

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ

Таврійський державний агротехнологічний університет
імені Дмитра Моторного



ТАВРІЙСЬКИЙ ДЕРЖАВНИЙ
АГРОТЕХНОЛОГІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ
ІМЕНІ ДМИТРА МОТОРНОГО

Науковий вісник
Таврійського державного агротехнологічного університету



Випуск 13, том 1

Електронне наукове фахове видання

Запоріжжя – 2023 р.

УДК 60/68(08)

T 13

Науковий вісник Таврійського державного агротехнологічного університету:
електронне наукове фахове видання / ТДАТУ; гол. ред. д.т.н., проф. В. М.
Кюрчев. – Запоріжжя: ТДАТУ, 2023. – Вип. 13, том 1. – 516 с.

ISSN 2220-8674

Друкується за рішенням Вченої Ради ТДАТУ,
Протокол № 10 від 21 квітня 2023 р.

Представлені результати наукових досліджень вчених у галузях галузевого машинобудування, енергетики, електротехніки, електромеханіки, харчових технологій, комп'ютерних наук та інформаційних технологій.

Видання призначене для наукових працівників, викладачів, інженерно-технічного персоналу і здобувачів вищої освіти, які спеціалізуються у відповідних або суміжних галузях науки та напрямках виробництва.

Реферативні бази: Crossref, Google Scholar, AGRIS, НБУ ім. В. І. Вернадського.

Редакційна колегія:

Головний редактор

Кюрчев В. М. чл.-кор. НААН України, д.т.н., проф. (Україна)

Заступник головного редактора

Надикто В. Т. – чл.-кор. НААН України, д.т.н., проф. (Україна)

Панченко А. І. – д.т.н., проф. (Україна)

Відповідальний секретар

Волошина А. А. – д.т.н., проф. (Україна)

Технічний секретар

Погорельцева Д. О. (Україна)

Євлаш В. В. – д.т.н., проф. (Україна)

Журавель Д. П. – д.т.н., проф. (Україна)

Квітка С. О. – к.т.н., доц. (Україна)

Кувачов В. П. – д.т.н., проф. (Україна)

Кузнецов М. П. – д.т.н., с.н.с. (Україна)

Кюрчев С. В. – д.т.н., проф. (Україна)

Лисенко В. П. – д.т.н., проф. (Україна)

Лисенко О. В. – д.т.н., проф. (Україна)

Лисиченко М. Л. – д.т.н., проф. (Україна)

Ломейко О. П. – к.т.н., доц. (Україна)

Лубко Д. В. – к.т.н., доц. (Україна)

Малкіна В. М. – д.т.н., проф. (Україна)

Мацулевич О. Є. – к.т.н., доц. (Україна)

Мірошник О. О. – д.т.н., професор (Україна)

Паламарчук І. П. – д.т.н., проф. (Україна)

Пилипенко Л. М. – д.т.н., проф. (Україна)

Пріс О. П. – д.т.н., проф. (Україна)

Самойчук К. О. – д.т.н., проф. (Україна)

Сердюк М. Є. – д.т.н., проф. (Україна)

Сидоренко О. С. – к.т.н., доц. (Україна)

Скляр О. Г. – к.т.н., проф. (Україна)

Скляр Р. В. – к.т.н., доц. (Україна)

Тітова О. А. – д.пед.н., проф. (Україна)

Холодник Ю. В. – к.т.н., доц. (Україна)

Шоман О. В. – д.т.н., проф. (Україна)

Ялпачик В. Ф. – д.т.н., проф. (Україна)

Beloev Hristo – Dr., professor (Bulgaria)

Ivanovs Semjons – PhD (Latvia)

Olt Jüri – PhD, professor (Eesti)

Pascuzzi Simone – Associate Professor (Italia)

Pavol Findura – PhD, professor (Slovakia)

Szafraniec Andrzej – Dr., professor (Poland)

Qawaqzeh Mohamed – PhD (Jordan)

Вершков О. О. – к.т.н., доц. (Україна)

Гавриленко Є. А. – д.т.н., проф. (Україна)

Галько С. В. – к.т.н., доц. (Україна)

Гнатушенко В. В. – д.т.н., проф. (Україна)

Гумен О. М. – д.т.н., проф. (Україна)

Дейниченко Г. В. – д.т.н., проф. (Україна)

Дідур В. В. – д.т.н., проф. (Україна)

Відповідальний за випуск - к.т.н., професор Скляр О. Г.

