

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ  
ХАРКІВСЬКИЙ ДЕРЖАВНИЙ УНІВЕРСИТЕТ ХАРЧУВАННЯ ТА ТОРГІВЛІ



**САМОЙЧУК КИРИЛО ОЛЕГОВИЧ**

УДК 637.134

**РОЗВИТОК НАУКОВИХ ОСНОВ  
ГІДРОДИНАМІЧНОГО ДИСПЕРГУВАННЯ МОЛОЧНИХ ЕМУЛЬСІЙ**

Спеціальність 05.18.12 – процеси та обладнання харчових, мікробіологічних та  
фармацевтичних виробництв

**АВТОРЕФЕРАТ**

дисертації на здобуття наукового ступеня  
доктора технічних наук

Харків – 2018

Дисертацією є рукопис.

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

**Науковий консультант:** доктор технічних наук, професор, заслужений діяч науки і техніки України  
**Дейниченко Григорій Вікторович,**  
Харківський державний університет харчування та торгівлі, завідувач кафедри устаткування харчової і готельної індустрії ім. М.І. Беляєва.

**Офіційні опоненти:** доктор технічних наук, професор  
**Паламарчук Ігор Павлович,**  
Національний університет біоресурсів і природокористування України, професор кафедри процесів і обладнання переробки продукції АПК;

доктор технічних наук, доцент  
**Литвиненко Олександр Анатолійович,**  
Національний університет харчових технологій, професор кафедри машинобудування, стандартизації та сертифікації обладнання;

доктор технічних наук, професор  
**Вітенько Тетяна Миколаївна,**  
Тернопільський національний технічний університет імені Івана Пулюя, завідувач кафедри обладнання харчових технологій.

Захист дисертації відбудеться «5» грудня 2018 р. об 11<sup>00</sup> на засіданні спеціалізованої вченої ради Д 64.088.01 Харківського державного університету харчування та торгівлі за адресою: вул. Клочківська, 333, м. Харків, 61051.

Із дисертацією можна ознайомитись у бібліотеці Харківського державного університету харчування та торгівлі за адресою: вул. Клочківська, 333, м. Харків, 61051.

Автореферат розіслано «5» листопада 2018 р.

Учений секретар спеціалізованої вченої ради



В.М. Онищенко

## ЗАГАЛЬНА ХАРАКТЕРИСТИКА РОБОТИ

**Актуальність теми.** На сьогодні виробництво молока і молокопродуктів в Україні є одним із найбільш перспективних напрямів розвитку в аграрному секторі, а молоко в структурі валового продукту сільського господарства держави займає другу позицію. Активно відбувається диверсифікація географії експорту молочних продуктів. Урядом країни одним із пріоритетних напрямів розвитку в 2018 році обрано нарощування об'єму виробництва молока. Тому молочна галузь на сучасному етапі є однією із провідних у структурі харчової індустрії України, а виробництво молока стало невід'ємною складовою забезпечення національної продовольчої безпеки держави. Незважаючи на це, виробництво молочної продукції залишається на низькому рівні, а виробничі потужності молокопереробних підприємств країни задіяні лише на 30–40%, що викликано нестачею як внутрішнього так і зовнішніх ринків збуту молочної продукції. Для підвищення об'ємів її продажу в сучасних умовах високої конкуренції необхідне зниження собівартості виробництва шляхом використання енергоефективних процесів і технологій. Ця ситуація створює проблему харчової промисловості України, яка полягає в недостатній техніко-технологічній ефективності виробництва питного молока та молочних продуктів, що значною мірою обумовлено низькою енергоефективністю технологічних процесів їх промислового виробництва.

Одним з найбільш енерговитратних процесів переважної більшості технологічних схем виробництва молока та молочних продуктів є гомогенізація. Питоме енергоспоживання найбільш поширених – клапанних гомогенізаторів – сягає 7–8 кВт·год/т і є найбільшим серед обладнання для механічної обробки молока. Розрахунки показують, що при зниженні питомої енергоємності до 1,5–2 кВт·год/т, при об'ємах виробництва молочної продукції в Україні на рівні минулого року, економія лише електроенергії складе не менше 19 млн грн. Тому вирішення проблеми високих енерговитрат процесу гомогенізації в сучасних реаліях зростання цін на енергоносії шляхом підвищення ефективності диспергування молочного жиру відрізняється високою актуальністю.

При аналізі наукових робіт щодо диспергування жирової фази молока вчених Н.В. Барановського, В.В. Вайткуса, В.Я. Грановського, А.А. Долинського, М.М. Ліпатова, Є.В. Нужи́на, М.М. Орешіної, Є.О. Фіалкової, F. Innings, T. Glawdel, C. Liu, Y. Lu, C. Trägårdh та інших було визначено більше 7 основних гіпотез гомогенізації та більше 12 можливих механізмів руйнування жирових часток, переважна частина яких суперечать і протиставляються одна одній. На сьогоднішній час відсутні узагальнюючі теорії, механізми та методики розрахунку гомогенізаторів різних конструкцій на задану міру дисперсності, а існуючі отримані в основному емпіричним шляхом, не є універсальними і використовуються лише для конструктивних рішень певного типу. Тому науково-технічна проблема полягає в недостатньому розвитку науково-теоретичних основ гідродинамічного диспергування жирової фази молока. Розв'язання цієї проблеми дозволить розробити гомогенізатори з

високою енергетичною ефективністю, використання яких призведе до зниження собівартості виробництва питного молока та молочних продуктів, які виробляються із використанням гомогенізації.

**Зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами.** Робота проводилась у рамках наукових досліджень кафедри обладнання переробних і харчових виробництв імені професора Ф.Ю. Ялпачика Таврійського державного агротехнологічного університету відповідно до програм науково-дослідних робіт на 2011–2015 рр. «Розробка наукових основ систем технологій і технічних засобів для забезпечення продовольчої безпеки Південного регіону України» (тема 1.6 «Розробка технологій і технічних засобів для переробки і зберігання сільськогосподарської продукції», № 0107U008964) та на 2016–2020 рр. «Розробка технологій і технічних засобів для переробки і зберігання сільськогосподарської продукції та процесів і обладнання харчових виробництв» (тема 3 «Підвищення ефективності процесів та обладнання для диспергування та гомогенізації харчових емульсій і змішування рідких компонентів», № 0116U002729).

**Концептуальна гіпотеза роботи** пролягає у розвитку теорії гідродинамічного диспергування молочної емульсії, що ґрунтується на створенні відносної швидкості дисперсної та дисперсійної фаз та зв'язку цього чинника з прискоренням руху потоку емульсії. Оптимізація процесу диспергування з метою підвищення прискорення потоку емульсії при використанні знакозмінних пульсацій, накладання механічних коливань, створення умов для виникнення резонансних явищ та оптимізації кратності обробки продукта та відносної швидкості фаз емульсії при реалізації способу подачі жирової фази у потік знежиреного молока дозволить підвищити енергоефективність гомогенізаторів молока.

**Мета і задачі дослідження.** Метою роботи є розвиток наукових основ гідродинамічного диспергування жирової фази молочної емульсії для зниження енерговитрат процесу гомогенізації молока. Для досягнення поставленої мети були поставлені та вирішені такі задачі дослідження:

- провести аналіз конструктивних особливостей гомогенізаторів емульсій, гіпотез і теорій гомогенізації, механізмів руйнування крапель, переважних гідродинамічних явищ, які призводять до руйнування жирових кульок молока та методик розрахунку гомогенізаторів, визначити методи інтенсифікації процесу диспергування жирової фази молочної емульсії та встановити узагальнюючі показники підвищення ефективності цього процесу та відповідні енергоефективні конструктивні рішення гомогенізаторів;

- розробити математичну модель диспергування жирової фази молочної емульсії, що пов'язує відносну швидкість дисперсної та дисперсійної фаз з прискоренням руху та дисперсністю молочної емульсії;

- обґрунтувати узагальнюючий показник для кількісної характеристики впливу додаткових умов ефективності процесу диспергування жирової фази молочної емульсії на її дисперсність;

- розробити математичні моделі гідродинамічного диспергування жирової фази молочної емульсії, які пов'язують технологічні, конструктивні,

кінематичні, режимні та гідравлічні параметри з енергетичними та якісними показниками процесу диспергування в струминному та пульсаційних гомогенізаторах молока, здійснити експериментальну перевірку та уточнення розроблених математичних моделей;

– встановити енергоефективні (при забезпеченні необхідних дисперсних показників) параметри та режими роботи струминного та пульсаційних гомогенізаторів молока;

– розробити методики та рекомендації для розрахунку й обґрунтувати конструктивні рішення промислових зразків струминного та пульсаційних гомогенізаторів молока;

– здійснити заходи щодо впровадження результатів досліджень у виробництво і оцінити техніко-економічну ефективність використання розроблених гомогенізаторів молока.

**Об'єктом дослідження** є процес гідродинамічного диспергування молочної емульсії.

**Предметом дослідження** є технологічні, конструктивні, кінематичні та гідродинамічні параметри гомогенізаторів у взаємозв'язку з енергетичними та якісними показниками процесу диспергування молочної емульсії.

**Методи дослідження.** Теоретичні залежності параметрів диспергування визначались за допомогою класичних залежностей гідравліки та механіки, теорії дискретно-імпульсного введення енергії, коливань консервативних лінійних систем та прикладного програмування COSMOSFloWorks разом з програмою геометричного проектування SolidWorks та програмного комплексу ANSYS для дослідження гідродинаміки у віртуальному середовищі. Для знаходження оптимальних параметрів процесів використано графічний метод двопараметричної та аналітичні методи локальної оптимізації. Відбір проб, фізико-хімічні та органолептичні показники молока визначалися згідно ДСТУ ISO 11870:2007, ДСТУ ISO 488:2007, ДСТУ 8553:2015, ДСТУ ISO 707:2002, ISO 5538:2004. Дисперсні характеристики жирової фази молочної емульсії визначали методом оптичної мікроскопії з використанням цифрової камери. Для аналізу зображень використано програмний модуль, який реалізовано в середовищі Microsoft Visual Studio із застосуванням набору бібліотек OpenCV Sharp. Ефективність гомогенізації визначали методом центрифугування. Експериментальні дані обробляли за допомогою методів математичної статистики з використанням табличного процесора Microsoft Excel та програмного забезпечення Mathcad.

**Наукова новизна одержаних результатів.**

*Вперше:*

– розроблено теорію гідродинамічного диспергування молочної емульсії, яка ґрунтується на кореляції прискорення руху потоку емульсії з її відносною швидкістю дисперсної та дисперсійної фаз і критерієм Вебера;

– науково обґрунтовано та запропоновано використання показника «коефіцієнт гомогенізації», який пов'язує прискорення руху емульсії з середнім діаметром жирової частки молочної емульсії і характеризує додаткові гідродинамічні умови процесу диспергування жирової фази молочної емульсії;

– розроблено безперервну математичну функцію для опису процесу зміни площі прохідного перерізу модулятора роторно-пульсаційного апарата (РПА) для умов застосування отворів круглої форми та рівності кількості отворів ротора і статора, що дозволило розробити математичну модель руху рідини у модуляторі пульсаційного апарата з ротором, що вібрує (ПА з ВР);

– визначені умови виникнення бажаних резонансних явищ пульсацій емульсії в модуляторі ПА з ВР, викликаних відцентровим тиском при обертанні та осьовими коливаннями ротора, які призводять до підвищення ефективності диспергування молочної емульсії;

– розроблено математичну модель гомогенізації молока в ПА з ВР, яка пов'язує основні технологічні, конструктивні, кінематичні та енергетичні показники ПА з ВР з дисперсністю жирової емульсії при забезпеченні умов резонансних явищ;

– науково обґрунтовано та запропоновано використання показника «коефіцієнт диспергування» для умов подачі жирової фази молочної емульсії у потік знежиреного молока, визначення якого дозволило встановити критичне значення критерія Вебера для руйнування жирової кульки молока в потоці молочної плазми;

– розроблено математичну модель диспергування жирової фази молока в струминному гомогенізаторі з роздільним подаванням жирової фази (СГРЖФ) з одночасною нормалізацією молока за жирністю.

*Удосконалено:*

– математичну модель диспергування молочної емульсії в ППГ шляхом врахування кратності проходження емульсії крізь отвори поршня та впливу цього параметру на дисперсні та енергетичні показники диспергування;

– теорію гідродинамічного диспергування струминних гомогенізаторів при подачі струменя вершків у потік знежиреного молока врахуванням впливу жирності вершків, діаметра каналу подачі та швидкості струменя вершків.

*Набули подальшого розвитку:*

– уявлення про закономірності диспергування жирової фази молока в умовах руху молочної емульсії з прискоренням;

– математична модель диспергування жирової фази молока при пульсаційній гомогенізації за рахунок аналітично визначеного та експериментально перевіреного на адекватність зв'язку між технологічними, конструктивними, кінематичними та енергетичними показниками пульсаційного поршньового гомогенізатора (ППГ) з дисперсністю жирової емульсії.

**Практичне значення одержаних результатів:**

– визначені значення коефіцієнтів гомогенізації для СГРЖФ, ППГ, ПА з ВР і клапанного гомогенізатора, за допомогою яких можливо прогнозувати ефективність пристроїв для гідродинамічного диспергування молочної емульсії;

– встановлені оптимальні технологічні, конструктивні та кінематичні параметри СГРЖФ, ППГ, і ПА з ВР за умови високої енергоефективності їх роботи;

– розроблено методики розрахунків та промислові зразки СГРЖФ, ППГ і ПА з ВР для отримання дрібнодисперсної молочної емульсії та зниженими питомими енерговитратами;

– розроблено технічну документацію на виготовлення СГРЖФ, ППГ і ПА з ВР, яку передано до впровадження у виробництво в ТОВ «Продмашпроект» (акт впровадження від 21.03.2014) та ПП ВКФ «Харчоналадка» (акти впровадження від 26.04.2018 і 09.05.2018);

– здійснено впровадження у виробництво СГРЖФ, ППГ і ПА з ВР на приватному підприємстві «Молокозавод-ОЛКОМ» (м. Мелітополь Запорізької області, акти впровадження від 09.10.2010 р., 12.04.2016 р. і 12.06.2018 р.) та ТОВ МЖК «Південний» (м. Мелітополь Запорізької області, акт впровадження від 02.07.2018);

– результати наукових досліджень використано в навчальному процесі Таврійського державного агротехнологічного університету (м. Мелітополь Запорізької обл.) при викладанні дисциплін «Технологічне обладнання переробних і харчових виробництв», «Процеси і апарати харчових виробництв», «Технологічне обладнання підприємств з переробки продукції тваринництва» (акти впровадження від 06.11.2015, 12.03.2017, 12.03.2017).

На технічні рішення, запропоновані в дисертаційній роботі, отримано 15 патентів України на корисну модель №№ 66085, 94041, 94048, 98488, 106554, 107458, 106522, 106521, 106533, 106536, 112317, 119871, 121278, 121949, 122548.

**Особистий внесок здобувача.** Докторантом здійснено: аналіз досліджень процесу і встановлення закономірностей руйнування жирових кульок молока; постановку задач досліджень, розробку теорії гомогенізації, що базується на прискоренні потоку емульсії, розробку математичних моделей гомогенізації в струминному, пульсаційному гомогенізаторах і пульсаційному апараті з ротором, що вібрує, планування експериментальних досліджень, узагальнення отриманих результатів, формулювання висновків.

**Апробація результатів дисертації.** Основні положення дисертаційної роботи доповідалися, обговорювалися та були схвалені на: VII Міжнародній науково-практичній конференції «Проблеми харчових технологій і харчування: сучасні виклики і перспективи розвитку» (Донецьк-Святогірськ, 2011 р.), Міжнародній науково-практичній конференції «Состояние, достижения и перспективы переработки, стандартизации и сертификации материалов» (Херсон, 2012 р.), IV–VI Міжнародних науково-практичних конференціях «Інноваційні енерготехнології» (Одеса, 2013, 2015, 2017 рр.), Міжнародній науково-практичній конференції, присвяченій 75-річчю з дня народження ректора університету, д.т.н., проф., чл.-кор. ВАСГНІЛ Беляєва М.І. «Прогресивна техніка та технології харчових виробництв, ресторанного та готельного господарств і торгівлі. Економічна стратегія і перспективи розвитку сфери торгівлі та послуг» (Харків, 2013 р.), VII, XVI Міжнародній науково-практичній конференції «Научные перспективы XXI века. Достижения и перспективы нового столетия» (Новосибірськ, 2014 р.), I і II Міжнародних науково-практичних конференціях «Інноваційні аспекти розвитку обладнання

харчової і готельної індустрії в умовах сучасності» (Мелітополь-Кирилівка, 2015, 2017 рр.), XV, XVI Міжнародних наукових конференціях «Удосконалення процесів і обладнання харчових та хімічних виробництв» (Одеса, 2014, 2016 рр.), Міжнародній науково-практичній конференції «Розвиток харчових виробництв, ресторанного та готельного господарств і торгівлі: проблеми, перспективи, ефективність» (Харків, 2016 р.), V Всеукраїнській науково-практичній конференції «Підвищення ефективності діяльності підприємств харчової та переробної галузей АПК» (Київ, 2016 р.), IV науковій конференції «Фундаментальні та прикладні дослідження у сучасній науці» (Харків, 2016 р.), IV Міжнародній науково-практичній конференції «Перспективи розвитку сучасної науки» (Львів, 2016 р.), Республіканській конференції «Применение безотходных и экологически чистых технологии в пищевой и химической промышленности» (Узбекистан, 2017 р.), Міжнародній науково-практичній конференції, присвяченій 50-річчю заснування Харківського державного університету харчування та торгівлі: «Розвиток харчових виробництв, ресторанного та готельного господарств і торгівлі: проблеми, перспективи, ефективність» (Харків, 2017 р.), Всеукраїнській науково-технічній конференції «Сучасні аспекти розвитку техніки, енергетики та транспорту в АПК» (Вінниця, 2017 р.), VII Міжнародній науково-практичній конференції «Наукові здобутки у вирішенні актуальних проблем виробництва та переробки сировини, стандартизації і безпеки продовольства» (Київ, 2017 р.), Всеукраїнській науково-практичній конференції «Фундаментальна підготовка фахівців у природничо-математичній, технічній, агротехнологічній та економічній галузях» (Мелітополь, 2017 р.), XVI Міжнародній науково-технічній конференції «Вібрації в техніці та технологіях» (Вінниця, 2017 р.), XI Міжнародній науково-практичній конференції «Проблеми конструювання, виробництва та експлуатації сільськогосподарської техніки» (Кропивницький, 2017 р.), Міжнародній науково-практичній інтернет-конференції «Інноваційні технології виробництва та переробки тваринницької продукції» (Вінниця, 2017 р.), Міжнародній науково-практичній конференції «Сучасні методики, інновації та досвід практичного застосування у сфері технічних наук» (Республіка Польща, Люблін, 2017 р.), Міжнародній науково-практичній конференції «Соціально-економічний розвиток аграрної сфери: інженерно-економічне забезпечення» (Бережани, 2018 р.), Міжнародній науково-практичній конференції «The development of technical Sciences: problems and solutions» (Brno, 2018 р.), Міжнародній науково-практичній конференції «Агроекологічні аспекти виробництва та переробки продукції сільського господарства» (Мелітополь-Кирилівка, 2018 р.), Міжнародних науково-практичних конференціях ТДАТУ «Проблеми та перспективи сталого розвитку АПК» (Мелітополь, 2009–2017 рр.) і конференціях професорсько викладацького складу Донецького державного університету економіки і торгівлі імені Михайла Туган-Барановського (Донецьк, 2011, 2012 рр.).

**Публікації.** За матеріалами дисертаційної роботи опубліковано 91 наукова праця, в тому числі: 1 монографія; 43 статті, серед яких 28 – у наукових фахових виданнях України (з них 6 – у виданнях, що включені до міжнародних



наукометричних баз), 4 – у наукових періодичних виданнях інших держав з напрямку, із якого підготовлено дисертацію (з них 2 – у виданнях, що включені до міжнародних наукометричних баз); 15 патентів України на корисну модель; 29 тез доповідей та матеріалів конференцій; 3 навчальних посібника.

