників,

необхідно забезпечити максимальне значення коефіцієнта  $k_{ш}$ . З експериментальних даних представлених на рис. 6–8, були побудовані графіки залежностей  $k_h=f(h)$ ,  $k_J=f(J)$ ,  $k_v=f(v)$ . При цьому провели екстраполяцію експериментальних даних до умов, при яких  $k_{ш}=1$ .

В результаті отримані емпіричні вирази для складових  $k_{ш}$  (11–13):

$$k_h = 3,5 \cdot 10^{-2} h^2 - 9,6 \cdot 10^{-2} h + 0,99, \quad (11)$$

$$k_x = 2 \cdot 10^{-5} x_6^2 - 2,7 \cdot 10^{-3} x_6 + 0,99, \quad (12)$$

$$k_J = 5 \cdot 10^{-5} J_6^2 - 2,2 \cdot 10^{-3} J_6 + 0,64. \quad (13)$$

З урахуванням рівнянь (11)–(13) відома формула для визначення СЖК набуває вигляду:

$$d_{cp} = \frac{We_k \sigma_{ж-н}}{2\rho_{ш} ((3,5 \cdot 10^2 h^2 - 9,6 \cdot 10^2 h + 0,99)(2 \cdot 10^5 u_6^2 - 2,7 \cdot 10^3 u_6 + 0,99))} \times \frac{1}{(5 \cdot 10^{-5} J_6^2 - 2,2 \cdot 10^{-3} J_6 + 0,64)^2 u_{ш}^2} \quad (14)$$

З урахуванням рівняння (14) залежність (6), яка визначає СЖК при одночасному проведенні гомогенізації та нормалізації набуває вигляду (15)

$$d_{cp} = \frac{l_{ин}^2 u_{ин}^2 \left( (35 \cdot 10^2 h^2 - 9,6 \cdot 10^2 h + 0,99) (2 \cdot 10^5 u_6^2 - 27 \cdot 10^3 u_6 + 0,99) \right)^2}{\pi^2 h^2 u_6^2} \times \left( \frac{(5 \cdot 10^{-5} \mathcal{J}_6^2 - 2,2 \cdot 10^{-3} \mathcal{J}_6 + 0,64)}{1} \right) \left( \frac{\mathcal{J}_n - \mathcal{J}_{ин}}{\mathcal{J}_6 - \mathcal{J}_n} \right)^2 \quad (15)$$

При  $\rho_{мл}=1030$  кг/м<sup>3</sup>,  $d_{cp}=0,75$  мкм,  $v_{ин}=60$  м/с (при діаметрі конфузора в місці торцевої частини  $d_k=3,5$  мм),  $\sigma_{ж-н}=0,1$  Н/м, критичне значення критерію Вебера дорівнює 29. Отримана формула (14) дозволяє обирати технологічні, гідравлічні та конструктивні параметри роботи СЦГРВ для забезпечення необхідної величини СЖК молочної емульсії на етапі проектування його промислових зразків.

У п'ятому розділі «Практична реалізація результатів досліджень» на основі теоретичних та експериментальних досліджень запропонована методика розрахунку промислового зразку СЦГРВ. Розроблений промисловий зразок СЦГРВ молока продуктивністю 1000-10000 кг/год зі встановленою потужністю електродвигуна 8 кВт, що дозволяє отримати молоко, жирністю 2–4 % з СЖК на рівні 0,75–0,80 мкм і має питомі енерговитрати до 0,80 кВт·год/т. Методику розрахунку промислового зразку СЦГРВ та конструктивну схему промислового зразку гомогенізатора передано для виготовлення до ПП ВКФ «Харчоналадка» (м. Мелітополь Запорізької обл.). Порівняльна характеристика найбільш перспективних видів гомогенізаторів показує, що питомі витрати енергії гомогенізатору на 8% нижче ніж у струминному гомогенізаторі молока з роздільною подачею вершків та у 10 разів нижче в порівнянні з клапанним гомогенізаторі при мінімальному розмірі часток на рівні технологічно обумовлених СЖК. Спроекований зразок гомогенізатора був впроваджений на МЖК «Південний» (м. Мелітополь Запорізької обл.) замість клапанного гомогенізатора К5-ОГ2А-1.25. Економічний ефект від заміни К5-ОГ2А-1.25 на СЦГРВ складає 238350 тис. 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. При цьому балансова вартість СЦГРВ складає 85 тис. грн.