Адреса редакції ТДАТУ:

Юридична:

пр. Б. Хмельницького 18,
м. Мелітополь, Запорізька обл.
72312 Україна

Фактична:

вул. Жуковського, 66,
м. Запоріжжя, Запорізька обл.
69600, Україна

**ЗМІСТ****ГАЛУЗЕВЕ МАШИНОБУДУВАННЯ**

- Кюрчев С. В., Самойчук К. О., Ломейко О. П.* 1
Методика розрахунку експериментального зразка струминного гомогенізатора молока
- Волик Б. А., Теслюк Г. В., Коновий А. В., Лепеть Є. І.* 2
Аналітичний огляд методів моделювання засобів механізації обробітку ґрунту
- Панченко А. І., Волошина А. А., Панченко І. А., Волошин А. А.* 3
Вплив величини діаметрального зазору на кінематику руху внутрішнього ротора орбітального гідромотора
- Журавель Д. П., Бондар А. М.* 4
Обґрунтування впливу системи очищення відпрацьованих робочих рідин на надійність гідравлічних систем
- Попов С. В., Семенов А. О., Євменов Р. Ю.* 5
Експериментальне дослідження удосконаленої конструкції електропневмоклапану пневматичної системи автопоїзду-зерновозу
- Козаченко О. В., Сєдих К. В., Волковський О. М.* 6
Теоретичний аналіз силової взаємодії дискового робочого органу з ґрунтовим середовищем
- Скляр О. Г., Скляр Р. В., Григоренко С. М.* 7
Методика моделювання та оптимізації структури посівних площ
- Захаров А. В., Рибалко І. М., Тіхонов О. В., Сайчук О. В.* 8
Дослідження зношуючої здатності ґрунтів та її вплив на довговічність робочих органів ґрунтообробних машин
- Дідур В. В., Петриченко Є. А., Новик О. Ю.* 9
Ультразвук та його застосування в промисловості
- Кюрчев С. В., Верхоланцева В. О., Паляничка Н. О.* 10
Ефект зберігання ягід після застосування холоду
- Комар А. С., Болтянський Б. В.* 11
Конструктивно-технологічне вдосконалення вальцевих грануляторів з плоскою матрицею



- Пилипака С. Ф., Клендій М. Б., Драган А. П.* 12
Моделювання та дослідження процесу транспортування сипучого матеріалу перевантажувальним патрубком гвинтового конвеєра
- Дідур В. В., В'юник О. В., Дашивець Г. І.* 13
Аналіз методів очищення олії, віджатої з рослинної сировини
- Паляничка Н. О., Верхованцева В. О., Червоткіна О. О., Ковальов О. О.* 14
Обґрунтування розробки лабораторної установки імпульсного гомогенізатора
- Ковальов О. О., Самойчук К. О., Фучаджи Н. О.* 15
Методологія дослідження параметрів струминних гомогенізаторів молока
- Самохвал В. А., Самойчук К. О.* 16
Дослідження ефективності роботи обладнання для інтенсифікації відтискання технічних олій в гвинтових прес-екструдерах для виготовлення паливних брикетів

ХАРЧОВІ ТЕХНОЛОГІЇ

- Сукманов В. О., Мулько І. С.* 17
Дослідження реологічних та органолептичних властивостей курячих нагетсів з низьким вмістом хлориду натрію та додаванням яблука
- Кузьміна Т. О., Зубкова К. В., Стоянова О. В., Мамай О. І., Яковенко Т. О.* 18
Розробка рецептури фруктових джемів для профілактичного харчування відповідно до вимог міжнародних стандартів
- Крижак Л. М., Семко Т. В., Іваніщева О. А.* 19
Дослідження особливостей використання штамів пробіотиків у технології виробництва ферментованих м'ясних продуктів
- Болгова Н. В., Ільченко Н. О., Губа С. О., Соколенко В. В.* 20
Аналіз технології виробництва твердого сиру з рослинними добавками