**Структура та обсяг дисертації.** Робота складається з анотації, вступу, семи розділів, висновків, списку використаних джерел з 347 найменувань (у тому числі 77 іноземних) та додатків. Основний зміст дисертації становить 308 сторінок друкованого тексту, де розміщено 152 рисунка і 24 таблиці.

## ОСНОВНИЙ ЗМІСТ РОБОТИ

**У вступі** обґрунтована актуальність теми дисертаційної роботи, показаний її зв'язок з науковими темами ТДАТУ, сформульовано концептуальну гіпотезу, мету, задачі, об'єкт і предмет дослідження, визначено наукову новизну та практичне значення одержаних результатів, наведено відомості про їх практичне впровадження, публікації і особистий внесок здобувача, а також заходи щодо апробації матеріалів дисертаційної роботи.

**Перший розділ «Загальні закономірності конструкцій пристроїв для гомогенізації та узагальнення принципів, механізмів і гіпотез диспергування молочного жиру»** містить аналіз гіпотез, механізмів і переважних гідродинамічних параметрів диспергування жирової фази молока, конструкцій і методів розрахунку обладнання для гомогенізації мікроемульсій.

Незважаючи на широке використання процесу гомогенізації в молочній промисловості, існує брак стандартів і нормативів, які регламентують цей процес. На основі літературних даних і технологічної документації, які регламентують необхідний тиск найбільш розповсюджених – клапанних гомогенізаторів, встановлено, що дисперсність молочної емульсії вважається високою при середніх розмірах жирових кульок 0,75–0,85 мкм.

Відмічена значна кількість загальноприйнятих гіпотез і теорій гомогенізації, які є взаємосуперечливими. Останні наукові дані дослідження процесу диспергування жирової фази в клапанних гомогенізаторах підтверджують справедливості турбулентної в'язкісної теорії, за якою руйнування відбувається в результаті дестабілізації Кельвіна-Гельмгольца та Рэлея-Тейлора. Спільними для цих механізмів є створення гідродинамічних умов у зоні руйнування, які сприяють підвищенню відносної швидкості руху дисперсної та дисперсійної фаз та прискорення потоку емульсії.

У результаті узагальнення уявлень процесу диспергування молочної емульсії розробників і дослідників гомогенізаторів встановлені переважні гідродинамічні явища, які призводять до руйнування жирових кульок: турбулентність, градієнт потоку рідини, обтікання жирової кульки і кавітація. Обґрунтовано, що зазначені явища можливо об'єднати такими гідродинамічними факторами як відносна швидкість дисперсної та дисперсійної фаз і прискорення потоку емульсії.

Відмічена відсутність єдиної методики розрахунку гомогенізаторів для отримання заданого ступеня дисперсності. Існуючі методики розрахунку, отримані в основному емпіричним шляхом, не універсальні –

використовуються лише для апаратів певного типу і мають спрощення, які суттєво викривляють результати. На основі узагальнення сучасних методик розрахунку дисперсності встановлені переважні гідродинамічні показники, які визначають процес руйнування жирової кульки молока: відносна швидкість дисперсної та дисперсійної фаз і прискорення руху емульсії. Для тих типів гомогенізаторів, для яких розрахунок відносної швидкості викликає суттєві труднощі (клапанних, струминних, імпульсних, пульсаційних, роторних, відцентрових і міксерів), параметр прискорення руху потоку емульсії є більш універсальним і зручним для використання при визначенні ступеня дисперсності.

Аналіз способів інтенсифікації процесу диспергування молочних емульсій дозволив виділити перспективні конструкції гомогенізаторів з найбільшим потенціалом зниження енерговитрат: СГРЖФ, ППГ і ПА з ВР. Дослідження процесу гомогенізації молочних емульсій у таких типах конструкції не проводились.

У другому розділі «Методика й організація проведення досліджень» розроблено структуру, програму, методичку планування, проведення досліджень та обробки їх результатів. Розроблена структурно-логічна схема етапів досліджень для досягнення поставленої мети дисертаційної роботи, яка включає аналітичні дослідження впливу гідродинамічних умов диспергування молочної емульсії на її дисперсні показники, розробку аналітичних моделей диспергування, експериментальну перевірку адекватності та уточнення отриманих моделей диспергування, створення промислових зразків гомогенізаторів і їх виробничу перевірку.

Для проведення експериментальних досліджень були розроблені лабораторні установки СГРЖФ, ППГ і ПА з ВР.

Основною частиною установки для дослідження процесу диспергування молочної емульсії в СГРЖФ (рис. 1) є камера 4, в якій направляючими 5 формується швидкісний потік знежиреного молока, куди по каналу 11 подаються вершки.

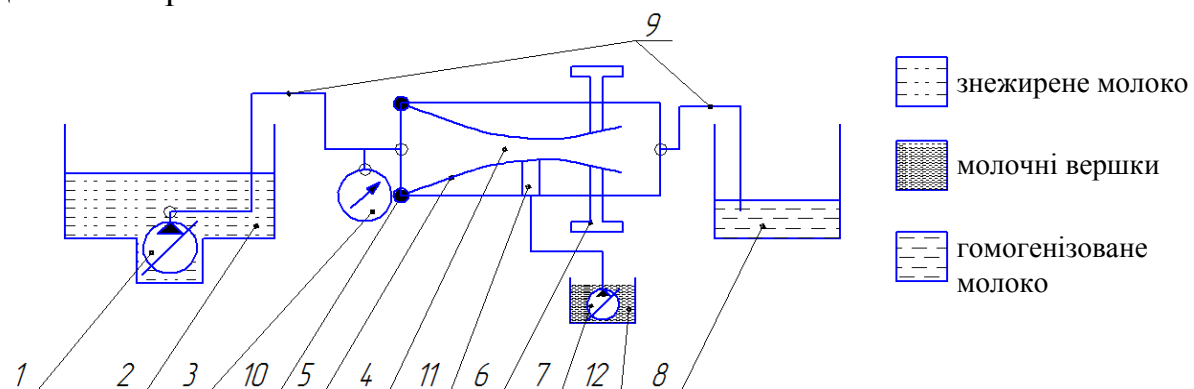


Рис. 1. Схема лабораторної установки для дослідження процесу СГРЖФ: 1 – насос роторного типу; 2 – ємність для знежиреного молока; 3 – манометр; 4 – камера гомогенізації; 5 – направляючі; 6 – регулювальні тяги; 7 – насос подачі жирової фази; 8 – ємність для приймання готового продукту; 9 – трубопроводи; 10 – шарніри; 11 – канал подачі вершків; 12 – ємність для вершків

В установці для проведення експериментальних досліджень гомогенізації в ППГ (рис. 2) необроблене молоко накопичується в ємності 1, звідки насосом 2 подається у робочу камеру 4. Проходячи крізь отвори поршня 5, який здійснює синусоїдальні коливання за рахунок кривошипного механізму 9, молочна емульсія гомогенізується.

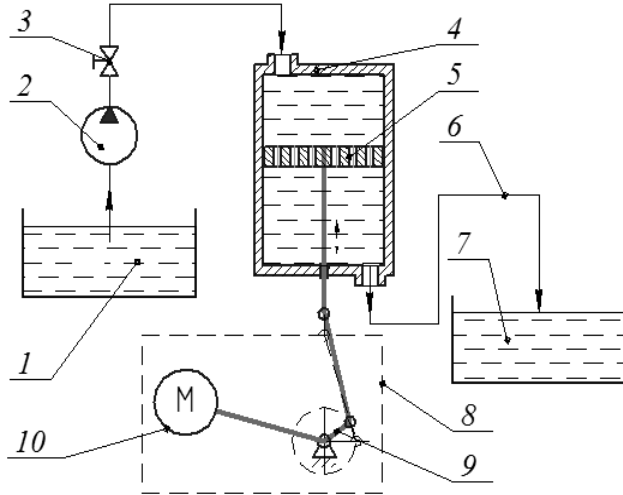


Рис. 2. Схема лабораторної установки для дослідження процесу ППГ: 1, 7 – технологічні ємності відповідно для подачі та збирання молока; 2 – насос; 3 – вентиль; 4 – робоча камера гомогенізатора; 5 – поршень; 6 – трубопроводи; 8 – привід руху робочого органу; 9 – кривошипний механізм з регулятором амплітуди; 10 – електродвигун з електричним регулятором частоти обертання валу

Для проведення експериментальних досліджень використані циліндричні отвори та конічні у вигляді двох конусів, обернених меншими основами назустріч одне одному.

Експериментальна установка ПА з ВР складається з гомогенізуючого вузла 7 (рис. 3), привода вібрації ротора (що включає кривошипний механізм 9 і електродвигун 10) і привода обертання ротора (що включає електродвигун 2 і клинопасову передачу 1).

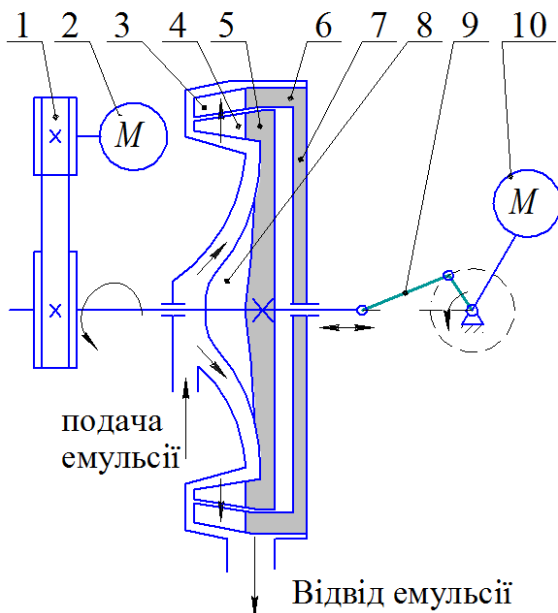


Рис. 3. Схема лабораторної установки для дослідження процесу ПА з ВР:

1 – пасова передача; 2 – електродвигун привода обертання ротора, 3 – отвори статора; 4 – отвори ротора; 5 – ротор; 6 – статор; 7 – гомогенізуючий вузол; 8 – лопатки; 9 – кривошипний механізм привода вібрації ротора; 10 – електродвигун привода вібрації ротора

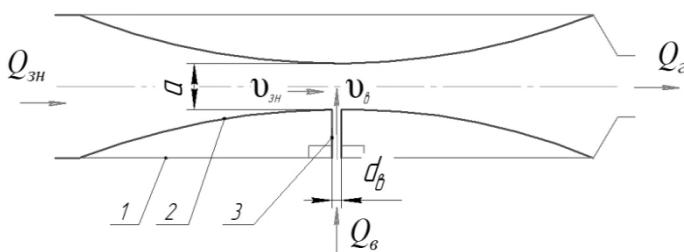
Гомогенізуючий вузол ПА з ВР має лопатки 8 для підвищення насосного ефекту, що дозволяє працювати без зовнішнього насоса. Радіальні отвори ротора 8 та статора 6 формують модулятор пульсаційного апарату, який створює необхідну пульсацію рідини.

Дисперсні показники молочної емульсії визначали комп'ютерним аналізом мікрофотографій проб молока, отриманих за допомогою оптичного мікроскопа та цифрової камери. Обробляли результати у програмному забезпеченні Microsoft Visual Studio та OpenCV Sharp.

При вирішенні оптимізаційних задач критеріями оптимізації обрано отримання середнього діаметра жирових кульок молочної емульсії 0,8 мкм при мінімальних енерговитратах.

У третьому розділі «Розробка математичної моделі гідродинамічного диспергування молочного жиру під впливом відносних швидкостей руху дисперсної та дисперсійної фаз молочної емульсії» на основі критеріальної умови руйнування жирової кульки Вебера обґрунтовані математичні залежності для визначення середнього діаметра дисперсної фази молочної емульсії.

Основним параметром, який визначає дисперсність молочної емульсії після обробки в СГРЖФ (рис. 4), є відносна швидкість дисперсної та



дисперсійної фаз, на яку найбільшим чином впливає швидкість руху знежиреного молока  $v_{зн}$ , швидкість струменя вершків  $v_в$ , діаметр каналу подачі вершків  $d_в$  та їх жирність  $J_в$

Рис. 4. Розрахункова схема СГРЖФ: 1 – камера струминного гомогенізатора молока; 2 – направляючі для формування потоку знежиреного молока; 3 – канал подавання вершків;  $a$  – відстань між направляючими;  $Q_{зн}$ ,  $Q_в$ ,  $Q_с$  – подача знежиреного молока, вершків та продуктивність СГРЖФ, м<sup>3</sup>/с

На основі критерія Вебера аналітично отримана залежність для визначення середнього діаметра жирової кульки після гомогенізації в СГРЖФ:

$$d_k = \frac{We_k \sigma_{ж-п}}{2 \rho_{зн} \cdot (k_c v_{зн})^2}, \quad (1)$$

де  $We_k$  – критичне значення критерія Вебера;  $\sigma_{ж-п}$  – поверхневий натяг на границі «жир-плазма», Н/м;  $\rho_{зн}$  – густина плазми молока, кг/м<sup>3</sup>;  $k_c$  – коефіцієнт струминного диспергування з поперечним подаванням жирової фази.

У формулі (1) добуток  $k_c v_{зн}$  визначає відносну швидкість дисперсної та дисперсійної фаз молочної емульсії. Коефіцієнт  $k_c$  введено для врахування жирності вершків, які подаються в гомогенізатор, діаметра каналу подачі вершків і швидкості струменя вершків на вході в потік знежиреного молока:

$$k_c = k_{сж} k_{сш} k_{сд}, \quad (2)$$

де  $k_{сж}$ ,  $k_{сш}$ ,  $k_{сд}$  – коефіцієнти впливу жирності, швидкості та діаметра каналу подачі вершків відповідно.

Виражаючи значення  $v_{зн}$  через подачу знежиреного молока  $Q_{зн}$  і внутрішній переріз камери гомогенізатора  $s_k$  отримаємо

$$d_k = \frac{We_k \sigma_{жс-н} \varepsilon_k^2 s_k^2}{2 \rho_{зн} k_c^2 Q_{зн}^2}, \quad (3)$$

де  $\varepsilon_k$  – коефіцієнт стиснення потоку для центральної частини камери,  $s_k$  – площа перерізу камери між направляючими, м<sup>2</sup>.

Аналіз миттєвих значень швидкості в СГРЖФ за допомогою програмного комплексу ANSYS (рис. 5) показав, що при підвищенні тиску зона локалізації максимальної швидкості –  $A$ , з координатами  $S_1$  і  $h_1$  (рис. 5 б), переміщується від місця подачі вершків у напрямку руху знежиреного молока. Згідно з даними моделювання, знайдені залежності для визначення координат зони  $A$  (рис. 5 б).

$$S_1 = 0,05 \Delta p_{зн} + 0,6, \quad (4)$$

$$h_1 = 0,02 \Delta p_{зн} + 0,28. \quad (5)$$

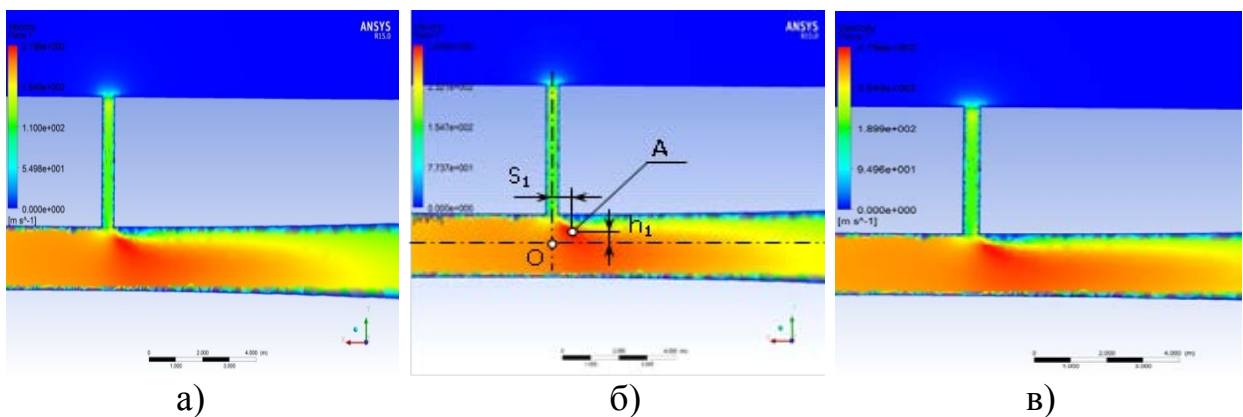


Рис. 5. Поля швидкостей за тиску подавання знежиреного молока  $\Delta p_{зн}$ , МПа: а) 3; б) 6; в) 9 (при  $a=2$  мм і  $d_e=0,5$  мм)

У результаті моделювання встановлено, що пристінний шар, з градієнтом швидкості, значення якого здатне бути визначальним для руйнування жирових кульок молока, займає незначну частину загального діаметра центрального каналу. Тому вплив граничного шару на процес гомогенізації в СГРЖФ незначний. У центральній частині перерізу потоку (крізь яку проходить 85–90% емульсії) градієнт швидкості недостатній для диспергування жирової фази молока. Інтенсивність кавітації та турбулентності також недостатня для руйнування жирових кульок молока до заданого ступеня дисперсності.

У четвертому розділі «Розробка математичної моделі гідродинамічного диспергування молочного жиру під впливом прискорення руху молочної емульсії в умовах багатократної обробки і резонансних явищ» розроблені математичні залежності, які пов'язують прискорення потоку молочної емульсії з її дисперсністю.

Критерій Вебера (а отже, і відносна швидкість дисперсної та дисперсійної фаз) пов'язаний з прискоренням руху молочної емульсії  $a_e$  через інерціальні сили, які спричиняють рух жирової кульки відносно молочної плазми. Шляхом розв'язання рівняння руху жирової кульки в дисперсійному середовищі отримана математична залежність, яка доводить такий взаємозв'язок:

$$a_e = \frac{We_{кр} \sigma_{ж-н} c}{2 \rho_k d_{кmax}^2} \sqrt[3]{\frac{6}{\pi}}, \quad (6)$$

де  $c$  – коефіцієнт опору руху тіла;  $d_{кmax}$  – максимальний діаметр жирової кульки, яка зберігає стійкість у даному потоці, м.

Враховуючи, що розподілення жирових кульок за розмірами підпорядковується логнормальному закону, середній діаметр жирової кульки  $d_k$  можна визначити з залежності:

$$d_k = \sqrt{\frac{We_{кр} \sigma_{ж-н} c}{8 \rho_k a_e} \sqrt[3]{\frac{6}{\pi}}}. \quad (7)$$

Якщо виразити константи для коров'ячого молока формули (7) через коефіцієнт, то отримаємо

$$d_k = K_h / \sqrt{a_e}, \quad (8)$$

де  $K_h$  – коефіцієнт гомогенізації, який пов'язує прискорення руху емульсії з середнім діаметром її жирової частки, м<sup>3/2</sup>/с.

$$K_h = \sqrt{\frac{We_{кр} \sigma_{ж-н} c}{8 \rho_k} \sqrt[3]{\frac{6}{\pi}}}. \quad (9)$$

$K_h$  залежить від структурно–механічних властивостей жирової кульки та її оболонки в плазмі молока та гідродинамічних умов у зоні диспергування (наявності та інтенсивності кавітації, турбулентності та ін.). Для коров'ячого молока визначене розрахункове значення коефіцієнта гомогенізації при  $We_{кр}=14$  для умов однократної обробки за відсутності додаткових гідродинамічних факторів диспергування  $2,4 \cdot 10^{-3}$  м<sup>3/2</sup>/с.

Найбільш розповсюдженими та дослідженими гомогенізаторами є клапанні, для яких отримані теоретичні та емпіричні залежності, які пов'язують їх якісні та конструктивно-технологічні параметри. Одну з таких залежностей – формулу Н.В. Барановського представимо у вигляді:

$$d_k = \frac{5,37 \cdot 10^3}{\sqrt{a_e}} \sqrt{\frac{\varphi_{ш}}{\rho_m L}}, \quad (10)$$

де  $\varphi_{ш}$  – коефіцієнт швидкості,  $L$  – довжина розгонної зони клапанної щілини, м.