## ВИСНОВКИ

В дисертаційній роботі викладене нове вирішення науково-технічної задачі – зниженню енергоємності процесу гомогенізації молока як сировини для виготовлення молочних продуктів, шляхом обґрунтування параметрів СЦГРВ 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 СЦГРВ 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 СЦГРВ, 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 СЦГРВ 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 СЦГРВ, 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 ОПУБЛІКОВАНИХ ЗА ТЕМОЮ ДИСЕРТАЦІЇ ПРАЦЬ

##### *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. Вип.11. Т.6. 77–84 с. (*Дисертантом* 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. (*Дисертантом* проведено аналіз методів оцінювання якості гомогенізованого молока, запропоновано використовувати метод мікрофотографування 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. (*Дисертантом* розроблено 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. (*Дисертантом* проведені аналітичні дослідження величин шляху змішування та дотичних напружень).

5. Леженкін О. М., Самойчук К.О., Ковальов О.О., Паляничка Н.О., Верхованцева 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.



(Дисертантом 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. (Дисертантом 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. (Дисертантом обрано діапазон варіювання змінних факторів, проведено 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. (Дисертантом проведені аналітичні дослідження, запропоновані залежності для обчислення середнього діаметра жирових кульок та енерговитрат гомогенізатора).

9. Самойчук К. О., Ковальов О. О., Колодій О. С., Серий 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. (Дисертантом 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. (Дисертантом обґрунтовано діапазон коливання змінних факторів, здійснено планування та реалізація експериментальних досліджень).

11. Самойчук К. О., Серий 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. (Дисертантом розроблено конструктивну схему промислового зразка СЦГРВ).

12. S. Kiurchev, K. Samoichuk, O. Kovalyov, R. Leshchij. Method of calculation of an industrial model of jet-slot milk homogenizer. Тека. *QUARTERLY JOURNAL OF AGRIFOOD INDUSTRY* 2020, Vol. 19, No. 4, 23–30pp. (Дисертантом розроблено методику розрахунку параметрів промислового зразка гомогенізатора).

13. K. Samoichuk, A. Kovalyov, V. Oleksienko, 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. (Дисертантом розроблено структурну схему проведення теоретичних та експериментальних досліджень та структурну схему взаємозв'язку факторів процесу).

14. K. Samoichuk, A. Kovalyov, V. Oleksienko, 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. (Дисертантом здійснено

аналіз існуючих конструкцій гомогенізаторів, проведення експериментів, обробку статистичних даних.

*Наукові 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 Беляєва М.І. Харків. 2013. Ч. I. С. 382–383. *(Дисертантом 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. *(Дисертантом 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. *(Дисертантом 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: материалы междунар. науч.-практ. конф. Минск: БГАТУ, 2019 Ч2. С 188-190. *(Дисертантом 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. *(Дисертантом 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. *(Дисертантом зроблено аналіз існуючих теорій диспергування, розроблено конструкцію струминно–щілинного гомогенізатора).*

21. Самойчук К.О. Ковальов О. О., Лебідь М.Р. 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. (*Дисертантом* проведено оцінку економічної ефективності впровадження та зроблені розрахунки згідно прийнятої методики).

22. Ковалев А.А. Перспективи струйно-щелевого гомогенізатора 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.

*Наукові праці, які додатково відображають наукові результати дисертації:*

23. Струминний гомогенізатор молока з роздільною подачею вершків. Пат. 94041, Україна: МКИ<sup>5</sup> А01J 11/00. № u201405239; заявл. 19.05.2014; опубл. 27.10.2014. Бюл. № 20. (*Дисертантом* обрано прототип та аналог винаходу, зроблено опис особливостей та запропоновано конструкцію зразку).