- Горач О. О.* 21
Технологічне обладнання для заморожування плодово-ягідної продукції
- Дзюндзя О. В., Горач О. В., Резвих Н. І.* 22
Технологічні процеси та обладнання для гомогенізації майонезу
- Мельник О. Ю., Мазуренко І. К., Степанова Т. М., Кошель О. Ю., Сабадаш С. М.* 23
Особливості технології нового батончика желейного
- Priss O. P., Sukhenko V. Yu., Bulhakov P. O.* 24
Asparagus dry soluble and insoluble matter during storage
- Ярмош Т. А., Перцевой Ф. В.* 25
Аналіз використання волоського горіха у харчовій промисловості
- Губа С. О., Бабенко Б. В., Болгова Н. В., Соколенко В. В.* 26
Дослідження рівня обізнаності молоді в питаннях впливу екологічної складової на безпеку харчової продукції
- Вареник А. С., Перцевой Ф. В.* 27
Використання продуктів переробки конопель у виробництві кондитерських борошняних виробів
- Дзюндзя О. В., Погрібняк О. А.* 28
Перспективи використання гарбуза у стравах для закладів ресторанного господарства
- Д. О. Майборода, О. О. Данченко, Л. М. Здоровцева, М. М. Данченко, Ю. В. Ніколаєва* 29
Регулювання якості м'яса гусей біологічно активними сполуками вівса посівного
- Ф. В. Перцевой, Т. І. Фотіна, О. Ю. Кошель, Т. І. Маренкова* 30
Розширення асортименту паштетів збагачених на культивовану грибку сировину при кейтеринговому обслуговуванні
- І. Л. Заморська* 31
Вміст та форми вологи у заморожених ягодах суниці садової функціонального призначення



- Igor Mazurenko, Yunbo Li, Shao Zhengzheng, Yangui Xie* 32
Flour and confectionery products for children. Requirements for quality and safety indicators

ЕЛЕКТРОЕНЕРГЕТИКА, ЕЛЕКТРОТЕХНІКА ТА ЕЛЕКТРОМЕХАНІКА

- Попова І. О., Чаусов С. В.* 33
Підвищення точності роботи мікропроцесорного пристрою захисту асинхронного двигуна

- Юрченко О. Ю., Барсукова Г. В.* 34
Процес відновлення акумуляторної батареї комплексним підходом

- Волошин В. С., Азархов О. Ю.* 35
Роль екосистеми «людина» в енергообміні на планеті

- Гулевський В. Б., Постол Ю. О., Мигуля В. В.* 36
Перспективи застосування автоматизованого проектування систем очищення змащувально-охолоджувальних рідин

- Бабич М. І., Коробка С. В.* 37
Методика обґрунтування параметрів турбіни та дериваційного каналу мікрогідроелектростанції для умов гірської річки

- Радько І. П., Наливайко В. А., Окушко О. В.* 38
Застосування методів енергозбереження у виробничій діяльності як інструмент підвищення енергоефективності

- Боярчук В. М., Коробка С. В., Стукалець І. Г., Бабич М. І., Сиротюк С. В.* 39
Методика дослідження ефективності електрохімічного акумулювання електроенергії

- Юрченко О. Ю., Барсукова Г. В.* 40
Використання імпульсного електричного поля як спосіб покращення показників якості насіння

КОМП'ЮТЕРНІ НАУКИ

- Холодняк Ю. В., Гавриленко Є. А., Зінов'єва О. Г.* 41
Розробка алгоритму моделювання кривих з заданими властивостями



- Лубко Д. В., Зінов'єва О. Г.* 42
Проектування імітаційної моделі роботи зернового збирально-транспортного комплексу
- Сіциліцин Ю. О.* 43
Використання AWS і Heroku для розробки паралельних і розподілених додатків в університетських лабораторіях



УДК 637.134

О. О. Ковальов, к.т.н., ст. викл.

ORCID: 0000-0002-4974-5201

К. О. Самойчук, д.т.н, проф.

ORCID: 0000-0002-3423-3510

Н. О. Фучаджи, к.т.н., ст. викл.

ORCID: 0000-0001-9433-6282

Таврійський державний агротехнологічний університет імені Дмитра Моторного

e-mail: oleksandr_kovalov@tsatu.edu.ua, тел.: 096-320-55-31

МЕТОДОЛОГІЯ ДОСЛІДЖЕННЯ ПАРАМЕТРІВ СТРУМИННИХ ГОМОГЕНІЗАТОРІВ МОЛОКА

Анотація. В статті було запропоновано методологію дослідження параметрів струминних гомогенізаторів молока. Розроблено та наведено структурну схему проведення досліджень параметрів гомогенізаторів молока струминного типу. Наведено деталізований опис програми теоретичних досліджень та стадій її розробки. Представлено етапи розробки програми проведення експериментальних досліджень, що включають комплекс дій від обрання змінних факторів до визначення оптимальних величин цих параметрів та залежностей, що пов'язують їх з показниками якості та енергетичних витрат гомогенізатора. Наведена методологічна основа розробки методики обчислення параметрів промислового зразку та оцінки ефективності його впровадження в умовах реального виробництва.