Формула (10) показує, що дисперсність емульсії після обробки в клапанному гомогенізаторі можна представити у вигляді функції прискорення руху емульсії в клапанній щілині, що збігається з формулою (8). Для типових умов клапанної щілини  $K_h=1,6 \cdot 10^{-3}$  м<sup>3/2</sup>/с. Це значення менше, ніж розрахункове, визначене за формулою (9), що свідчить про істотний вплив на процес диспергування в клапанному гомогенізаторі турбулентності та кавітації.

В ППГ прискорення потоку молочної емульсії в отворах поршня головним чином визначає амплітуда  $s$ , частота  $n$  коливань поршня, кількість  $N$  та діаметр отворів  $d_{отв}$  (рис. 6).

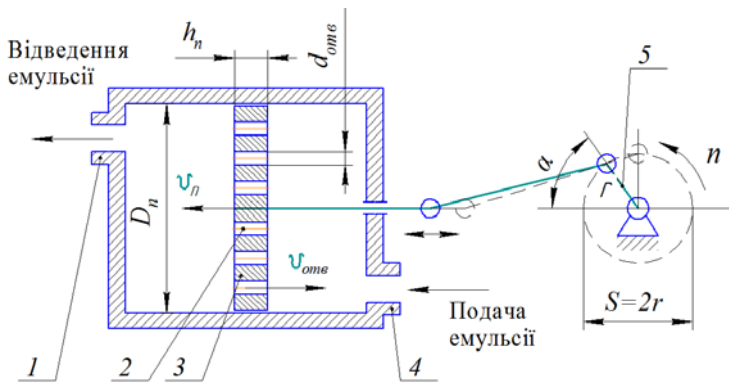


Рис. 6. Розрахункова схема ППГ: 1 – патрубок подачі емульсії; 2 – отвори поршня; 3 – поршень; 4 – патрубок для відведення емульсії; 5 – кривошип.

$v_n$  – швидкість поршня;  $v_{оме}$  – швидкість руху емульсії в

отворах поршня;  $d_{оме}$  – діаметр отворів;  $D_n$  – діаметр поршня;  $r$  – радіус кривошипа;  $\alpha$  – кут повороту кривошипа,  $h_n$  – товщина поршня

На основі рівняння нерозривності потоку рідини та законів руху робочого органа кривошипного механізму отримана залежність прискорення потоку емульсії в отворах поршня ППГ

$$a_e = 4\pi^2 \varphi_{ш} \frac{n^2 r}{K_o}, \quad (11)$$

де  $K_o$  – коефіцієнт живого перетину отворів поршня:  $K_o = N d_{оме}^2 / D_n^2$ .

З формул (8) і (11) отримана залежність, що пов'язує середній діаметр жирової кульки молочної емульсії після гомогенізації з конструктивно-кінематичними показниками ППГ:

$$d_k = \frac{K_h}{\pi n} \sqrt{\frac{K_o}{2\varphi_{ш} s}}. \quad (12)$$

У ППГ подача емульсії  $Q$ , м<sup>3</sup>/с є незалежним параметром, який впливає на кількість проходів молочної емульсії крізь отвори поршня – кратність обробки  $K$ . Було проаналізовано вплив конструктивно-кінематичних показників ППГ і отримана формула для визначення цього параметра:

$$K = \frac{\pi D_n^2 s n}{2Q}. \quad (13)$$

Кратність проходження продукту крізь отвори поршня визначає ймовірне мінімальне прискорення  $a_{min}$  отворах поршня та рівномірність дисперсного складу емульсії. Шляхом аналізу цих параметрів аналітично визначений діапазон мінімальних значень  $K$ , який становить 4–10.

Прискорення руху емульсії в ПА з ВР визначається залежністю швидкості руху емульсії від часу, що в свою чергу залежить від рівняння зміни площі прохідного перерізу модулятора від кута повороту ротора  $S(\varphi)$ . Функцію  $S(\varphi)$  роторно-пульсаційного апарата зазвичай представляють у вигляді кускової функції – набором рівнянь на різних проміжках часу, що підвищує складність математичного опису процесу. Для виконання вимоги створення рівних гідродинамічних умов в отворах ПА з ВР кількість отворів ротора та статора повинна бути рівною  $z_p = z_c = z$ . З аналогічних міркувань  $d_p = d_c$ . (рис. 7).

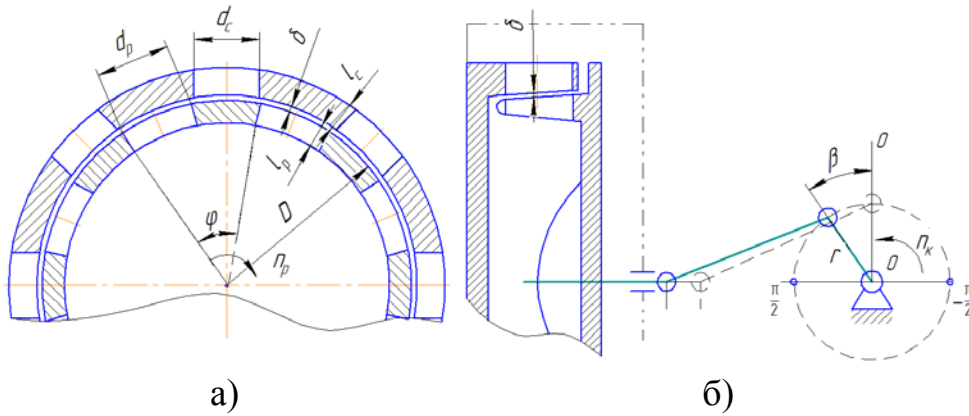


Рис. 7. Розрахункова схема ПА з ВР: а – радіальний переріз, б – осьовий переріз;  $d_p$ ,  $d_c$  діаметри отворів ротора і статора,  $\varphi$ ,  $\beta$  – кути обертання відповідно ротора та кривошипу;  $n_p$ ,  $n_k$  – кутова швидкість обертання ротора і кривошипу;  $l_p$ ,  $\delta$ ,  $l_c$  – довжина ротора, радіальний зазор між ротором та статором, довжина статора;  $D$  – діаметр ротора

З урахуванням цих умов при описі залежності  $S(\varphi)$  в ПА з ВР розроблена безперервна функція, що значно спрощує подальший математичний опис процесу руху рідини у модуляторі апарата:

$$S(\varphi) = \frac{\pi^2 D}{16} \left( \frac{\pi D}{2z} \left( 1 + \sin\left(\varphi z - \frac{\pi}{2}\right) \right) + 8\delta \right). \quad (14)$$

Рух емульсії в отворах модулятора ПА з ВР створюється за рахунок обертального руху ротора з лопатками, в результаті якого утворюється відцентровий тиск в роторі  $v_o''$ , і зворотньо-поступального руху ротора вздовж осі обертання, в результаті якого відбувається виштовхування або всмоктування емульсії  $v_o^6$ . Отримане рівняння сумарної швидкості емульсії в модуляторі ПА з ВР  $v_o$ :

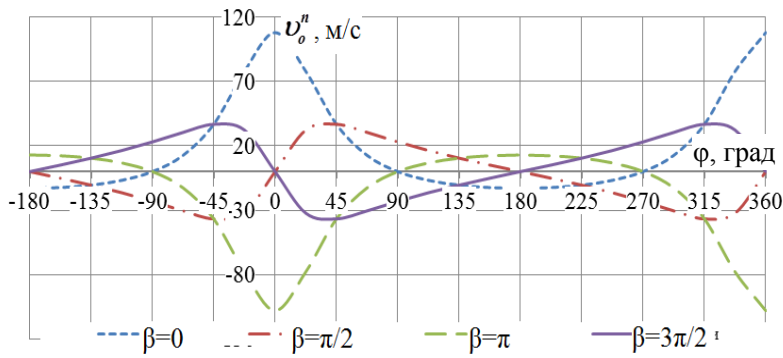
$$v_o = \frac{2 n_k r \cdot D \cos \beta}{\frac{\pi D}{2z} \left( 1 + \sin\left(\varphi z - \frac{\pi}{2}\right) \right) + 8\delta} + \frac{\pi^2 n_p D^2}{120z(l_p + \delta + l_c)} \left\{ \frac{\varphi z}{2\pi} \right\}, \quad (15)$$

де  $\left\{ \frac{\varphi z}{2\pi} \right\}$  – дробова частина числа  $\varphi z / 2\pi$ .

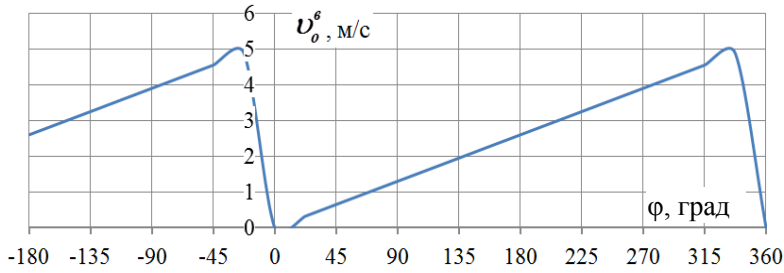
Для підвищення ефективності диспергування частота обертання ротора ПГ з ВР повинна бути синхронізована з частотою обертання кривошипу. Критерієм підвищення ефективності є подібність форми графіків миттєвої швидкості молочної емульсії, що спричинені відцентровим тиском емульсії і рухом емульсії, що спричинений осьовими вібраціями ротора (рис. 8). Така подібність може викликати резонансні явища, наслідком яких є підвищення амплітуди коливань емульсії (а отже, і її прискорення та, як наслідок, ступеня дисперсності) та зниження енерговитрат на процес диспергування.

Синхронізація осьових рухів ротора з положенням отворів модулятора ПГ з ВР визначається двома параметрами: співвідношенням частот обертання ротора і кривошипу та зсувом між кутами  $\beta$  і  $\varphi$ .





а)



б)

Шляхом аналізу характерних варіантів синхронізації коливань емульсії в отворах модулятора знайдені умови подібності характеру зміни швидкостей  $v_o^n$  і  $v_o^e$  (рис. 8), якими є  $\varphi = \beta/z_p$  при  $\beta = 3\pi/2$ .

Рис. 8. Швидкості емульсії: а) – від відцентрової сили  $v_o^e$ ; б) – від коливань ротора  $v_o^n$  для варіанта співвідношення частот  $n_k = n_p/z_p$  для випадків  $\beta=0$ ,  $\beta=\pi/2$ ,  $\beta=\pi$ ,  $\beta=3\pi/2$

Для знайдених умов визначене рівняння сумарної швидкості емульсії в отворах ПА з ВР, диференціюванням за часом якого було знайдено залежність для визначення миттєвого прискорення емульсії  $a_m$ , яка показана графічно на рис. 9.

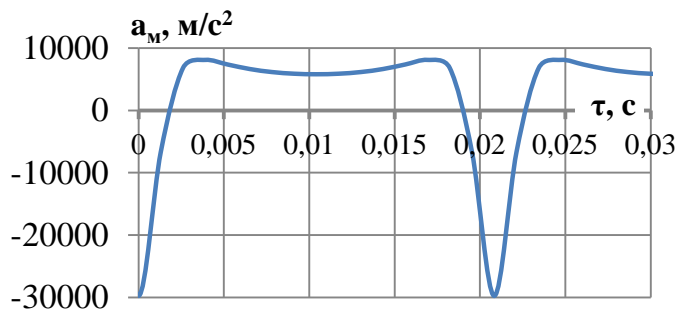


Рис. 9. Залежність миттєвого прискорення рідини  $a_m$  в отворах модулятора від часу  $\tau$  (при  $D=0,15$  м,  $n_k=2880$  об/хв,  $n_p=480$  об/хв,  $r=1$  мм,  $z=6$ ,  $\delta=1$  мм,  $l_p=0,005$  м,  $l_c=0,01$  м)

Для ПА з ВР синхронізація коливальних і обертальних рухів ротора здійснена таким чином, щоб підтримувати значення прискорення на максимальному рівні. У середині циклу при повному відкритті отворів ( $\tau=0,0104$  с) зниження прискорення не перевищує 26%, що свідчить про суттєво вищу рівномірність впливу на жирову фазу молока, ніж у класичному РПА, де кавітаційні явища відбувається лише в кінці циклу закриття отворів модулятора. Середнє прискорення  $a_e$  визначали для умов, що відповідають  $\tau=0,0075-0,0125$  с (рис. 9).

$$a_e = \frac{\pi^3 n_k^2 D^2}{3600 z^2 (l_p + \delta + l_c)} + \frac{n_k^2 \pi^2 r D^2}{30 z (\pi D / 2z + 8\delta)^2}. \quad (16)$$

У результаті аналізу рівняння (16) та (8) визначені умови для максимального подрібнення жирових кульок молока в ПА з ВР:  $z=4$ ,  $(n_k, r, D) \rightarrow \max$  і  $\delta, l_p, l_c \rightarrow \min$ . Діапазон коливання параметрів  $\delta=1$ ,  $l_p, l_c$  невеликий, тому їх вплив на  $a_e$  незначний.

У п'ятому розділі «Аналітичне визначення енерговитрат та оптимізація параметрів роторного, пульсаційного та струминного гомогенізаторів» отримані математичні залежності для розрахунку споживаної потужності та питомих енерговитрат і проведена оптимізація конструктивно-технологічних показників дослідних гомогенізаторів.

Потужність СГРЖФ  $P$  складається з потужності насосів подачі вершків  $P_v$  та знежиреного молока  $P_{zn}$ . З урахуванням нормалізації молока за жирністю, яку дає змогу проводити одночасно з гомогенізацією конструкція СГРЖФ, рівняння сумарної потужності набуває вигляду:

$$P = Q_{zn}^3 \left( \frac{\rho_{zn}}{2s_k^2 \mu_k^2} + \left( \frac{J_{н.м} - J_{zn}}{J_v - J_{н.м}} \right)^2 \frac{\delta \rho_v}{N_k^2 \pi^2 d_v^4 \mu_v^2} \right), \quad (17)$$

де  $J_{н.м}$ ,  $J_{zn}$  – відповідно жирність нормалізованого та знежиреного молока, %;  $\mu_k$ ,  $\mu_v$  – відповідно коефіцієнти витрат камери СГРЖФ і каналу подачі вершків,  $N_k$  – кількість каналів подачі вершків.

З рівняння (17) отримана формула для визначення питомих енерговитрат СГРЖФ:

$$E_{пит} = Q_{zn}^2 \left( \frac{\rho_{zn}}{2s_k^2 \mu_k^2} + \left( \frac{J_{н.м} - J_{zn}}{J_v - J_{н.м}} \right)^2 \frac{\delta \rho_v}{N_k^2 \pi^2 d_v^4 \mu_v^2} \right) / \left( \frac{J_v - J_{zn}}{J_v - J_{н.м}} \right) \rho_m. \quad (18)$$

Звертає на себе увагу різке підвищення питомих енерговитрат при жирності вершків менше 20–30% (рис. 10), яке є наслідком підвищення тиску, необхідного для проходження крізь канал діаметром 0,8 мм вершків для забезпечення заданої жирності молока.

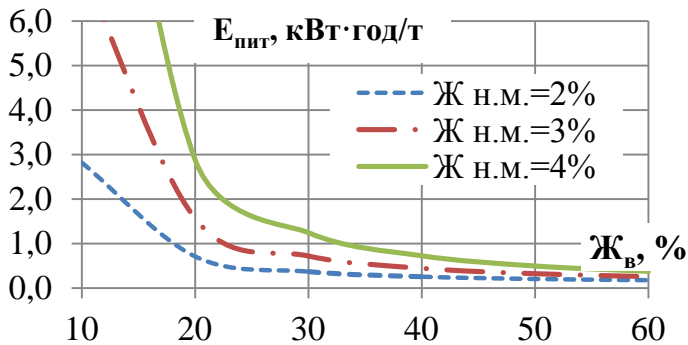


Рис. 10. Залежність питомих енерговитрат від жирності вершків та нормалізованого молока (при  $Q_{zn}=1000$  л/год,  $s=6$  мм<sup>2</sup>,  $d_v=0,8$  мм,  $N_k=1$ ,  $\mu_v=0,8$ ,  $\mu_k=0,95$ )

Надмірне підвищення  $E_{пит}$  відбувається при розмірах перерізу камери менше 6 мм<sup>2</sup> внаслідок підвищення необхідного тиску знежиреного молока для забезпечення необхідної продуктивності гомогенізатора.

Потужність, необхідну для надання коливальних рухів поршня ППГ  $P_v$ , представляли у вигляді трьох складових, що необхідні для:  $P_i$  – подолання сил інерції, які виникають під час зворотньо-поступального руху поршня і штока;  $P_{op}$  – подолання опору поршня під час руху в робочому середовищі апарата;  $P_v$  – надання кінетичної енергії пульсуючій в отворах ППГ емульсії. У результаті аналітичних досліджень отримали формулу для визначення розрахункової сумарної потужності ППГ:

$$P_e = \pi^3 (1 - K_o) D^2 n^2 s^2 \left( \pi n (0,32 h_n \rho_n + 0,1 C \rho_m s) + 0,11 \frac{\rho_m}{K_o} \right). \quad (19)$$

Зростання потужності пульсаційного гомогенізатора в разі збільшення радіуса кривошипа (амплітуди пульсацій) майже лінійне при параболічній залежності потужності від частоти обертання кривошипа (частоти пульсацій). При  $n = 9000$  об/хв і  $s = 10$  мм і використанні циліндричних отворів поршня розрахункова потужність ППГ дорівнює 1,8 кВт.

З формули (19) визначені питомі енерговитрати гомогенізації молока в ППГ:

$$E_{num} = \pi^2 n s (1 - K_o) K \left( \frac{0,64 \pi h_n \rho_n n}{\rho_m} + 0,2 \pi C n r + \frac{0,22}{K_o} \right). \quad (20)$$

Аналіз формули (20) показує, що питомі енерговитрати не залежать від діаметра поршня, а для їх зниження необхідно виконання вимог  $\{n, s, h_n, \rho_n, C, K\} \rightarrow \min$ ;  $\{K_o\} \rightarrow \max$ .

Розрахунок споживаної потужності ПА з ВР заснований на положенні, що кінетична енергія, яку набуває потік рідини в обертовому роторі, дисипується в радіальному зазорі між ротором і статором, в осьовому зазорі між торцем ротора і корпусом, втрачається в механізмах апарата. Тому енергетичний баланс ПА з ВР представлено у вигляді  $P_\Sigma = P_o + P_e$ , де  $P_o$  – потужність, що необхідна для обертання ротора,  $P_e$  – потужність, що необхідна для вібрації ротора. Після необхідних перетворень отримана формула сумарної потужності ПА з ВР:

$$P_\Sigma = 1,1 D^3 n_p^2 \left( \frac{\rho_m D^3 n_p}{9200 z^2 (l_p + \delta + l_c)} + \frac{\mu}{26,4 z \delta} \right) + k_e 0,42 n_k^3 r^2 D^2 (\pi h_p \rho_c + 0,18 \rho_m z^2 r), \quad (21)$$

де  $h_p$  – товщина ротора, м;  $\mu$  – динамічний коефіцієнт в'язкості емульсії, Па·с;  $k_e$  – коефіцієнт, який враховує вплив резонансних явищ.

У цілому вплив потужності вібрації ротора складає більш вагому частку у загальній потужності, споживаній ПА з ВР, і при збільшенні діаметра ротора ця частка різко зростає. При  $z=4$  частка  $P_o$  у  $P_\Sigma$  складає 7%, а при  $z=12$  – вище 25%, що пояснюється більшою частотою коливання у порівнянні з обертанням ротора ПА з ВР.

З урахуванням циклічної зміни площі перерізу модулятора продуктивність ПА з ВР, виражена у т/год, дорівнює

$$Q_o = \frac{D^4 n_p \rho_m}{90 z^2 (l_p + \delta + l_c)}. \quad (22)$$

Питомі енерговитрати ПА з ВР визначали як  $E_{num} = P_\Sigma / Q_o$ , використовуючи формули (21) і (22).