24. Спосіб гомогенізації та нормалізації молока. Пат. 94048, Україна: МКИ<sup>5</sup> А01J 11/00. № u201405343; заявл. 19.05.2014; опубл. 27.10.2014. Бюл. № 20. 4 с. (*Дисертантом* 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: МКИ<sup>5</sup> А01J 11/16. № u201511244; заявл. 16.11.15; опубл. 25.04.2016. Бюл. № 8. 4 с. (*Дисертантом* обрано прототип та аналог винаходу, зроблено опис особливостей та запропоновано конструкцію зразку).

26. Струминний гомогенізатор молока з роздільною подачею вершків. Пат. 122548, Україна: МКИ<sup>5</sup> А01J 11/16. № u 122548 (13); опубл. 10.01.2018 Бюл. №1. 4 с. (*Дисертантом* прийнято участь у розробці експериментального пристрою).

27. Струминний гомогенізатор молока з зустрічною подачею вершків. Пат. 131217, Україна, МПК А01J 11/16. № u201807061; заявл. 23.06.2018; опубл. 10.01.2019. Бюл. № 1. (*Дисертантом* обрано прототип та аналог винаходу, зроблено опис особливостей та запропоновано конструкцію зразку).

28. Струминний гомогенізатор молока з роздільною подачею вершків. Пат. 131218, Україна, МПК А01J 11/16. № u201807062; заявл. 23.06.2018; опубл. 10.01.2019. Бюл. № 1. (*Дисертантом* обрано прототип та аналог винаходу, зроблено опис особливостей та запропоновано конструкцію зразку).

## АНОТАЦІЯ

**Ковальов О.О. Обґрунтування параметрів струминно-щілинного гомогенізатора молока з роздільною подачею вершків. – Рукопис.**

Дисертація на здобуття наукового ступеня кандидата технічних наук за спеціальністю 05.05.11 – Машини і засоби механізації сільськогосподарського виробництва (13 – механічна інженерія). Таврійський державний агротехнологічний університет імені Дмитра Моторного, Мелітополь, 2021.

Дисертацію присвячено вирішенню наукової задачі зниження витрат енергії на процес гомогенізації молока шляхом визначення раціональних значень технологічних, гідравлічних і конструктивних параметрів малодослідженого струминно-щілинного гомогенізатора молока з роздільною подачею вершків.

В результаті теоретичних та експериментальних досліджень отримані

залежності, що пов'язують основні геометричні, гідравлічні та конструктивні параметри роботи струминно-щілинного гомогенізатора. Отримані критичні значення чисел Вебера, як базового критерію, що пов'язує швидкість знежиреного молока, жирність вершків, діаметр каналу подавання жирової фази, відстань у місці найбільшого звуження і подачу дисперсної фази. Знайдені залежності між продуктивністю гомогенізатора, питомими витратами енергії і середнім розміром жирових кульок після гомогенізації. Розроблено методику розрахунку параметрів струминно-щілинного гомогенізатора молока. Запропоновано промисловий зразок струминно-щілинного гомогенізатора молока. Результати досліджень впроваджені у виробництво.

**Ключові слова:** *молоко, струминна гомогенізація, щілинний тип, диспергування жирової фази, руйнування жирових кульок, роздільна подача вершків, середній діаметр, жирова кулька.*

## АННОТАЦІЯ

**Ковалев А.А. Обоснование параметров струйно-щелевого гомогенизатора молока с раздельной подачей сливок. – Рукопись.**

Диссертация на соискание учёной степени кандидата технических наук по специальности 05.05.11 – Машины и средства механизации сельскохозяйственного производства (13 – механическая инженерия). – Таврический государственный агротехнологический университет имени Дмитрия Моторного, Мелитополь, 2021.

Работа посвящена решению научной задачи снижения энергетических затрат на проведение гомогенизации молока, выполняемой путем оптимизации конструктивных, гидравлических параметров работы струйно-щелевого гомогенизатора молока с раздельной подачей сливок.