Ключові слова: методологія, параметри, диспергування, канал подачі, вершки, струминний гомогенізатор, молоко

Постановка проблеми. Диспергування за рахунок зменшення середнього діаметру жирових кульок забезпечує рівномірний розподіл вершків в молочній плазмі [1]. Її метою є зменшення середнього діаметру жирових кульок з 3–4 мкм до 0,75–0,85 мкм в готовому продукті, такі показники дисперсності знаходяться на рівні вимог нормативної документації, що регулює показники якості молочних виробів після переробки [2,3]. Між тим, найбільш поширені в промисловості клапанні гомогенізатори, що забезпечують СЖК на рівні 0,75–0,80 мкм мають надто високі питомі витрати електричної енергії, що сягають близько 7–8 кВт·год/т переробленого молока [4]. Відсоток енергетичних витрат на диспергування складає близько 30–40% в загальних технологіях переробки молока та молочних продуктів



[1–4]. Отже, зниження енергоємності процесу являє собою актуальну та важливу задачу для спеціалістів переробної галузі та науковців за фахом.

Аналіз останніх досліджень. Дослідження гомогенізації в сучасних конструкціях, які забезпечують високу енергоефективність диспергування характеризується складністю візуального спостереження за їх деформацією та подальшим руйнуванням. Це пояснюється високими швидкостями руху молока (що для клапанного гомогенізатора перевищують 100 м/с), низьким ступенем прозорості молочної емульсії та мікроскопічними показниками середнього діаметру жирових кульок, що складають близько 1 мкм [2]. Сукупна дія цих чинників обумовила відсутність єдиної теорії диспергування та дозволила дослідникам процесу висунути близько 10 гіпотез, що мають суперечності та частково спростовують одна іншу [1, 4]. Створені на базі цих гіпотез конструкції або відрізняються високими значеннями питомих витрат енергії (мікрофлюїдизатори, клапанні), або не забезпечують зменшення СЖК до 0,75–0,85 мкм (вібраційні, електрогідравлічні, вакуумні) [2, 5].

Результати останніх досліджень дозволяють виділити в якості основного чинника, що спричинює деформацію та руйнування жирових кульок критерій Вебера. Його значення зростає при збільшенні швидкості ковзання жирових кульок відносно молочної плазми. Відтак створення енергоефективних конструкцій гомогенізаторів має ґрунтуватись на створенні максимальної різниці між швидкостями руху знежиреного молока та вершків. Одночасно зі створенням сприятливих умов для руйнування жирових кульок при цьому використовується принцип роздільної подачі вершків, що дозволяє знизити енергетичні витрати процесу на 40–60% [1, 3]. Цим вимогам відповідає група струминних гомогенізаторів молока. Їх використання забезпечує зменшення середнього діаметру жирових кульок до 0,75–1,20 мкм, при цьому питомі енерговитрати таких конструкцій не перевищують 0,9–1,8 кВт·год/т [6, 7]. Однак незважаючи на перспективність розробки енергоефективних конструкцій цієї групи гомогенізаторів на теренах Інтернету відсутня узагальнююча інформація щодо методології проведення їх досліджень. Цей факт пригальмовує подальші дослідження та розробку енергоефективних конструкцій диспергаторів цієї групи.

Формулювання цілей статті (постановка завдання). Отже метою даної статті є розробка методології дослідження параметрів струминних гомогенізаторів молока. Для досягнення поставленої мети вирішувались наступні задачі:

– розробка структурної схеми проведення досліджень струминного гомогенізатора молока;



– розробка програми теоретичних досліджень, метою яких є обґрунтування параметрів та режимів роботи лабораторного зразку гомогенізатора для отримання дисперсності молочної емульсії, на рівні технологічних вимог при мінімальних енерговитратах процесу;

– розробка програми експериментальних досліджень, головною метою яких є перевірка адекватності отриманих аналітичних залежностей лабораторного зразку струминного гомогенізатора молока, встановлення реальних значень введених коефіцієнтів, перевірка та при необхідності уточнення значення критерію Вебера;

– розробка методики обчислення параметрів та конструкції промислового зразка гомогенізатора.