Визначення оптимальних конструктивно-технологічних параметрів СГРЖФ проводили графічним методом, для чого зіставляли залежності середнього розміру жирових кульок (3) і питомих енерговитрат (18).

Оптимізація профілю внутрішньої поверхні камери знежиреного молока в зоні подачі вершків показує, що найнижчі енерговитрати забезпечуються при використанні камери коноїдної форми (рис. 11). У порівнянні з циліндричною формою камери зниження питомих енерговитрат сягає 5–6%, а з конічною – 1–2%. Враховуючи складність виготовлення коноїдальної форми профілю поверхні та незначне зниження питомих енерговитрат циліндричної форми у порівнянні з коноїдальною, раціональним може бути застосування конічної форми направляючих внутрішньої поверхні СГРЖФ.

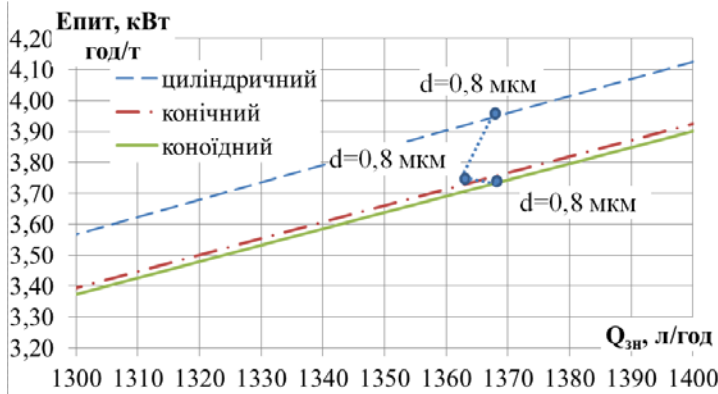


Рис. 11. Оптимізація форми внутрішньої поверхні камери СГРЖФ (при  $s=6\text{мм}^2$ ,  $d_6=0,8\text{мм}$ ,  $N_k=1$ ,  $J_6=30\%$ ,  $J_{н.м}=3\%$ )

збільшуються. Лінії рівної дисперсності (рис. 12) для середнього діаметра жирових кульок 0,8 і 1,2 мкм свідчать, що, за умови отримання мінімальних питомих енерговитрат та максимальної дисперсності, раціонально знижувати амплітуду і підвищувати частоту коливань робочого органу ППГ.

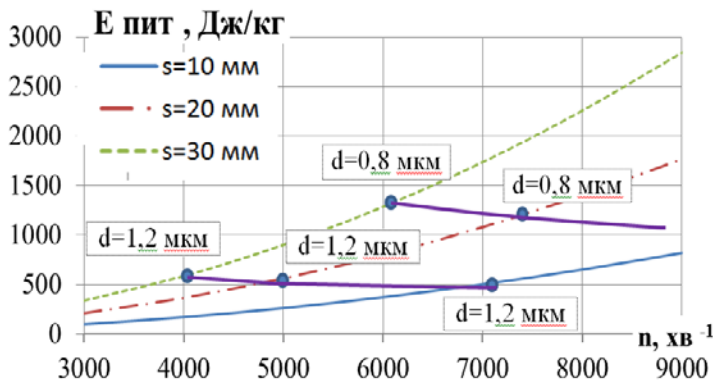


Рис. 12. Графік залежності питомих енерговитрат  $E_{num}$  ППГ від частоти коливання  $n$  і амплітуди коливань поршня  $s$  ( $D=60\text{мм}$ ,  $K_0=0,5$ ,  $K_2=100$ )

Лінії рівної дисперсності на графіку  $E_{num}=f(K_0, s)$  (рис. 13) свідчать, що ППГ має високі енерговитрати у діапазоні  $0,4 < K_0 < 0,6$ , тому використання поршнів з такими параметрами недоцільно.

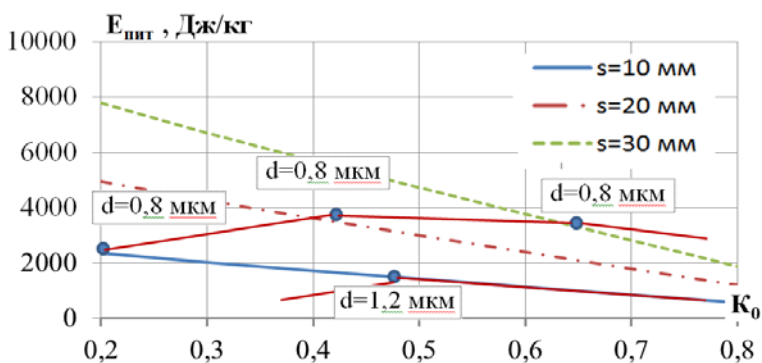


Рис. 13. Графік залежності питомих енерговитрат  $E_{num}$  від коефіцієнта живого перетину  $K_0$  і амплітуди коливання поршня  $s$  ( $D=60\text{мм}$ ,  $\varphi=0,5$ ,  $n=3000\text{хв}^{-1}$ ,  $K_2=100$ )

Зниження питомих енерговитрат досягається при зниженні  $0,4 \geq K_0 \geq 0,7$ . Конструктивне виконання поршня з круглими отворами рівного діаметра з  $K_0 \geq 0,7$  на практиці ускладнене. Тому для оптимізації параметрів ППГ доцільно

використовувати поршень ППГ з  $K_0 < 0,4$  і мінімізувати амплітуду його коливання.

Рішення задачі оптимізації параметрів ПА з ВР здійснювали шляхом аналізу фактора, який характеризує збільшення прискорення емульсії на 1 кВт·год/т питомих енерговитрат процесу гомогенізації – ефективності гомогенізації  $E_\phi = a_e / E_{num}$ . При  $E_\phi \rightarrow \max$  підвищується енергоефективність ПА з ВР (рис. 14).

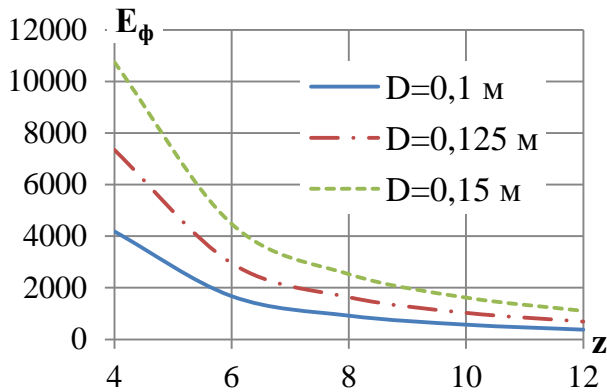


Рис. 14. Графік залежності ефективності гомогенізації  $E_\phi$  від діаметра ротора  $D$  та кількості отворів  $z$  в ПА з ВР

що ефективність гомогенізації підвищується при збільшенні діаметра ротора, зменшенні радіусу кривошипу і практично не залежить від частоти його обертання.

Аналізуючи рис. 14, найбільш впливовим параметром ефективності гомогенізації є кількість отворів у роторі і статорі. У результаті аналітичних досліджень встановлено,

**У шостому розділі «Експериментальні дослідження гідродинамічного диспергування жирової фази молочної емульсії»** проведена експериментальна перевірка та уточнення отриманих аналітично математичних моделей диспергування молочної емульсії в дослідних гомогенізаторах.

Проведені експериментальні дослідження впливу швидкості подачі знежиреного молока в СГРЖФ (рис. 15) свідчать, що зміна відстані між направляючими (площі перетину робочої камери) не впливає на дисперсність молочної емульсії, що узгоджується з результатами теоретичних досліджень. Незначне збільшення розмірів жирових кульок при  $a=2$  мм (на 2–5%) пояснюється підвищенням коефіцієнта Рейнольдса і турбулізації рідини.

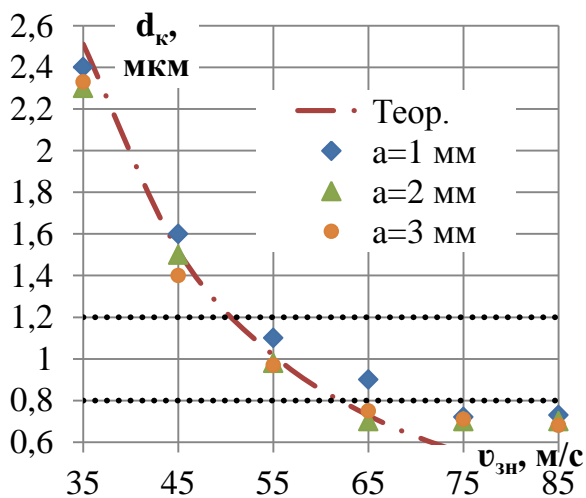
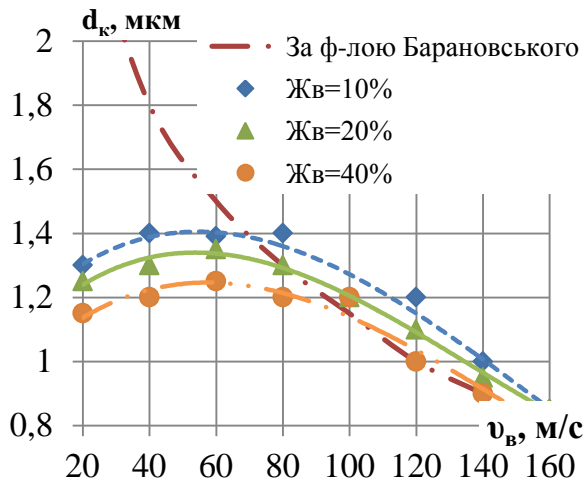


Рис. 15. Залежність середнього діаметра жирових кульок  $d_k$  від відстані між направляючими СГРЖФ  $a$  та швидкості знежиреного молока  $v_{zn}$  при  $d_g=0,7$  мм,  $v_g=80$  м/с,  $J_g=30\%$ .

Основним чинником руйнування жирових кульок в СГРЖФ є швидкість ковзання жирових кульок, яка підвищується при збільшенні швидкості потоку знежиреного молока. При швидкості більше 70 м/с дисперсність майже не збільшується. Аналогічний характер має графік залежності дисперсності від тиску для клапанної і

протитечійно-струминної гомогенізації, що свідчить про подібність механізмів диспергування жирових кульок в них.

Використання вершків більшої жирності підвищує дисперсність гомогенізованої емульсії (рис. 16), що пояснюється підвищенням швидкості



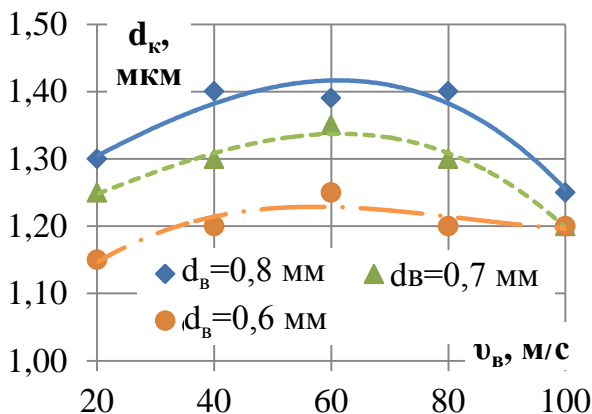
ковзання жирових кульок вершків внаслідок зменшення кількості плазми, що подається разом з вершками.

Рис. 16. Залежність середнього діаметра жирових кульок  $d_k$  від швидкості знежиреного молока  $v_{зп}$  СГРЖФ та жирності вершків  $Ж_в$  (при  $v_{зп} = 60$  м/с)

На рис. 16. показана залежність між розміром жирових кульок та швидкістю подачі вершків при руйнуванні жирових кульок аналогічно клапанній гомогенізації за формулою Н.В. Барановського. При  $v_в > 70-80$  м/с відбувається гомогенізація за типом клапанної (величина дисперсності близька до розрахункової). В діапазоні  $40 < v_в < 80$  м/с розміри жирових кульок максимальні, а при  $v_в < 40$  м/с – зменшуються на 6–10%. Зменшення дисперсності при підвищенні швидкості струменя вершків з 20–40 до 40–80 м/с можливо пояснити утворенням стійкого потоку вершків, який руйнується лише біля протилежної до розташування каналу вершків стінки камери. У цій зоні швидкість струменя знежиреного молока мінімальна, що обумовлює менші значення швидкості обтікання жирових кульок. Тому, якщо не враховувати диспергування за типом клапанної, яка енергетично неефективна (в діапазоні  $v_в > 70-80$  м/с), найбільшого ступеня гомогенізації в СГРЖФ можливо досягти за  $v_в < 20$  м/с.

Шляхом прогнозування засобами табличного процесора Ms. Office Excel при  $v_в < 5-10$  м/с коефіцієнт впливу швидкості потоку вершків СГРЖФ має максимальне значення  $k_{сш} = 1$ . При  $40 < v_в < 80$   $k_{сш} = 0,75-0,80$ , а при  $20 < v_в < 40$   $k_{сш} = 0,8-0,85$ .

Зменшення діаметра каналу вершків з 0,8 до 0,6 мм призводить до зменшення розмірів жирових кульок молока на 8–10% (рис. 17). Це



відбувається внаслідок зменшення центральної зони струменя вершків зі зниженою швидкістю обтікання жирових кульок.

Рис. 17. Залежність середнього діаметра жирових кульок  $d_k$  від швидкості  $v_в$  і діаметра каналу подачі молочних вершків  $d_в$  СГРЖФ (при  $v_{зп} = 60$  м/с)

Прогнозування дало змогу отримати залежність для визначення  $k_{cd}$  у вигляді:  $k_{cd} = \sqrt{0,26 / (2,025d_e - 0,75d_e^2 + 0,2625)}$ .

Графік залежності дисперсності емульсії від жирності вершків (рис. 18) свідчить про зниження  $d_k$  з підвищенням  $J_в$ . За жирності вершків більше 40% дисперсність емульсії практично не зменшується.

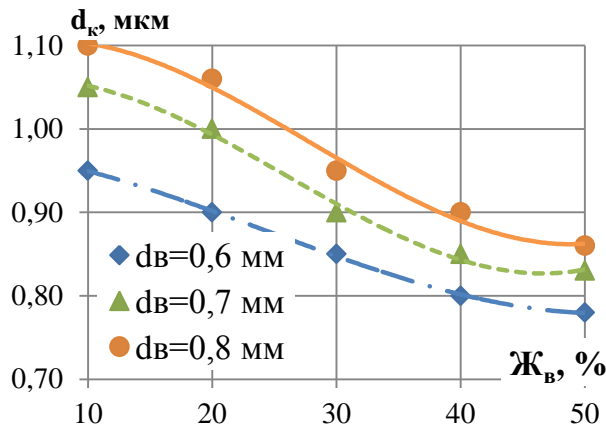
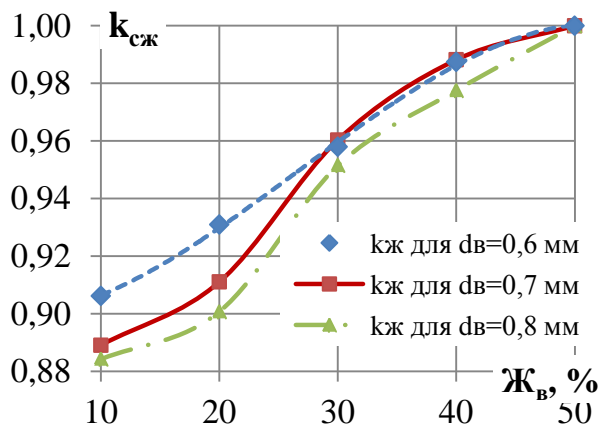


Рис. 18. Залежність середнього діаметра жирових кульок  $d_k$  від діаметра каналу подачі вершків  $d_e$  СГРЖФ та жирності вершків  $J_в$  (при  $v_{зн}=80$  м/с)



Прогнозований максимальний ступінь диспергування досягається при  $J_в=45-55\%$ , за яких коефіцієнт  $k_{сж}=1$ . Для вершків іншої жирності значення  $k_{сж}$  наведені на графіку рис. 19.

Рис. 19. Залежність коефіцієнта жирності вершків для СГРЖФ  $k_{сж}$  від жирності вершків  $J_в$ , при  $v_{зн}=80$  м/с

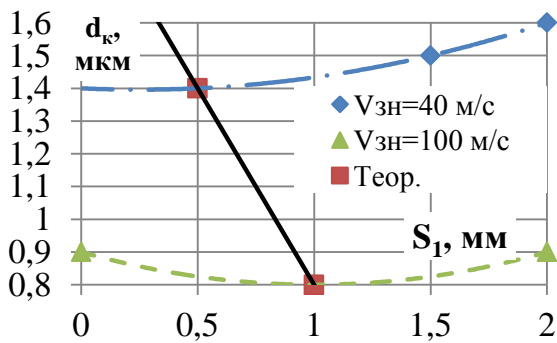
У діапазоні  $J_в > 30\%$  значення коефіцієнта жирності для струминної гомогенізації не відрізняються для різних  $d_e$ . При  $J_в < 30\%$  істотний вплив спричиняє висока турбулентність потоку і механізми руйнування, пов'язані з руйнуванням турбулентними завихреннями, тому значення  $k_{сж}$  для  $d_e=0,8$  мм збільшуються на 2–4% у порівнянні з  $d_e=0,6$  мм.

Отже, для підвищення ступеня диспергування необхідно зменшувати діаметр каналу подачі вершків, використовувати вершки жирністю 30–50% і забезпечити швидкість подачі вершків менше 30–40 м/с.

Визначення коефіцієнтів впливу діаметра каналу, швидкості струменя і жирності вершків СГРЖФ дає змогу розрахувати значення коефіцієнта струминного диспергування для даних, показаних на рис. 16 (при  $k_{cd}=0,44$ ,  $k_{сш}=0,75$ ,  $k_{сж}=0,96$ ):  $k_c=0,32$ . Критичне число Вебера, що відповідає експериментальним даним рис. 16 за формулою (1), дорівнює  $We_k=28$ . Теоретичне значення коефіцієнта гомогенізації розраховане для значення критичного числа Вебера 14 і відповідає останнім експериментальним дослідом руйнування крапель рідини в повітряному середовищі. Різниця густини дисперсної та дисперсійної фаз на 2 порядки менше, ніж для рідини та повітря, що призводить до значно більшої залученості сусідніх шарів емульсії під час

руху жирової кульки. Тому очікувано, що критичне значення числа Вебера при диспергуванні молочного жиру молока є більшим, що знайшло підтвердження при диспергуванні молока в СГРЖФ.

Експериментальна перевірка аналітично отриманої формули (4) для визначення оптимальної координати подачі вершків в СГРЖФ підтверджує існування зони, при подачі в яку струменя вершків можливо отримати підвищення дисперсності емульсії на 10–12% (рис. 20). Для побудови цього



графіка швидкість знежиреного молока виражали через надлишковий тиск.

Рис. 20. Залежність середнього діаметра жирових кульок  $d_k$  від координати подачі вершків  $S_1$  і швидкості подачі знежиреного молока  $v_{zh}$  в СГРЖФ

Результати експериментальних досліджень визначення впливу амплітуди і частоти коливання поршня ППГ на середній розмір жирових кульок молока при використанні поршня з циліндричними (рис. 21 а) і конічними (у вигляді двох конусів з кутом  $45\text{--}55^\circ$ ) (рис. 21 б) отворами свідчать про адекватність аналітично отриманих формул (13) і (8) в діапазоні  $0,7 \leq d_k \leq 2,6$  мкм. Експериментальні дані  $d_k = f(a_e)$  (рис. 22) показують високу кореляцію ( $R^2 > 0,96$ ) при  $K_h = 0,225 \cdot 10^{-3} \text{ м}^3/2/\text{с}$ , що доводить гіпотезу, про те, що основний фактор руйнування жирових кульок молока в ППГ – прискорення потоку молочної емульсії.