Обоснована актуальность темы. На основе анализа механизмов, по которым происходит уменьшение размеров жировых шариков, обозначены направления, позволяющие обеспечить диспергирование жировой фазы до нормативов, определённых в технических условиях при обеспечении существенного снижения энергозатрат процесса. Проведенный анализ позволил выделить в качестве основного фактора гомогенизации разницу скоростей дисперсионной и дисперсной фаз молока. Для проведения струйно-щелевой гомогенизации молока была создана установка, обеспечивающая максимальную разницу скоростей фаз при подаче дисперсной фазы перпендикулярно потоку обезжиренного молока в месте наибольшего сужения камеры гомогенизатора. Сформулирована гипотеза исследований, выполнена постановка задач, изложены основные положения, которые составляют научную новизну и практическое значение работы.

Основой для проведения аналитических исследований являлся критерий Вебера. В результате исследований получены зависимости, связывающие основные параметры работы струйно-щелевого гомогенизатора молока: давление обезжиренного молока, производительность гомогенизатора, удельные затраты энергии, расстояние в месте наибольшего сужения камеры, диаметр канала подачи сливок, жирность сливок с критическими значениями критерия Вебера и средним размером жировых шариков после гомогенизации.

Установлено, что для обеспечения работы гомогенизатора при одновременном



проведении нормализации молока в диапазоне жирности питьевого молока 3,5% и ширине кольцевой щели 0,6–0,8 мм, следует использовать сливки жирностью 33–43%, которые необходимо подавать со скоростью 7–11 м/с. Определено, что оптимальной является коническая форма внутренних поверхностей камеры в месте наибольшего сужения, длина кольцевой щели не оказывает существенного влияния на показатели дисперсности, а оптимальное значение длины кольцевой щели составляет 8,7–8,9 мм. Найдено критическое значения критерия Вебера, который для струйно–щелевой гомогенизации молока составляет 29.

Разработан промышленный образец струйно-щелевого гомогенизатора молока и рекомендации для расчета его технологических и конструктивных параметров и осуществлено внедрение разработок в производство. Сравнительная характеристика перспективных конструкций диспергаторов показывает, что разработанный гомогенизатор обеспечивает уменьшение среднего размера жировых шариков до 0,75–0,80 мкм при многократном снижении удельных энергозатрат. Анализ экономической эффективности подтверждает необходимость внедрения струйно-щелевых гомогенизаторов молока вместо клапанных. Годовая прибыль при этом составляет 238350 грн, а срок окупаемости капиталовложений–0,36 г.

**Ключевые слова:** *молоко, струйная гомогенизация, щелевой тип, диспергирования жировой фазы, разрушение жировых шариков, отдельная подача сливок, средний диаметр, жировой шарик.*

#### ABSTRACT

**Kovalyov. A.A. Substantiation of parameters of jet-slit homogenizer of milk with separate supply of cream. – Manuscript.**

Dissertation on the receipt of scientific degree of candidate of engineering sciences on the specialty 05.05.11 - Machines and mechanization of agricultural production (13 – mechanical engineering). Dmytro Motornyi tavra state agrotechnological university, Melitopol, 2021.

The dissertation is devoted to solving the scientific problem of reducing energy consumption for the process of milk dispersion by determining the rational values of technological, hydraulic and design parameters of the little - studied jet - slit homogenizer of milk with separate cream supply. As a result of theoretical and experimental researches the dependences connecting the basic geometrical, hydraulic and constructive parameters of work of the jet-slit homogenizer are received. Critical values of Weber numbers were obtained as a basic criterion linking the rate of skim milk, fat content of cream, diameter of the fat phase feed channel, distance at the site of greatest narrowing and feed of the dispersed phase. The relationships between the performance of the dispersant, the specific energy consumption and the average size of fat globules after homogenization. A method for calculating the parameters of the jet-slit homogenizer of milk has been developed. An industrial design of a jet-slit homogenizer of milk is proposed. The industrial prototype of jet-mixing homogenizer of milk is offered. The results of researches are applied in industry.

**Keywords:** *milk, jet homogenization, slit type, fat phase dispersion, destruction of fat globules, separate feeding of cream, average diameter, fat globule.*



Підписано до друку «23» березня 2021 р.  
Формат 60x84x1/16. Ум. друк. арк. 1,0. Наклад 100 прим.

---

Віддруковано в поліграфічній компанії «Х-Терра»  
Адреса: 72310, Запорізька обл., м. Мелітополь, вул. Університетська, 55.