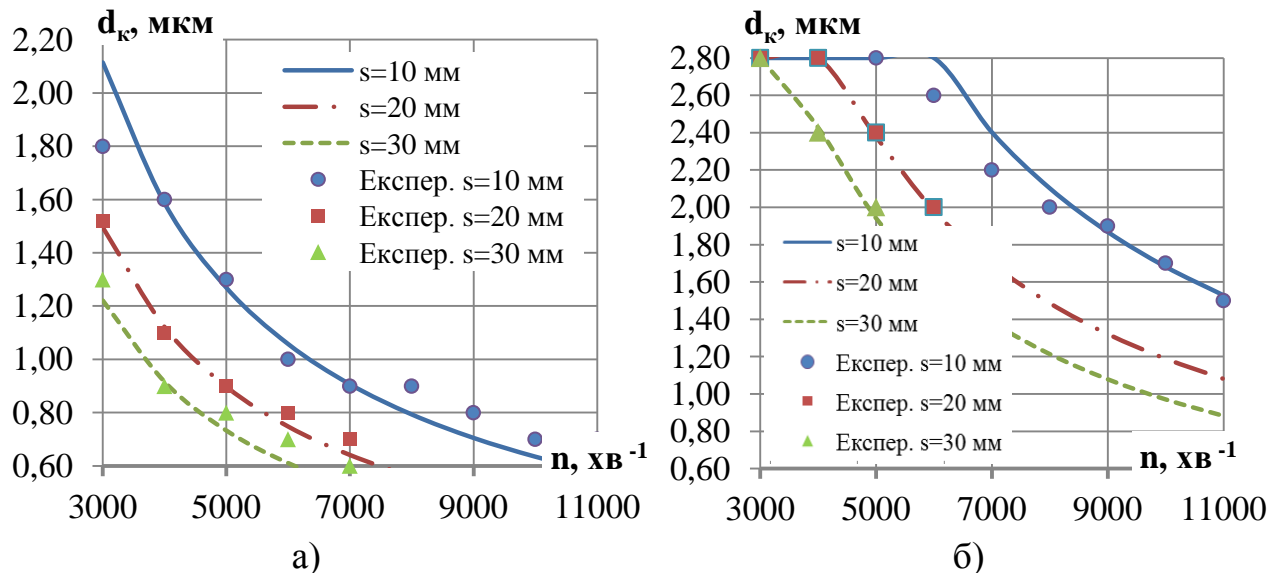


Рис. 21. Співставлення аналітичних і експериментальних даних впливу амплітуди  $s$  і частоти  $n$  коливання поршня ППГ на середній діаметр жирових кульок молока  $d_k$ : а) – конічні отвори поршня (при  $D=60$  мм,  $K_o = 0,04$ ,  $\varphi_{ш} = 0,96$ ); б) – циліндричні отвори поршня (при  $D=60$  мм,  $K_o = 0,48$ ,  $\varphi_{ш} = 0,82$ )



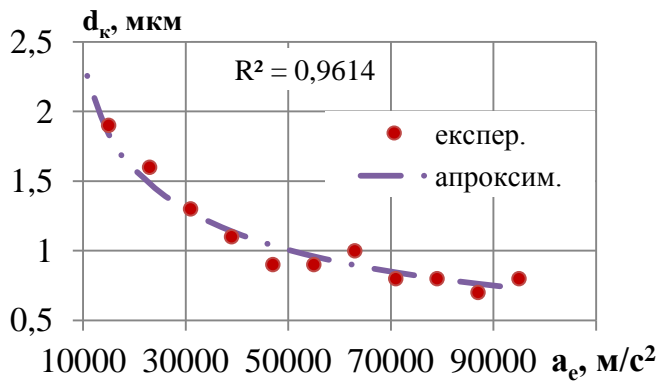
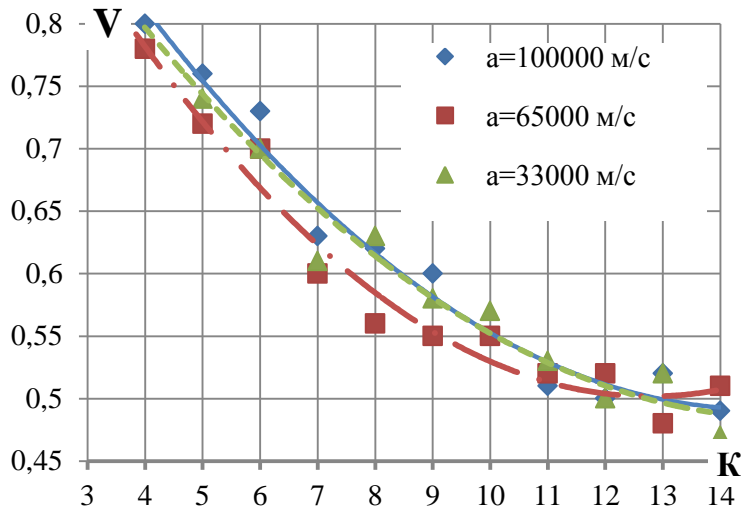


Рис. 22. Залежність середнього діаметра жирових кульок  $d_k$  від прискорення потоку емульсії в отворах поршня ППГ  $a_e$

Дисперсний склад емульсії після диспергування в ППГ набуває достатньої рівномірності при  $K \geq 12$ , тому мінімальною необхідною кратністю



обробки молочної емульсії є  $K=12$ .

Рис. 23. Залежність коефіцієнта варіації  $V$  розміру жирових кульок від кратності обробки  $K$  в ППГ

Експериментальні дослідження впливу коефіцієнта живого перетину отворів поршня  $K_o$  ППГ на дисперсність молочної емульсії (рис. 24) свідчать про збільшення розмірів жирових кульок по відношенню до теоретичних розрахунків за формулою (12).

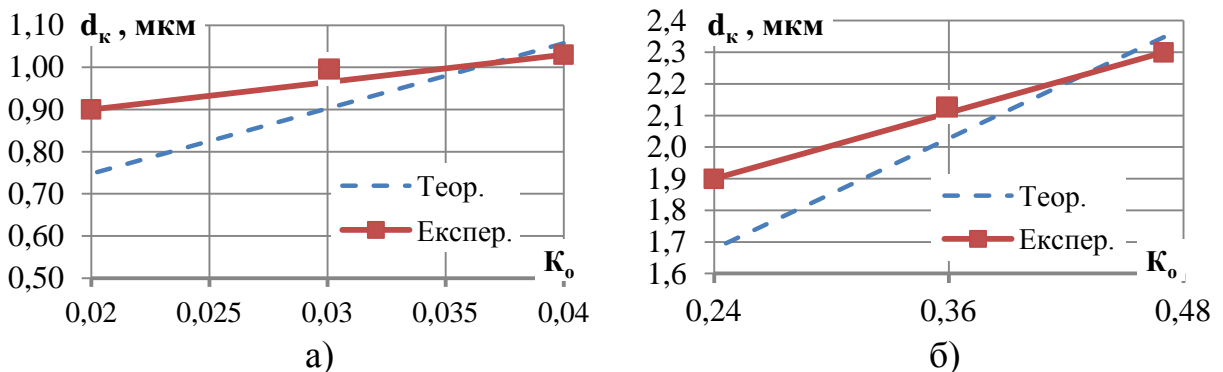


Рис. 24. Залежність середнього діаметра жирових кульок  $d_k$  від коефіцієнта живого перетину поршня  $K_o$ : а) – конічні отвори при  $n=6000 \text{ хв}^{-1}$ ,  $s=10 \text{ мм}$ ; б) – циліндричні отвори при  $n=9000 \text{ хв}^{-1}$ ,  $s=10 \text{ мм}$

При зменшенні  $K_o$  у 2 рази відхилення експериментальних значень від теоретичних сягає 18% у разі використання циліндричних і 13% – конічних

отворів. Таку відмінність можна пояснити нерівномірністю розташування отворів по поверхні поршня, внаслідок чого збільшується кількість застійних зон і місцевих завихрень між отворами, розміри яких зростають при збільшенні діаметра (для конічних отворів – більшого діаметра) отворів поршня та зменшенні кількості отворів поршня. Крім того, при зменшенні коефіцієнта живого перетину отворів підвищується гідравлічний опір руху емульсії в отворах поршня. Отже, для підвищення енергоефективності ППГ раціональним є збільшення  $K_0$ .

Для експериментальної перевірки знайдених аналітично умов синхронізації обертальних і коливальних рухів ротора ПА з ВР проведено дослідження впливу частоти обертання кривошипу на середній діаметр жирових кульок для 3-х випадків –  $n_p=n_k/2z$ ,  $n_p=n_k/z$  і  $n_p=2n_k/z$  (рис. 25 а) і кута зсуву фаз обертального та коливального рухів ротора (рис. 25 б).

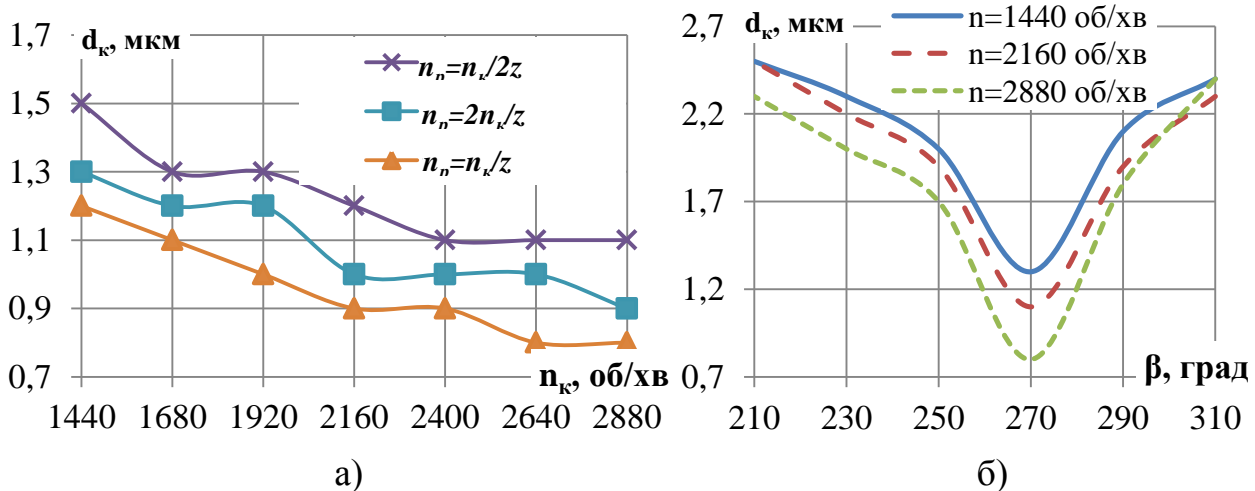


Рис. 25. Графік зміни діаметра жирових кульок  $d_k$  для ПА з ВР в залежності від:  
а) – частоти обертання кривошипу  $n_k$  для  $n_p=n_k/z$ ,  $n_p=n_k/2z$  і  $n_p=2n_k/z$ ;  
б) – кута зсуву фаз обертального та коливального рухів ротора  $\beta$  та частоти обертання кривошипу  $n_k$

Результати свідчать про підвищення дисперсності емульсії при  $n_p=n_k/z$  і  $\beta=3\pi/2$ . Пояснити збільшення  $d_k$  при підвищенні частоти обертання ротора (при  $n_p=2n_k/z$ ) і різке зниження  $d_k$  при оптимальному куті зсуву фаз (при збільшенні або зменшенні цього кута на  $40-60^\circ$  гомогенізація практично не відбувається) можливо лише виникненням резонансних явищ – збільшенням амплітуди пульсації емульсії в отворах модулятора ПА з ВР.

Для перевірки адекватності формули (8) для ПА з ВР змінювали частоту обертання валу кривошипу  $n_k$  в діапазоні 1440–2880 об/хв і радіус кривошипу  $r$  у діапазоні 0,5–1,5 мм, витримуючи умови виникнення резонансних явищ. Для кожного досліду згідно з формулою (16) розраховувалось значення середнього прискорення молочної емульсії  $a_e$  і визначався середній розмір жирових кульок (рис. 26). При  $K_h=0,068 \cdot 10^{-3} \text{ м}^{3/2}/\text{с}$  результати з достовірністю 92% апроксимуються виразом (8). Характер отриманої залежності подібний до аналогічної для клапанної гомогенізації, а також для протитечійно-струминної, СГРЖФ та ППГ: за підвищення інтенсивності впливу темпи збільшення дисперсності знижуються.

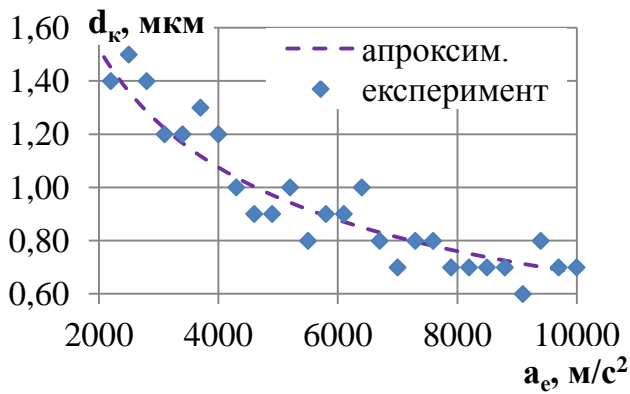


Рис. 26. Діаметр жирових кульок  $d_k$  залежно від середнього прискорення емульсії  $a_e$

Експериментальні дані визначення середньої потужності СГРЖФ та їх порівняння з результатами аналітичних досліджень за формулою (17) свідчать, що експериментальні значення потужності насосів подачі знежиреного молока і вершків на 4–10% більші за розрахункові, що пояснюється втратами тиску у з'єднувальних трубопроводах і патрубках гомогенізатора. У цілому аналітична модель енерговитрат СГРЖФ адекватна експериментальним даним.

На графіку питомих енерговитрат СГРЖФ (рис. 27) показана лінія рівної дисперсності ( $d_k=0,8$  мкм), яка свідчить про різке підвищення питомих енерговитрат при  $J_в < 30$ –35%.

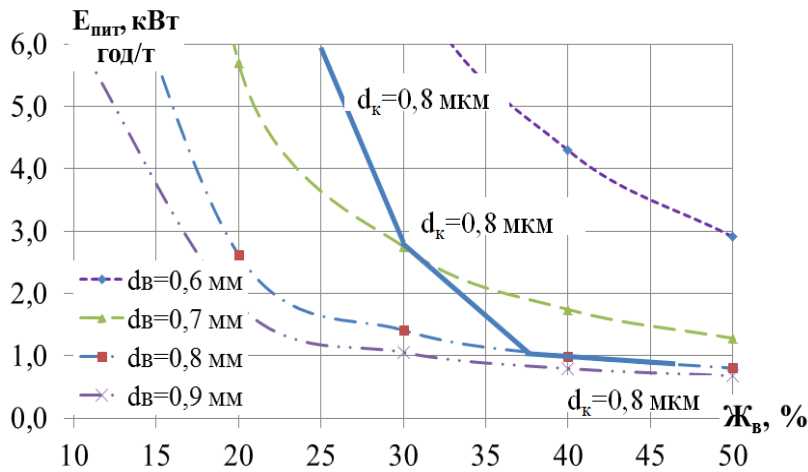


Рис. 27. Залежність питомих енерговитрат СГРЖФ від жирності вершків  $J_в$  та діаметра каналу вершків  $d_в$  (при  $v_{zn}=60$  м/с)

Це відбувається з двох причин: зниження коефіцієнта витрат рідини і збільшення необхідної швидкості потоку знежиреного молока для забезпечення необхідної жирності гомогенізованого продукту. При збільшенні діаметра каналу вершків до 0,9 мм подальшого зниження питомих енерговитрат практично не відбувається. Отже, раціональними є значення діаметра  $d_в = 0,9$ –1,0 мм і жирності вершків 40–45%.

Порівняння експериментальних даних середньої потужності ППГ для циліндричних і конічних отворів з розрахунковими за формулою (19) (рис. 28) свідчать про відхилення не більше 5–10%, тобто теоретично отримана формула придатна для розрахунку необхідної середньої потужності ППГ. Криві рівної дисперсності (рис. 28) на графіках співставлення питомих енерговитрат та дисперсності молочної емульсії свідчать про зниження питомих енерговитрат з підвищенням частоти вібрації поршня як з циліндричними, так і конічними отворами. Ці результати узгоджуються з результатами теоретичних досліджень.

Питомі енерговитрати ППГ з циліндричними отворами поршня для отримання дисперсності емульсії 1,2 мкм в 3,3 рази більші, ніж для ППГ з конічними отворами поршня (відповідно 3600 і 1200 Дж/кг), що пояснюється значно меншим значенням коефіцієнта живого перетину поршня з конічними отворами (0,04) у порівнянні з циліндричними (0,24).

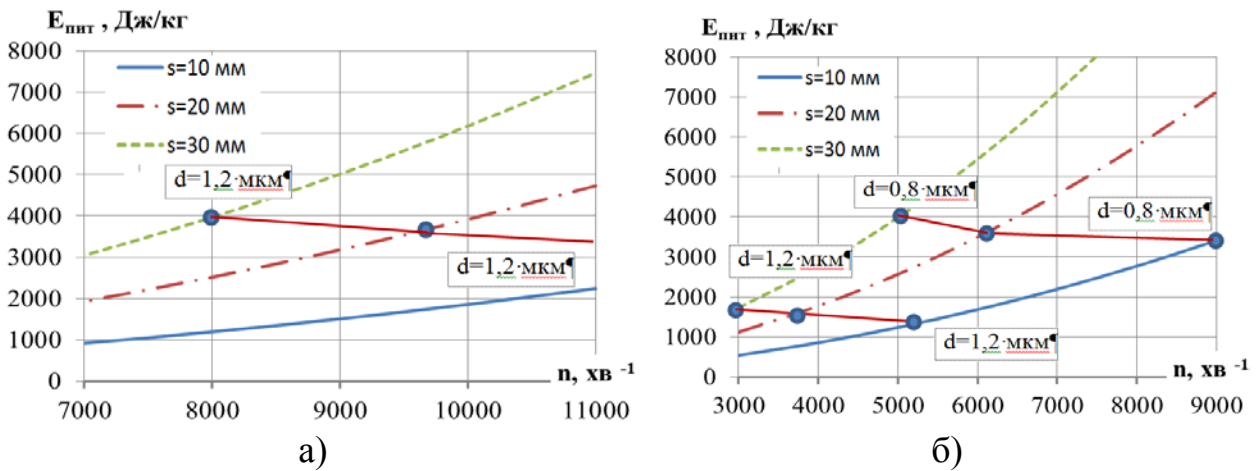


Рис. 28. Залежність питомих енерговитрат і дисперсності молочної емульсії від частоти  $n$  і амплітуди  $s$  коливань поршня: а) – з циліндричними отворами ( $D = 60$  мм,  $K_o = 0,24$ ); б) – з конічними отворами ( $D = 60$  мм,  $K_o = 0,04$ )

Результати експериментальних досліджень визначення енерговитрат ПА з ВР свідчать, що отримана аналітично формула для визначення  $P_o$  адекватна ( $R^2 > 0,94$ ). Потужність електродвигуна приводу вібрації ротора  $P_e$  при умовах синхронізації фаз між обертальними і коливальними рухами поршня менша від розрахункової (рис. 29), що викликано резонансними явищами.

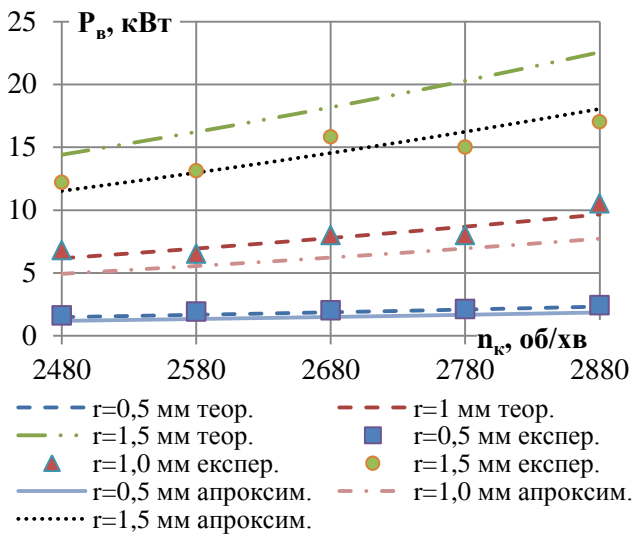


Рис. 29. Графік співставлення теоретичних та експериментальних даних і апроксимованих залежностей споживаної потужності вібрації  $P_e$  ПА з ВР від радіуса  $r$  і частоти обертання  $n_k$  кривошипа

Значення коефіцієнта  $k_e$  в формулі (21) дорівнює 0,8. При цьому відхилення від експериментальних даних для формули сумарної потужності ПА з ВР (21) не перевищує 5%. Визначено, що при застосуванні однократної обробки з вібраційним впливом, при частоті осьових вібрації ротора 2880 об/хв, амплітуді 1,8–2,2 мм і використанні ротора з 4 отворами, питомі енерговитрати ПА з ВР не перевищують 1,4–1,6 кВт·год/т.

Таким чином, у результаті аналітичних і експериментальних досліджень доведено, що прискорення потоку емульсії є параметром, який визначає гідродинамічні умови руйнування жирових часток емульсій для ПА з ВР, ППГ і клапанного гомогенізатора. Додаткові умови у зоні руйнування жирових кульок характеризує коефіцієнт гомогенізації (табл. 1).

**Вплив чинників процесу диспергування на коефіцієнт гомогенізації**

Тип гомогенізатора	Значення коефіцієнта гомогенізації, $K_h (\times 10^{-6})$ , $m^{3/2}/c$	Наявність та інтенсивність впливу чинників диспергування					
		Кратність обробки	Наявність вібраційного впливу	Наявність резонансу	Рівномірність обробки	Турбулентність	Кавітація
Теоретичне значення	2400	1	–	–	+	–	–
СГРЖФ	3300	1	–	–	+	–	–
Клапанний	1600	1 (2)	–	–	–	+	+
ППГ	225	>12	+	–	–	–	–
ПА з ВР	68	1–2	+	+	+	+	+

При створенні умов диспергування молока в СГРЖФ, де відбувається однократний вплив на емульсію в умовах відсутності вібрації, вплив різниці швидкості фаз на руйнування жирових кульок максимальний, а інших чинників (кавітації та турбулентності) – зведено до мінімуму. Експериментально визначеному значенню  $We_k$  за формулою (9) відповідає  $K_h=0,0033 m^{3/2}/c$ , що більше ніж теоретичне за рахунок більшого значення критичного числа Вебера, ніж прийнятого в аналітичних розрахунках.

При клапанній гомогенізації, крім високого прискорення потоку емульсії (та високої різниці швидкості дисперсної та дисперсійної фаз), суттєвий вплив на диспергування молочного жиру оказують висока турбулентність та кавітація. Вплив цих чинників призводить до зниження  $K_h$  до  $1,6 \cdot 10^{-3} m^{3/2}/c$ .

При вібраційному впливі на емульсію, який відбувається в ППГ, дисипація енергії концентрується на межі розділу фаз, підвищується рівномірність розподілу гідродинамічних умов за об'ємом емульсії. Додаються переваги багатократного проходження продукту крізь робочі органи гомогенізатора, що в сукупності призводить до значного зниження коефіцієнта гомогенізації.

У ПА з ВР створені умови для виникнення резонансних явищ, в результаті яких підвищується амплітуда та зростає прискорення руху емульсії. Крім того, існують великі градієнти швидкостей у зазорі між ротором і статором, а отже, і значно більша турбулентність та значно більш розвинута кавітація, ніж у ППГ. Ці причини обумовлюють найнижчий коефіцієнт гомогенізації серед розглянутих в табл. 1.

У цьому розділі «Проектування і методики розрахунку роторних, пульсаційних і струминних гомогенізаторів з урахуванням розробленої гідродинамічної моделі диспергування та економічна ефективність їх впровадження» на основі теоретичних та експериментальних досліджень запропонована методика розрахунку конструкційно-технологічних і енергетичних параметрів роботи СГРЖФ, ППГ і ПА з ВР. Представлено синтез конструктивних рішень гідродинамічних диспергаторів, оснований на

результатах теоретичних і експериментальних досліджень, які дозволяють підвищити енергоефективність гомогенізації.

Розроблені промислові зразки СГРЖФ, ППГ і ПА з ВР, які дозволяють отримати молочну емульсію з середнім діаметром жирових кульок 0,8 мкм і мають у 4,9–6,7 разів менші питомі енерговитрати, ніж промислово освоєні гомогенізатори молока (у т.ч. клапанні).

Технічна документація на розроблені машини передана до ТОВ «Продмашпроект» і ПП ВКФ «Харчоналадка» (м. Мелітополь, Запорізької області). Спроектовані гомогенізатори були впроваджені на ПП «Молокозавод-ОЛКОМ» (м. Мелітополь, Запорізької області) замість клапанних гомогенізаторів відповідної продуктивності (К5-ОГ2А-1,25; А1-ОГ2М-2,5; А1-ОГ2М). При цьому отриманий економічний ефект складає 16,07–40,17 грн/т або 265740–362945 грн, що досягається зниженням питомих енерговитрат на 45–76% і експлуатаційних витрат – на 35–64%. Терміни окупності нових гомогенізаторів не перевищують 4–9 місяців. Результати дисертаційної роботи впроваджені в навчальний процес ТДАТУ.

## ВИСНОВКИ

У дисертаційній роботі викладене нове вирішення важливої науково-прикладної проблеми підвищення ефективності виробництва питного молока і молочних продуктів, які виробляються з використанням гомогенізації шляхом розвитку наукових основ гідродинамічного диспергування молочних емульсій.

1. У результаті узагальнення науково-технічної інформації з конструктивних особливостей гомогенізаторів, гіпотез і теорій гомогенізації, механізмів руйнування крапель, переважних гідродинамічних явищ, які призводять до руйнування жирових кульок молока та методик розрахунку гомогенізаторів, виявлена відсутність узагальнюючої теорії і гідродинамічних показників диспергування молочних емульсій, придатних для використання до більшості конструкцій гомогенізаторів. Обґрунтовано, що основні фактори диспергування емульсій можливо об'єднати такими показниками як відносна швидкість дисперсної та дисперсійної фаз і прискорення потоку емульсії, які є більш універсальними і зручними для визначенні ступеня дисперсності в результаті гомогенізації молока.

Шляхом аналізу конструктивних особливостей сучасних гомогенізаторів молока та методів інтенсифікації процесу диспергування молочних емульсій розроблені принципові схеми енергоефективних конструкцій: пульсаційного апарата з ротором, що вібрує, пульсаційного поршньового та струминного гомогенізатора з роздільною подачею жирової фази.

2. Розроблено математичну модель, яка пов'язує прискорення потоку емульсії з відносною швидкістю дисперсної та дисперсійної фаз, критерієм Вебера і середнім розміром жирових кульок емульсії, яка показує, що прискорення потоку емульсії може бути універсальним параметром, що визначає гідродинамічні умови руйнування жирових часток емульсій для

більшості типів гомогенізаторів молока (клапанних, струминних, імпульсних, пульсаційних, роторних, відцентрових і міксерів), для яких безпосереднє визначення відносної швидкості дисперсної та дисперсійної фаз, та, як наслідок, критерія Вебера, викликає труднощі.

3. Введений узагальнюючий показник – «коефіцієнт гомогенізації», що пов'язує прискорення руху емульсії з середнім діаметром жирової кульки молока, який дозволяє кількісно характеризувати додаткові гідродинамічні умови процесу диспергування жирової фази молочної емульсії. Аналітично отримане значення цього показника для умов однократної обробки при відсутності додаткових гідродинамічних факторів диспергування становить  $2,4 \cdot 10^{-3} \text{ м}^{3/2}/\text{с}$ . Експериментально визначене значення коефіцієнта гомогенізації становить  $3,3 \cdot 10^{-3} \text{ м}^{3/2}/\text{с}$  для струминного гомогенізатора з роздільною подачею жирової фази,  $0,225 \cdot 10^{-3} \text{ м}^{3/2}/\text{с}$  – для поршньового пульсаційного гомогенізатора і  $0,068 \cdot 10^{-3} \text{ м}^{3/2}/\text{с}$  – для пульсаційного апарата з ротором, що вібрує, при значенні цього показника для клапанної гомогенізації  $1,6 \cdot 10^{-3} \text{ м}^{3/2}/\text{с}$ .

4. Розроблена математична модель гідродинамічного диспергування молочної емульсії в струминному гомогенізаторі молока з роздільною подачею жирової фази з одночасною нормалізацією молока за жирністю, яка основана на визначенні відносної швидкості дисперсної та дисперсійної фаз і пов'язує конструктивно-технологічні, гідравлічні й енергетичні показники гомогенізатора з дисперсністю жирової емульсії. На підставі розробленої моделі та проведених експериментальних досліджень визначене критичне значення критерія Вебера для руйнування жирової кульки молока в потоці молочної плазми, яке становить 28.

Аналіз математичної моделі дозволив встановити, що для підвищення енергоефективності процесу диспергування в струминному гомогенізаторі з роздільною подачею жирової фази при отриманні емульсії з середнім розміром жирових кульок 0,8 мкм необхідно використовувати вершки жирністю 40–45%, забезпечити швидкість струменя вершків 20–40 м/с і діаметр каналу подачі вершків 0,9–1,0 мм. При подачі вершків у зону максимальної швидкості знежиреного молока дисперсність молочного жиру підвищується на 10–12%. При цьому питомі енерговитрати процесу гомогенізації не перевищують 0,9 кВт·год/т.

5. Отримано безперервну математичну функцію для опису процесу зміни площі прохідного перерізу модулятора роторно–пульсаційного апарата для умов застосування отворів круглої форми та рівності кількості отворів ротора і статора. На основі отриманої функції розроблена математична модель гідродинамічного диспергування молочного жиру в пульсаційному апараті з ротором, що вібрує, аналіз якої дав змогу встановити умови виникнення бажаних резонансних явищ, за рахунок яких потужність, що споживається, знижується на 18–22%, а дисперсність молочної емульсії підвищується на 15–25%.

На підставі розробленої математичної моделі гідродинамічного диспергування жирової фази молочної емульсії в пульсаційному апараті з ротором, що вібрує, встановлено, що для забезпечення мінімальної

енергоємності (1,4–1,6 кВт·год/т) раціонально застосовувати однократну обробку з вібраційним впливом, при частоті осьових вібрацій ротора 2880 об/хв і амплітуді 1,8–2,2 мм і використовувати ротор з 4 отворами.

6. Розроблено математичну модель гідродинамічного диспергування молочного жиру в пульсаційному поршньовому апараті, яка пов'язує його конструктивні, технологічні та кінематичні параметри з прискоренням руху молочної емульсії та енергетичними й дисперсними показниками гомогенізації молока.

Аналіз розробленої моделі дав змогу встановити, що за умови зниження питомих енерговитрат для досягнення необхідних дисперсних показників молочної емульсії раціонально підвищувати частоту та знижувати амплітуду коливань поршня пульсаційного гомогенізатора, використовувати поршень з отворами у вигляді двох конусів з кутом  $45\text{--}55^\circ$ , обернених меншими основами назустріч одне одному при забезпеченні максимального коефіцієнта живого перетину отворів при амплітуді 9–11 мм та частоті коливань поршня 9000–10000 хв<sup>-1</sup>. Визначено значення кратності проходження емульсії крізь отвори поршня пульсаційного гомогенізатора за умови досягнення достатньої рівномірності дисперсного складу емульсії та мінімізації енерговитрат, що становить 12.

7. Розроблені методики розрахунків і промислові зразки пульсаційного апарата з ротором, що вібрує, пульсаційного поршньового та струминного гомогенізатора з роздільною подачею жирової фази, які дозволяють отримати молочну емульсію з середнім розміром жирових кульок 0,8 мкм і при цьому мають в 4,9–6,7 разів менші, порівняно з клапанним, питомі енерговитрати. Розроблено технічну документацію на виготовлення енергоефективних гомогенізаторів, яку передано до впровадження у виробництво в ТОВ «Продмашпроект» і ПП ВКФ «Харчоналадка» (м. Мелітополь, Запорізької області).

8. Здійснене впровадження спроектованих гомогенізаторів на ПП «Молокозавод-ОЛКОМ» і ТОВ МЖК «Південний» (м. Мелітополь, Запорізької області) підтверджує їх перспективність. Розрахунковий економічний ефект від впровадження становить 265,74–362,95 тис. грн/рік.

## СПИСОК ОПУБЛІКОВАНИХ ПРАЦЬ ЗА ТЕМОЮ ДИСЕРТАЦІЇ

1. Дейниченко Г.В., Самойчук К.О., Кюрчев С.В., Олексієнко В.О., Паляничка Н.О., Верхоланцева В.О. Протитечійно-струминна гомогенізація молока: монографія. Мелітополь: Видавничий будинок ММД, 2017. 188 с. *Внесок здобувача: постановка завдань дослідження, розробка аналітичних моделей диспергування, обґрунтування напрямів конструктивного вдосконалення гомогенізаторів.*

2. Самойчук К.О., Паляничка Н.О. Аналіз сил, що діють на жирову кульку під час гомогенізації // Праці Таврійського державного агротехнологічного університету: зб. наук. праць. Мелітополь: ТДАТУ, 2010. Вип. 10. Т. 3. С. 87–92. *Внесок здобувача: дослідження впливу сил на руйнування жирової кульки та формулювання висновків.*



3. Самойчук К.О., Серков П.О., Ковальов О.О. Диспергатори заміників цільного молока // Праці Таврійського державного агротехнологічного університету: зб. наук. праць. Мелітополь: ТДАТУ, 2011. Вип. 11. Т.2. С. 119–125. *Внесок здобувача: визначення ефективних конструкцій диспергаторів заміників молока та формулювання висновків статті.*

4. Самойчук К.О., Ковальов О.О. Розробка лабораторного зразка струминного гомогенізатору з роздільною подачею вершків // Праці Таврійського державного агротехнологічного університету: зб. наук. праць. Мелітополь: ТДАТУ, 2011. Вип. 11. Т.6. С. 77–83. *Внесок здобувача: ідея конструктивного рішення лабораторного зразка струминного гомогенізатора.*

5. Самойчук К.О., Ковальов О.О. Експериментальні дослідження струминного гомогенізатора з роздільним подаванням жирової фази // Обладнання та технології харчових виробництв: зб. наук. праць / Донецький національний університет економіки і торгівлі імені Михайла Туган-Барановського. Донецьк: ДонНУЕТ ім. М. Туган-Барановського, 2012. Вип. 28. С. 42–46. *Внесок здобувача: участь у проведенні експериментальних досліджень визначення оптимальної відстані між направляючими та швидкості потоку знежиреного молока.*

6. Гвоздєв О.В., Самойчук К.О., Паляничка Н.О. Комп'ютерне моделювання імпульсного гомогенізатора молока з використанням програмного забезпечення Ansys Workbench // Обладнання та технології харчових виробництв: зб. наук. праць / Донецький національний університет економіки і торгівлі імені Михайла Туган-Барановського. Донецьк: ДонНУЕТ ім. М. Туган-Барановського, 2012. Вип. 28. С. 294–299. *Внесок здобувача: планування комп'ютерного моделювання й встановлення закономірностей змін швидкості потоку емульсії в імпульсному гомогенізаторі.*

7. Самойчук К.О., Ковальов О.О., Івженко А.О. Аналіз методів оцінювання якості гомогенізації молока // Праці Таврійського державного агротехнологічного університету: зб. наук. праць. Мелітополь: ТДАТУ, 2012. Вип.12, Т.4. С. 222–229. *Внесок здобувача: аналіз придатності методів оцінки якості гомогенізації для сучасних умов.*

8. Самойчук К.О., Івженко А.О. Експериментальні дослідження диспергування жирової емульсії в пульсаційному апараті з вібруючим ротором // Обладнання та технології харчових виробництв: зб. наук. праць / Донецький національний університет економіки і торгівлі імені Михайла Туган-Барановського. Донецьк: ДонНУЕТ ім. М. Туган-Барановського, 2013. Вип. 30. С. 155–161. *Внесок здобувача: планування та проведення експериментальних досліджень і аналіз отриманих результатів.*

9. Самойчук К.О., Ковальов О.О. Механізм руйнування жирових кульок у струминному гомогенізаторі з роздільним подаванням вершків // Обладнання та технології харчових виробництв: зб. наук. праць / Донецький національний університет економіки і торгівлі імені Михайла Туган-Барановського. Донецьк: ДонНУЕТ ім. М. Туган-Барановського, 2013. Вип. 30. С.148–155. *Внесок здобувача: розробка аналітичної моделі руйнування жирових кульок в струминному гомогенізаторі.*

10. Самойчук К.О., Івженко А.О. Визначення резонансних режимів роботи пульсаційного апарата з вібруючим ротором // Обладнання та технології

харчових виробництв: зб. наук. праць / Донецький національний університет економіки і торгівлі імені Михайла Туган-Барановського. Донецьк: ДонНУЕТ ім. М. Туган-Барановського, 2013. Вип. 31. С. 74–82. *Внесок здобувача: проведення аналітичних досліджень та визначення енергоефективних резонансних режимів пульсаційного апарата з вібруючим ротором.*

11. Самойчук К.О., Івженко А.О. Розрахунок енерговитрат пульсаційного апарата з вібруючим ротором // Наукові праці Одеської національної академії харчових технологій: зб. наук. праць. Одеса: ОНАХТ, 2013. Вип. 43. Т. 2. С. 133–137. *Внесок здобувача: розробка аналітичної моделі енерговитрат пульсаційного апарата.*

12. Самойчук К.О., Ковальов О.О. Аналітичні параметри процесу струминної гомогенізації молока з роздільною подачею вершків // Наукові праці Одеської національної академії харчових технологій: зб. наук. праць. Одеса: ОНАХТ, 2013. Вип. 43. Т. 2. С. 77–81. *Внесок здобувача: розробка аналітичної моделі процесу струминної гомогенізації молока з роздільною подачею вершків на основі критерія Вебера.*

13. Самойчук К.О., Ковальов О.О. Аналіз сил дроблення жирових кульок в струминному гомогенізаторі // Наукові праці Південного філіалу Національного університету біоресурсів і природокористування України «Кримський агротехнологічний університет»: зб. наук. праць. Сімферополь: НУБіП, 2013. Вип. 153. С. 26–34. *Внесок здобувача: визначення основних сил та факторів руйнування жирових кульок в струминному гомогенізаторі.*

14. Самойчук К.О. Івженко А.О. Механізми диспергування жирової фази в пульсаційному апараті з вібруючим ротором // Праці Таврійського державного агротехнологічного університету: зб. наук. праць. Мелітополь: ТДАТУ, 2013. Вип. 13. Т.7. С. 11–20. *Внесок здобувача: аналіз механізмів диспергування, визначення переважних з них для диспергування жирової фази в пульсаційному апараті з вібруючим ротором.*

15. Самойчук К.О., Ковальов О.О. Використання нормалізації у струминному гомогенізаторі молока з роздільною подачею вершків // Праці Таврійського державного агротехнологічного університету: зб. наук. праць. Мелітополь: ТДАТУ, 2014. Вип.14. Т.1. С. 37–45. *Внесок здобувача: визначення можливості, проблем і перспектив використання нормалізації в струминному гомогенізаторі молока з роздільною подачею вершків.*

16. Самойчук К.О., Івженко А.О. Визначення продуктивності пульсаційного апарату з вібруючим ротором // Наукові праці Одеської національної академії харчових технологій: зб. наук. праць. Одеса: ОНАХТ, 2014. Вип. 45. Т. 3. С. 25–30. *Внесок здобувача: розробка математичних залежностей для визначення продуктивності апарата.*

17. Самойчук К.О., Івженко А.О. Определение скорости в модуляторе пульсационного гомогенизатора с вибрирующим ротором // Вестник Могилёвского государственного университета продовольствия. 2014. №1 (16). С. 87–99. **Стаття у виданні Республіки Білорусь.** *Внесок здобувача: розробка математичної моделі швидкості руху емульсії в пульсаційному гомогенізаторі з ротором, що вібрує.*

18. Самойчук К.О., Ковальов О.О. Обґрунтування гідродинамічних параметрів процесу струминної гомогенізації молока з роздільною подачею

вершків // Наукові праці Одеської національної академії харчових технологій: зб. наук. праць. Одеса: ОНАХТ, 2014. Вип. 46. Т.2. С. 314–319. *Внесок здобувача: узагальнення та аналіз гідродинамічних параметрів процесу струминної гомогенізації молока з роздільною подачею вершків.*

19. Самойчук К.О., Івженко А.О. Методика розрахунку пульсаційного гомогенізатора з вібруючим ротором // Збірник наукових праць Вінницького національного аграрного університету: зб. наук. праць. Вінниця: ВНАУ, 2015. Вип. 1 (89). Т. 2. №1. С. 133–138. *Внесок здобувача: узагальнення досліджень пульсаційного гомогенізатора та створення методики розрахунку апарата.*

20. Самойчук К.О., Ковальов О.О., Султанова В.О. Якість та енергетична ефективність процесу струминної гомогенізації молока з роздільною подачею вершків // Праці Таврійського державного агротехнологічного університету: зб. наук. праць. Мелітополь: ТДАТУ, 2015. Вип.15. Т.1. С. 240–248. *Внесок здобувача: постановка завдань досліджень та аналіз енергетичної ефективності процесу струминної гомогенізації.*

21. Самойчук К.О., Івженко А.О. Рівняння зміни площі прохідного перетину модулятора в пульсаційному апараті з вібруючим ротором // Наукові праці Національного університету харчових технологій: зб. наук. праць. Київ: НУХТ, 2015. Т. 21. №4. С. 164–170. *Внесок здобувача: розробка безперервної функції для опису зміни рівняння площі прохідного перетину модулятора роторно-пульсаційного апарата.*

22. Самойчук К.О., Ковальов О.О. Підвищення ефективності струминного гомогенізатору молока з роздільною подачею вершків // Наукові праці Одеської національної академії харчових технологій: зб. наук. праць. Одеса: ОНАХТ, 2015. Вип. 47. Т. 1. С. 67–72. *Внесок здобувача: узагальнення способів підвищення ефективності струминного гомогенізатора, формулювання висновків.*

23. Самойчук К.О., Івженко А.О. Ефективність гомогенізації молока в пульсаційному апараті з вібруючим ротором // Вісник Харківського національного технічного університету сільського господарства імені Петра Василенка: зб. наук. праць. Харків: ХНТУСГ ім. П. Василенка, 2015. Вип. 166. С. 98–104. *Внесок здобувача: ідея використання показника ефективності гомогенізації та аналіз отриманих даних.*

24. Самойчук К.О., Ковалёв, А.А., Бездичный А.А. Моделирование процесса струйной гомогенизации молока с раздельной подачей сливок // Вестник Могилёвского государственного университета продовольствия. 2015. №2 (19).С. 69–76. **Стаття у виданні Республіки Білорусь** *Внесок здобувача: визначення впливу гідродинамічних показників в камері струминного гомогенізатора на процес гомогенізації.*

25. Дейниченко Г.В., Самойчук К.О., Івженко А.О. Синхронізація коливальних і обертальних рухів ротора у пульсаційному гомогенізаторі з вібруючим ротором // Вібрації в техніці та технологіях. 2016. №1 (81). С. 122–131. **Стаття у фаховому виданні України, яке включено до міжнародних наукометричних баз.** *Внесок здобувача: обґрунтування умов синхронізації фаз для підвищення ефективності процесу диспергування емульсії в пульсаційному гомогенізаторі з вібруючим ротором.*

26. Дейниченко Г.В., Самойчук К.О., Івженко А.О., Левченко Л.В. Аналіз конструкцій гомогенізаторів молочної промисловості // Праці Таврійського

державного агротехнологічного університету: зб. наук. праць. Мелітополь: ТДАТУ, 2016. Вип.16. Т.1. С. 9–15. *Внесок здобувача: участь в узагальненні конструкцій і обґрунтування методів підвищення ефективності сучасних гомогенізаторів.*

27. Дейниченко Г.В., Самойчук К.О., Ковальов О.О. Конструкції струминних диспергаторів жирової фази молока // Праці Таврійського державного агротехнологічного університету: зб. наук. праць. Мелітополь: ТДАТУ, 2016. Вип.16. Т.1. С. 219–226. *Внесок здобувача: аналіз конструкцій струминних диспергаторів і визначення найбільш перспективних з них.*

28. Самойчук К.О., Левченко Л.В. Аналітичні дослідження умов диспергування жирової фази молока в пульсаційному гомогенізаторі // Вісник Дніпропетровського державного аграрно-економічного університету. 2016. №1 (39). С. 64–67. *Внесок здобувача: розробка математичних залежностей швидкості та прискорення потоку емульсії з конструктивно-технологічними параметрами пульсаційного гомогенізатора.*

29. Самойчук К.О. Методика расчёта степени дисперсности эмульсий // MOTROL. Commission of Motorization and Energetics in Agriculture. 2016. Vol.18. №. 2. P. 97–102. **Стаття у виданні Республіки Польща, яке включено до міжнародних наукометричних баз.**

30. Дейниченко Г.В., Самойчук К.О., Левченко Л.В. Аналітичні дослідження енерговитрат пульсаційного гомогенізатора молока // Прогресивні техніка та технології харчових виробництв ресторанного господарства і торгівлі: зб. наук. праць / Харківський державний університет харчування та торгівлі. Харків: ХДУХТ, 2016. Вип. 1 (23). С. 170–181. *Внесок здобувача: створення аналітичної моделі для розрахунку енерговитрат пульсаційного гомогенізатора молока.*

31. Самойчук К.О., Ковальов О.О. Механізми диспергування жирових кульок в струминному гомогенізаторі молока // Наукові праці Одеської національної академії харчових технологій: зб. наук. праць. Одеса: ОНАХТ, 2016. Т.80. Вип.1. С. 103–107. *Внесок здобувача: участь у аналізі механізмів диспергування жирових кульок і встановлення переважних з них, формулювання висновків статті.*

32. Дейниченко Г.В., Самойчук К.О., Левченко Л.В. Вплив кратності обробки молочної емульсії в пульсаційному гомогенізаторі // Прогресивні техніка та технології харчових виробництв ресторанного господарства і торгівлі: зб. наук. праць / Харківський державний університет харчування та торгівлі. Харків: ХДУХТ, 2016. Вип. 2 (24). С. 226–233. *Внесок здобувача: створення математичної моделі визначення кратності обробки в пульсаційному гомогенізаторі.*

33. Samoichuk K., Kiurchev S., Oleksienko V., Palyanichka N., Verholantseva V. Investigation of homogenization of milk in a pulsation machine with a vibrating rotor // Eastern-European Journal of Enterprise Technologies. 2016. №6/11 (84). P. 16–21. **Стаття у фаховому виданні України, яке включено до міжнародних наукометричних баз (SCOPUS та інших).** *Внесок здобувача: участь у проведенні експериментальних досліджень та визначення коефіцієнта диспергування для пульсаційного гомогенізатора з ротором, що вібрує.*

34. Samoichuk K., Kiurchev S., Oleksiienko V., Palyanichka N., Verholantseva V. Research into usage efficiency of the pulsation machine with a vibrating rotor for milk homogenization // EUREKA: Life Sciences. 2016. Vol. 6, P. 3–10. **Стаття у виданні Естонської Республіки, яке включено до міжнародних наукометричних баз.** *Внесок здобувача: планування досліджень і узагальнення їх результатів, встановлення зв'язку між прискоренням руху емульсії та дисперсністю для пульсаційного гомогенізатора з ротором, що вібрує.*

35. Дейниченко Г.В., Самойчук К.О., Левченко Л.В. Аналітичне визначення дисперсності при обробці молока в пульсаційному гомогенізаторі // Вісник Харківського національного технічного університету сільського господарства імені Петра Василенка: зб. наук. праць. Харків: ХНТУСГ ім. П. Василенка. Харків, 2016. Вип. 179. С. 32–39. *Внесок здобувача: створення математичної моделі для визначення середнього розміру жирових кульок при диспергуванні емульсії в пульсаційному поршньовому гомогенізаторі.*

36. Дейниченко Г.В., Самойчук К.О., Ковальов О.О., Пацький І.Ю. Дослідження діаметру каналу подавання вершків струминного гомогенізатора молока // Праці Таврійського державного агротехнологічного університету: зб. наук. праць. Мелітополь: ТДАТУ, 2017. Вип. 17. Т. 1 С. 195–205. *Внесок здобувача: планування досліджень та узагальнення отриманих результатів зі встановлення впливу діаметра каналу в струминному гомогенізатора молока.*

37. 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. С. 129–142. *Внесок здобувача: визначення впливу пристінного шару на процес гомогенізації молока в струминному диспергаторі.*

38. Дейниченко Г.В., Самойчук К.О., Левченко Л.В. Ефективність гомогенізації молока у пульсаційному гомогенізаторі // Вібрації в техніці та технологіях. 2017. №1 (84). С. 116–121. **Стаття у фаховому виданні України, яке включено до міжнародних наукометричних баз.** *Внесок здобувача: встановлення впливу конструктивно-кінематичних параметрів на процес гомогенізації молока у пульсаційному гомогенізаторі.*

39. Дейниченко Г.В. Самойчук К.О., Паляничка Н.О., Левченко Л.В. Визначення впливу подачі молока в пульсаційному гомогенізаторі // Техніка, енергетика, транспорт АПК. 2017. №3 (98). С. 12–17. *Внесок здобувача: проведення аналітичних досліджень з впливу подачі молока на ефективність пульсаційного гомогенізатора.*

40. Kovalyov A., Samoichuk K., Palyanichka N., Verkholyantseva V., Yanakov V. Experimental investigations of the parameters of the jet milk homogenizer with separate cream supply // Technology audit and production reserves. 2017. №2/3 (34). P. 33–38. **Стаття у фаховому виданні України, яке включено до міжнародних наукометричних баз.** *Внесок здобувача: планування теоретичних і експериментальних досліджень та узагальнення результатів з впливу гідродинамічних параметрів на процес диспергування жирової фази молочної емульсії.*

41. Самойчук К.О. Прискорення емульсії як основний фактор гідродинамічного диспергування жирової фази молока // Прогресивні техніка та технології харчових виробництв ресторанного господарства і торгівлі: зб. наук. праць / Харківський державний університет харчування та торгівлі. Харків: ХДУХТ, 2017. Вип. 2 (26). С.210–220. **Стаття у фаховому виданні України, яке включено до міжнародних наукометричних баз.**

42. Самойчук К.О. Багатократна і багатоступінчаста гомогенізація молока // Праці Таврійського державного агротехнологічного університету: зб. наук. праць. Мелітополь: ТДАТУ, 2018. Вип. 18. Т.1 С. 22–28.

43. Самойчук К.О., Левченко Л.В., Циб В.Г. Обґрунтування параметрів отворів поршня пульсаційного гомогенізатора молока // Праці Таврійського державного агротехнологічного університету: зб. наук. праць. Мелітополь: ТДАТУ, 2018. Вип. 18. Т.1. С. 274–280. *Внесок здобувача: участь у визначенні впливу параметрів отворів поршня пульсаційного поршньового гомогенізатора на ефективність його роботи.*

44. Самойчук К.О., Паляничка Н.О., Верхоланцева В.О., Янович В.П. Вібраційні гомогенізатори молока // Вібрації в техніці та технологіях. 2018. №1 (88). С. 77–82. **Стаття у фаховому виданні України, яке включено до міжнародних наукометричних баз.** *Внесок здобувача: аналіз конструкцій та можливостей використання вібраційних гомогенізаторів молока.*

45. Гомогенізатор для рідких продуктів: пат. на корисну модель 66085 Україна / Гвоздев О.В, Паляничка Н.О., Самойчук К.О., Бездітний А.О., Кучеренко В.В. № 201106224; заявл. 18.05.11; опубл. 26.12.11, Бюл. № 24. 3 с. *Внесок здобувача: ідея винаходу та участь у розробці технічного рішення її реалізації.*

46. Струминний гомогенізатор молока з роздільною подачею вершків: пат. на корисну модель 94041 Україна / Самойчук К.О., Ковальов О.О., Ялпачик Ф.Ю. № 201405239; заявл. 19.05.14; опубл. 27.10.14, Бюл. № 20. 3 с. *Внесок здобувача: ідея винаходу та участь у розробці технічного рішення її реалізації.*

47. Спосіб гомогенізації та нормалізації молока: пат. на корисну модель 94048 Україна / Самойчук К.О., Ковальов О.О., Ялпачик Ф.Ю. № 201405343; заявл. 19.05.14; опубл. 27.10.14, Бюл. № 20. 4 с. *Внесок здобувача: ідея винаходу та участь у розробці технічного рішення її реалізації.*

48. Головка гомогенізатора: пат. на корисну модель 98488 Україна / Самойчук К.О., Султанова В.О., Ялпачик Ф.Ю. № 201412958; заявл. 03.12.14; опубл. 27.04.15, Бюл. № 8. 4 с. *Внесок здобувача: ідея винаходу та участь у розробці технічного рішення її реалізації.*

49. Струминний гомогенізатор молока з роздільною подачею вершків: пат. на корисну модель 106522 Україна / Самойчук К.О., Дейниченко Г.В., Ковальов О.О. № 201511244; заявл. 16.11.15; опубл. 25.04.16, Бюл. № 8. 4 с. *Внесок здобувача: ідея винаходу та участь у розробці технічного рішення її реалізації.*

50. Головка гомогенізатора: пат. на корисну модель 106521 Україна / Самойчук К.О., Дейниченко Г.В., Султанова В.О., Ялпачик Ф.Ю. № 201511243; заявл. 16.11.15; опубл. 25.04.16, Бюл. № 8. 6 с. *Внесок здобувача: ідея винаходу та участь у розробці технічного рішення її реалізації.*

51. Головка гомогенізатора: пат. на корисну модель 106533 Україна / Самойчук К.О., Дейниченко Г.В., Панов А.В. № 201511335; заявл. 17.11.15;

опубл. 25.04.16, Бюл. № 8. 4 с. *Внесок здобувача: ідея винаходу та участь у розробці технічного рішення її реалізації.*

52. Головка гомогенізатора: пат. на корисну модель 106536 Україна / Самойчук К.О., Дейниченко Г.В., Панов А.В. № 201511347; заявл. 17.11.15; опубл. 25.04.16, Бюл. № 8. 4 с. *Внесок здобувача: ідея винаходу та участь у розробці технічного рішення її реалізації.*

53. Роторно-пульсаційний апарат з ротором, що вібрує: пат. на корисну модель 106554 Україна / Самойчук К.О., Івженко А.О., Ялпачик Ф.Ю., Султанова В.О. № 201511568; заявл. 23.11.15; опубл. 25.04.16, Бюл. № 8. 4 с. *Внесок здобувача: ідея винаходу та участь у розробці технічного рішення її реалізації.*

54. Роторно-пульсаційний апарат з ротором, що вібрує: пат. на корисну модель 107458 Україна / Самойчук К.О., Івженко А.О., Ялпачик Ф.Ю., Султанова В.О. № 201511506; заявл. 23.11.15; опубл. 10.06.16, Бюл. № 11. 5 с. *Внесок здобувача: ідея винаходу та участь у розробці технічного рішення її реалізації.*

55. Клапанна головка гомогенізатора: пат. на корисну модель 112317 Україна / Кюрчев В.М., Воробйова О.В., Самойчук К.О. № 201606459; заявл. 13.06.16; опубл. 12.12.16, Бюл. № 23. 3 с. *Внесок здобувача: ідея винаходу та участь у розробці технічного рішення її реалізації.*

56. Струминний гомогенізатор молока з роздільною подачею вершків: пат. на корисну модель 119871 Україна / Кюрчев В.М., Дейниченко Г.В., Самойчук К.О., Пацький І.Ю. № 201704300; заявл. 03.05.17; опубл. 10.10.17, Бюл. № 19. 5 с. *Внесок здобувача: ідея винаходу та участь у розробці технічного рішення її реалізації.*

57. Гомогенізатор для рідких продуктів: пат. на корисну модель 121278 Україна / Кюрчев В.М., Самойчук К.О., Марченко О.С., Левченко Л.В. № 201706676; заявл. 27.06.17; опубл. 27.11.17, Бюл. № 22. 6 с. *Внесок здобувача: ідея винаходу та участь у розробці технічного рішення її реалізації.*

58. Роторно-пульсаційний апарат з ротором, що вібрує: пат. на корисну модель 121949 Україна / Кюрчев В.М., Дейниченко Г.В., Самойчук К.О., Пацький І.Ю. № 201705629; заявл. 07.06.17; опубл. 26.12.17, Бюл. № 24. 6 с. *Внесок здобувача: ідея винаходу та участь у розробці технічного рішення її реалізації.*

59. Струминний гомогенізатор молока з роздільною подачею вершків: пат. на корисну модель 122548 Україна / Кюрчев В.М., Самойчук К.О., Ковальов О.О., Пацький І.Ю. № 201708561; заявл. 21.08.17; опубл. 10.01.18, Бюл. № 1. 5 с. *Внесок здобувача: ідея винаходу та участь у розробці технічного рішення її реалізації.*

60. Самойчук К.О., Ковальов О.О. Струминний гомогенізатор з роздільною подачею вершків // Проблеми харчових технологій і харчування. сучасні виклики і перспективи розвитку: тези доповідей VII міжнар. наук.-практ. конф., 7–9 вер. 2011 р. Донецьк: ДонНУЕТ ім. М. Туган-Барановського, 2011. С 172–175. *Внесок здобувача: обґрунтування конструктивного рішення ефективного струминного гомогенізатора та формулювання висновків.*

61. Паляничка Н. О., Гвоздев О.В., Самойчук К. О. Експериментальне обґрунтування ефективності використання імпульсної гомогенізації молока //

Проблеми харчових технологій і харчування. Сучасні виклики і перспективи розвитку: тези доповідей VII міжнар. наук.-практ. конф., 7–9 вер. 2011 р. Донецьк: ДонНУЕТ ім. М. Туган-Барановського, 2011. С. 163–166. *Внесок здобувача: розробка критеріїв ефективності і аналіз результатів експериментальних досліджень.*

62. Паляничка Н.О., Гвоздєв О.В., Самойчук К.О. Визначення енерговитрат на процес імпульсної гомогенізації молока // Состояние, достижения и перспективы переработки, стандартизации и сертификации материалов: матеріали міжнар. наук.–практ. конф., 25–27 вер. 2012 р. Херсон: ХДАУ, 2012. С. 47–48. *Внесок здобувача: Участь у розробці аналітичних залежностей енерговитрат в імпульсному гомогенізаторі.*

63. Самойчук К.О., Ковальов О.О. Теоретичні основи диспергування в струминному гомогенізаторі молока // Прогресивна техніка та технології харчових виробництв, ресторанного та готельного господарств і торгівлі. Економічна стратегія і перспективи розвитку сфери торгівлі та послуг: тези доповідей міжнар. наук.–практ. конф., 19 лист. 2013 р. Харків: ХДУХТ, 2013. Ч. I. С. 382–384. *Внесок здобувача: побудова математичної моделі диспергування в струминному гомогенізаторі молока.*

64. Дейниченко Г.В., Самойчук К.О. Підвищення ефективності процесу гомогенізації молока в пульсаційному гомогенізаторі з вібруючим ротором // Інноваційні аспекти розвитку обладнання харчової і готельної індустрії в умовах сучасності: тези доповідей міжнар. наук.–практ. конф., 8–11 вер. 2015 р. Мелітополь–Кирилівка: ХДУХТ, 2015. С. 384–386. *Внесок здобувача: аналіз методів підвищення ефективності процесу гомогенізації молока в пульсаційному гомогенізаторі з вібруючим ротором.*

65. Самойчук К.О., Івженко А.О., Султанова В.О. Дослідження імпульсного гомогенізатора молока // Інноваційні аспекти розвитку обладнання харчової і готельної індустрії в умовах сучасності: тези доповідей міжнар. наук.–практ. конф., 8–11 вер. 2015 р. Мелітополь–Кирилівка: ХДУХТ, 2015. С. 91–92. *Внесок здобувача: проведення аналітичних досліджень імпульсного гомогенізатора молока з одним поршнем.*

66. Самойчук К.О., Ковальов О.О. Струминний гомогенізатор–нормалізатор молока // Інноваційні аспекти розвитку обладнання харчової і готельної індустрії в умовах сучасності: тези доповідей міжнар. наук.–практ. конф., 8–11 вер. 2015 р. Мелітополь–Кирилівка: ХДУХТ, 2015. С. 93–94. *Внесок здобувача: аналіз особливостей використання струминного гомогенізатора–нормалізатора молока.*

67. Самойчук К.О., Ковальов О.О. Підвищення ефективності струминного гомогенізатору молока з роздільною подачею вершків // Інноваційні енерготехнології: збірник праць V міжнар. наук.–практ. конф., 7–11 вер. 2015 р. Одеса: ОНАХТ, 2015. С. 246–251. *Внесок здобувача: аналіз методів підвищення ефективності струминного гомогенізатора молока.*

68. Самойчук К.О., Ковальов О.О. Механізми диспергування жирових кульок в струминному гомогенізаторі молока // Удосконалення процесів і обладнання харчових та хімічних виробництв: збірник праць XVI міжнар. наук.–практ. конф., 5–9 вер. 2016 р. Одеса: ОНАХТ, 2016. С. 81–85. *Внесок здобувача: участь у аналізі механізмів диспергування жирових кульок в струминному гомогенізаторі молока, формулювання висновків.*



69. Дейниченко Г.В., Самойчук К.О., Ковальов О.О. Струминні гомогенізатори молока // Розвиток харчових виробництв, ресторанного та готельного господарств і торгівлі: проблеми, перспективи, ефективність: матеріали міжнар. наук.–практ. конф., 19 травня 2016 р. Харків: ХДУХТ, 2016. С. 274–276. *Внесок здобувача: розробка енергоефективної схеми струминного гомогенізатора з роздільним подаванням жирової фази.*

70. Самойчук К.О., Паляничка Н.О. Підвищення ефективності діяльності молокопереробних підприємств за рахунок впровадження нових типів гомогенізаторів // Підвищення ефективності діяльності підприємств харчової та переробної галузей АПК: матеріали V Всеукраїнської наук.–практ. конф., 17–18 лист. 2016 р. Київ: НУХТ, 2016. С. 210–211. *Внесок здобувача: аналіз можливостей і результатів використання енергоефективних гомогенізаторів.*

71. Самойчук К.О., Паляничка Н.О., Верхоланцева В.О. Гомогенізація жирової фази молока в пульсаційному апараті з ротором, що вібрує. Фундаментальні та прикладні дослідження у сучасній науці // збірник матер. IV наук. конф., 30 жовт. 2016 р. Харків: «Технологический центр», 2016. С. 86–87. *Внесок здобувача: проведення досліджень і аналіз результатів гомогенізації молока в пульсаційному апараті з ротором, що вібрує.*

72. Воробйова О.В., Левченко Л.В., Самойчук К.О. Аналітичні дослідження енергетичної ефективності використання пульсаційного гомогенізатора молока // Перспективи розвитку сучасної науки: матеріали IV міжнар. наук.–практ. конф., 2–3 грудня 2016 р. Львів: Видавничий дім «Гельветика», 2016. Ч. 1. С. 80–83. *Внесок здобувача: розробка критеріїв енергоефективності пульсаційного гомогенізатора та узагальнення результатів досліджень.*

73. Самойчук К.О. Шляхи енергозбереження при гомогенізації молока // Проблеми та перспективи сталого розвитку АПК: матеріали міжнар. наук.–практ. конф., 14–15 квітня 2016 р. Мелітополь: ТДАТУ, 2016. С. 89–90.

74. Дейниченко Г.В., Самойчук К.О. Перспективные конструкции гомогенизаторов молока // Озиқ-овқат ва кимёсанотида чиқиндисиз ва экологик самарадор технологияларни кўллаш: мавзусида Республика миқёсидаги илмий-амалий анжуман иштирокчиларининг илмий маъруза материаллари киритилган, 14 марта 2017 р. Наманган шаҳри: НамМПИ, 2017. С. 146–148. *Внесок здобувача: аналіз перспективних конструкцій гомогенізаторів молока.*

75. Самойчук К.О., Ковальов О.О., Левченко Л.В. Перспективні способи диспергування жирової фази молока // Розвиток харчових виробництв, ресторанного та готельного господарств і торгівлі: проблеми, перспективи, ефективність: тези доповідей міжнар. наук.–практ. конф., 18 травня 2017 р. Харків: ХДУХТ, 2017. Ч. 1. С. 280–281. *Внесок здобувача: участь у аналізі та описі перспективних способів диспергування жирової фази молока.*

76. Ковальов О.О., Левченко Л.В., Самойчук К.О. Енергетичні витрати перспективних конструкцій гомогенізаторів молока // Наукові здобутки у вирішенні актуальних проблем виробництва та переробки сировини, стандартизації і безпеки продовольства: збірник праць за підсумками VII

міжнар. наук.–практ. конф., 27–28 квітня 2017 р. Київ: НУБІП, 2017. С. 315–316. *Внесок здобувача: участь у проведенні досліджень по визначенню енергоефективності перспективних гомогенізаторів молока.*

77. Самойчук К.О., Паляничка Н.О. Методи аналізу зображень при визначенні дисперсійних характеристик мікро-емульсій методом оптичного мікроскопування // *Фундаментальна підготовка фахівців у природничо-математичній, технічній, агротехнологічній та економічній галузях: матеріали всеукраїнської наук.–практ. конф. з міжнародною участю, 11–13 вер. 2017 р. Мелітополь: ТДАТУ, 2017. С. 140–142. Внесок здобувача: участь у узагальненні методів аналізу зображень та формулювання висновків.*

78. Самойчук К.О. Визначення універсального фактора диспергування жирової фази молока // *Інноваційні аспекти розвитку обладнання харчової і готельної індустрії в умовах сучасності: матеріали другої міжнар. наук.–практ. конф., 5–7 вер. 2017 р. Харків: ХДУХТ, 2017. С. 17–19.*

79. Дейниченко Г.В., Самойчук К.О., Левченко Л.В. Теоретичні дослідження пульсаційної гомогенізації молока // *Інноваційні аспекти розвитку обладнання харчової і готельної індустрії в умовах сучасності: матеріали другої міжнар. наук.–практ. конф., 5–7 вер. 2017 р. Харків: ХДУХТ, 2017. С. 42–43. Внесок здобувача: розробка теоретичної моделі пульсаційної гомогенізації.*

80. 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: матеріали другої міжнар. наук.–практ. конф., 5–7 вер. 2017 р. Харків: ХДУХТ, 2017. С. 44–45. Внесок здобувача: узагальнення результатів досліджень по визначенню раціональних параметрів струминних диспергаторів молочних емульсій.*

81. Самойчук К.О., Паляничка Н.О., Верхованцева В.О., Левченко Л.В. Перспективи використання вібраційних гомогенізаторів молока // *Вібрації в техніці та технологіях: збірник тез доповідей XVI міжнар. наук.–практ. конф., 26–27 жовт. 2017 р. Вінниця: ВНАУ, 2017. С. 36–38. Внесок здобувача: участь у описі вібраційних гомогенізаторів молока та перспектив їх використання.*

82. Дейниченко Г.В., Самойчук К.О., Л.В. Левченко. Перспективи використання пульсаційного гомогенізатора-диспергатора емульсій // *Проблеми конструювання, виробництва та експлуатації сільськогосподарської техніки: матеріали XI міжнар. наук.–практ. конф., 1–3 лист. 2017 р. Кропивницький: ЦНТУ, 2017. С. 17–19. Внесок здобувача: участь у описі пульсаційних гомогенізаторів-диспергаторів емульсій та перспектив їх використання.*

83. Самойчук К.О. Кратність гомогенізації молока // *Інноваційні технології виробництва та переробки тваринницької продукції: матеріали міжнар. наук.–практ. інтернет–конф., 12 груд. 2017 р. Вінниця: ВНАУ, 2017. С. 170–172.*

84. Самойчук К.О., Паляничка Н.П., Верхованцева В.О., Левченко Л.В. Методика розрахунку потужності пульсаційного гомогенізатора молока // *Modern methods, innovations and experience of practical application in the field of technical sciences: Conference proceedings: international research and practice*

conference, 27–28 grudzień 2017 p. Lublin : Izdevnieciba «Baltija Publishing», 2017. С. 176–179. *Внесок здобувача: побудова математичної моделі визначення потужності пульсаційного гомогенізатора молока.*

85. Самойчук К.О., Ковальов О.О., Левченко Л.В. Методика розрахунку дисперсності молочної емульсії в пульсаційному і струминному гомогенізаторах // Соціально–економічний розвиток аграрної сфери: інженерно-економічне забезпечення: матеріали міжнар. наук.–практ. конф., 19–20 квітня 2018 р. Бережани: «Бережанський агротехнічний інститут», 2018. С. 314–316. *Внесок здобувача: участь у розробці методика розрахунку дисперсності молочної емульсії в пульсаційному і струминному гомогенізаторах.*

86. Самойчук К.О., Левченко Л.В., Паляничка Н.О. Вплив амплітуди і частоти коливань поршня пульсаційного гомогенізатора на дисперсність жирової фази молока // The development of technical Sciences: problems and solutions: the international research and practical conference 27–28 april 2018 y. Brno: Baltija Publishing, 2018. С. 72–75. *Внесок здобувача: здійснення планування експериментальних досліджень та узагальнення отриманих результатів.*

87. Загорко Н.П., Самойчук К.О., Левченко Л.В. Експериментальне визначення кратності обробки в пульсаційному гомогенізаторі молока // Агроекологічні аспекти виробництва та переробки продукції сільського господарства: матеріали міжнар. наук.–практ. конф., 7–8 червня 2018 р. Мелітополь–Кирилівка: ТДАТУ, 2018. – С. 43. *Внесок здобувача: Виконане планування експериментальних досліджень та узагальнення отриманих результатів.*

88. Самойчук К.О. Інноваційні технології гомогенізації в галузі виробництва молока та переробки молочної продукції // Агроекологічні аспекти виробництва та переробки продукції сільського господарства: матеріали міжнар. наук.–практ. конф., 7–8 червня 2018 р. Мелітополь–Кирилівка: ТДАТУ, 2018. – С. 59.

89. Розрахунки обладнання харчових виробництв: практикум / В.Ф. Ялпачик, С.Ф. Буденко, Ф.Ю. Ялпачик, О.В. Гвоздев, В.Г. Циб, В.С. Бойко, К.О. Самойчук та ін. Мелітополь: Видавничий будинок ММД, 2014. 264 с. *Внесок здобувача: розробка методики розрахунку гомогенізаторів молока.*

90. Машини, обладнання та їх використання при переробці сільськогосподарської продукції: практикум / В.Ф. Ялпачик, В.О. Олексієнко, Ф.Ю. Ялпачик, К.О. Самойчук та ін. Мелітополь: Видавничий будинок ММД, 2015. 196 с. *Внесок здобувача: розробка і створення методики лабораторних робіт для дослідження гомогенізаторів молока.*

91. Технологічне обладнання для переробки продукції тваринництва: лабор. практикум / В.Ф. Ялпачик, Н.П. Загорко, Н.О. Паляничка, С.Ф. Буденко, К.О. Самойчук та ін. Мелітополь: Видавничий будинок ММД, 2017. 276 с. *Внесок здобувача: аналіз перспективного технологічного обладнання для механічних процесів переробки молока.*

## АНОТАЦІЯ

Самойчук К.О. Развитие научных основ гидродинамического диспергирования молочных эмульсий. – Рукопись.

Дисертація на здобуття наукового ступеня доктора технічних наук за спеціальністю 05.18.12 – процеси та обладнання харчових, мікробіологічних та фармацевтичних виробництв. – Харківський державний університет харчування та торгівлі Міністерства освіти і науки України, Харків, 2018.

Дисертацію присвячено вирішенню важливої наукової проблеми підвищення ефективності виробництва питного молока і молочних продуктів, які виробляються з використанням гомогенізації, шляхом розвитку наукових основ гідродинамічного диспергування молочних емульсій.

Розроблено теорію гідродинамічного диспергування жирової фази молока на підставі визначення прискорення потоку емульсії, яке може бути універсальним параметром, який визначає руйнування жирових часток емульсій для більшості типів гомогенізаторів молока. На основі нової теорії розроблені математичні моделі гідродинамічного диспергування молочного жиру в пульсаційному апараті з ротором, що вібрує і пульсаційному поршньовому гомогенізаторах молока.

Розроблена математична модель гідродинамічного диспергування молочного жиру, яка основана на визначенні швидкості жирової кульки відносно дисперсійного середовища в струминному гомогенізаторі молока з роздільною подачею жирової фази при використанні одночасної нормалізації молока за жирністю.

Введений показник – «коефіцієнт гомогенізації», який пов'язує прискорення руху емульсії з середнім діаметром жирової частки молочної емульсії, що дозволяє кількісно характеризувати додаткові умови ефективності процесу диспергування жирової фази молока.

На основі нових математичних моделей гомогенізації розроблені промислові зразки пульсаційного апарата з ротором, що вібрує, пульсаційного поршньового та струминного гомогенізатора з роздільною подачею жирової фази, які дозволяють отримати молочну емульсію з середнім розміром жирових кульок 0,8 мкм і при цьому мають у 4,9–6,7 рази менші питомі енерговитрати.

**Ключові слова:** диспергування емульсії, гомогенізація, молочна емульсія, руйнування жирових кульок, прискорення емульсії, гомогенізатор, теорія гомогенізації.

## АННОТАЦИЯ

Самойчук К.О. Развитие научных основ гидродинамического диспергирования молочных эмульсий. – Рукопись.

Диссертация на соискание научной степени доктора технических наук по специальности 05.18.12 – процессы и оборудование пищевых, микробиологических и фармацевтических производств. Харьковский государственный университет питания и торговли Министерства образования и науки Украины, Харьков, 2018.

Диссертация посвящена решению важной научной проблемы повышения эффективности производства питьевого молока и молочных продуктов,

которые производятся с использованием гомогенизации, путем развития научных основ гидродинамического диспергирования молочных эмульсий.

Разработана теория гидродинамического диспергирования жировой фазы молока основанная на определении ускорения потока эмульсии, которое может быть универсальным параметром, определяющим разрушение жировой фазы эмульсии для большинства типов гомогенизаторов молока. На основе новой теории разработаны математические модели гидродинамического диспергирования молочного жира в пульсационном аппарате с вибрирующим ротором и пульсационном поршневом гомогенизаторах молока.

Разработана математическая модель гидродинамического диспергирования молочного жира, которая основана на определении скорости жирового шарика относительно дисперсионной среды в струйном гомогенизаторе молока с отдельной подачей жировой фазы при использовании одновременной нормализации молока за жирностью.

Введён показатель «коэффициент гомогенизации», связывающий ускорение движения эмульсии со средним диаметром жировой фазы молочной эмульсии, который позволяет количественно характеризовать дополнительные условия эффективности процесса диспергирования молочного жира.

На основе новых математических моделей гомогенизации разработаны промышленные образцы пульсационного аппарата с вибрирующим ротором, пульсационного поршневого и струйного гомогенизатора с отдельной подачей жировой фазы, позволяющие получить молочную эмульсию со средним размером жировых шариков 0,8 мкм, которые при этом имеют в 4,9–6,7 раз меньшие удельные энергозатраты.

**Ключевые слова:** диспергирование эмульсии, гомогенизация, молочная эмульсия, разрушение жировых шариков, ускорение эмульсии, гомогенизатор, теория гомогенизации.

## ANNOTATION

Samoichuk K.O. Development of Scientific Bases of the Hydrodynamic Dispergating of Milk Emulsions. – Manuscript.

Dissertation for the Doctor's Degree of Technical Sciences on Speciality 05.18.12 – Processes and Equipment of Food, Microbiological and Pharmaceutical Industries. – Kharkiv State University of Food Technology and Trade of the Ministry of Education and Science of Ukraine, Kharkiv, 2018.

The work is aimed at solving an important scientific issue to increase efficiency of production of drinkable milk and dairies, which are produced with the use of homogenization, via development of scientific bases of the hydrodynamic dispergating of milk emulsions.

Main mechanisms of dispergating of milk fat were defined on the basis of analysis of the recent researches in the sphere of homogenization of emulsions: Kelvin-Helmholtz and Riley-Taylor. Common for these mechanisms is creation of hydrodynamic conditions in the working areas of homogenizers, which promote the increase of relative speed of dispersed and continuous phases and acceleration of stream of milk emulsion. These summarizing factors of homogenization allow promoting development and optimization of design of the stream homogenizers with a separate

supply of the fat phase (SHSSFP), pulsation machine with a vibrating rotor (PM with VR) and pulsation reciprocating homogenizer (PRH).

The dependences are received that link the acceleration of movement of milk emulsion, slide velocity of the fat globule (its velocity relative to surrounding plasma), average diameter of the fat globule after hydrodynamic dispergating and Weber criterion. It is indicated that acceleration of movement of emulsion is a parameter which can become universal – unifying factor of disruption of fat particles of emulsions for most types of homogenizers. An index had been introduced – «coefficient of homogenization» which binds the acceleration of movement of emulsion to the average diameter of the fat particle of milk emulsion. It characterizes physical and mechanical properties of the emulsion and allows prognosticating efficiency of homogenizers of milk. The mathematical model of dispergating fat phase of milk in the pulsation homogenizer with one piston and the PM with VR had been built. Analytical interrelation had been received between the multiplicity of treatment and design and kinematics indexes of PRH and their influence on energy consumption and degree of dispergating of milk fat had been prognosticated. It describes the stages of developing continuous mathematical function of the process of area variation of the flow area of the interrupter of the rotor pulsation machine. On this basis the mathematical model of the hydrodynamic dispergating of fat phase of milk emulsion in PM with VR had been worked out for energy effective-resonance modes of operation.

The rational design and technological and hydraulic values of PM with VR, SHSSFP and PRH had been determined for achieving high degree of dispersion of milk emulsion at minimal specific energy consumption.

Conducted experimental researches indicate the determining role of velocity of flowing milk plasma around the fat globule in the process of dispergating of milk fat in SHSSFP on Weber criterion. Experimental data of the coefficient of stream homogenization had been received. They enabled to set the rational parameters of process of SHSSFP and define the value of Weber criterion for homogenization of milk. The conducted researches of PRH and PM with VR proved the analytical model of dispergating of fat phase of milk in the pulsation homogenizers. The values of homogenization coefficients for SHSSFP, PRH and PM with VR had been experimentally estimated. Considerable increase of homogenization efficiency was observed when conditions were created for the resonance phenomena in PM with VR. The results of the study on estimating required multiplicity of emulsion passing through the piston holes of PRH are obtained. Optimization of design, kinematics and technological indexes of SHSSFP, PRH and PM with VR is conducted aiming to decrease energy consumption at achieving required degree of dispergating of milk emulsion.

Design procedures are given on design, technological and power parameters of operation of SHSSFP, PRH and PM with VR. The synthesis of prospective design decisions of hydrodynamic dispergators is presented. The industrial prototypes of SHSSFP, PRH and PM with VR had been developed. They produce the emulsion with the average diameter of fat globules of 0.8  $\mu\text{m}$  and have 4.9–6.7 times lesser specific energy consumption than homogenizers of milk in industrial use.

**Keywords:** Emulsion Dispergating, Homogenization, Milk Emulsion, Fat Globules Disruption, Emulsion Acceleration, Homogenizer, Homogenization Theory.



Підписано до друку 31.10.2018 р.  
Формат 148×210. Папір офсетний.  
Замовлення № 173 від 1.11.2018 р.  
Обсяг 2,8 ум. друк. арк. Тираж 130.

---

Надруковано у копії-центрі "X-terra" (ФОП Ландар Сергій Миколайович)  
м. Мелітополь, вул. Університетська 55/3, 72312, Україна.  
Тел. 097-411-0-114. E-mail: x-terra@ukr.net