Основна частина. Аналіз літературних джерел дозволив визначити, що проведення досліджень руйнування жирових кульок в струминних гомогенізаторах являє найбільш перспективний напрямок підвищення енергоефективності диспергування в технологічних процесах переробної промисловості. До групи струминних гомогенізаторів молока належать: струминний в об'ємі, струминно-ударний, струминний із зустрічною подачею вершків, протитечіно-струминний (ПСГМ), струминний з роздільною подачею вершків (СГРПВ) та струминно-щілинний диспергатори молока (СЦГМ). Останні 3 конструкції були розроблені на базі кафедри ОПХВ імені професора Ф. Ю. Ялпачика (ТДАТУ імені Дмитра Моторного) [3,6].

Диспергування жирової фази в ПСГМ здійснюється при зіткненні струменів молока, що подаються крізь дві співвісно розташовані форсунки. Конструктивні особливості будови гомогенізатора дозволяють створити високу швидкість ковзання жирової кульки по відношенню до молочної плазми [8]. Це призводить до підвищення значень гідродинамічного критерію Вебера, що обумовлює ефективне руйнування часток жирової фази. Згідно результатів досліджень [6] при переробці молока в ПСГМ середнього діаметру жирових кульок складає близько 0,75–0,85 мкм, при цьому його питомі енерговитрати не перевищують 1,6–1,8кВт·год/т [6].

В СГРПВ після попередньої сепарації знежирене молоко та вершки подаються окремо, до швидкісного потоку знежиреного молока подається струмінь вершків [9]. Завдяки використанню тонких каналів подачі вершків та малого діаметру струменю забезпечується висока швидкість ковзання жирових кульок. Збільшення гідродинамічного критерію Вебера обумовлює зниження середнього діаметру жирових кульок при використанні гомогенізаторів цього типу до 0,80–0,90 мкм [6,9]. Використання принципу роздільної подачі вершків забезпечує зниження питомих енерговитрат таких конструкцій до 0,85–0,90кВт·год/т [9].

В СЦГМ дисперсна фаза подається до швидкісного потоку



знежиреного молока, що пройшло попередню сепарацію, крізь вузьку кільцеву щілину. Згідно результатів проведених досліджень при його використанні можливо отримати жирові кульки середнім діаметром 0,8–0,9 мкм. При цьому питомі енергетичні витрати гомогенізатора не будуть перевищувати 0,7–0,8 кВт·год/т гомогенізованої емульсії [3].

В ході подальших досліджень необхідно розробити структурну схему досліджень, загальний вигляд якої наведено в табл. 1.

Таблиця 1

Структурна схема проведення досліджень



Як бачимо зі структурної схеми досліджень (табл.1) теоретичні дослідження потрібно починати зі створення моделі зменшення середнього діаметра жирових кульок в гомогенізаторі. Вона включає дослідження сил, які діють на жирову кульку при її русі відносно молочної плазми, що необхідно для визначення чинників руйнування. Після складання рівняння руху жирової кульки, слід визначити основні механізми, за якими відбувається диспергування жирової фази молочної емульсії. На цьому етапі перевіряються і другорядні чинники, які можуть відігравати важливу роль в процесі диспергування (кавітація, турбулентні пульсації, подрібнення за відсутності вдару) [10].

Визначення раціональних та оптимальних значень конструктивних, гідравлічних та технологічних параметрів з точки зору зменшення подальшої кількості пошукових експериментів та загального обсягу досліджень доцільно починати з проведення моделювання. Серед програм, які використовуються для моделювання гідродинамічних процесів COSMOS, AutoCAD, Solid Works. Програмний комплекс кінцево-елементного аналізу ANSYS було обрано завдяки наявності таких переваг, як висока точність програми; можливість оперування великою кількістю параметрів процесу, забезпечення при використанні програми значень густини, в'язкості знежиреного молока та вершків, які є найбільш наближеними до їх реальних значень [11,12]. Спочатку авторами в програмному комплексі Solid Works було створено геометрично параметризовану модель камери, струменю вершків та потоку знежиреного молока, які згодом було інтегровано до програмного комплексу ANSYS [13,14].

Після обрання програмного комплексу проводиться обґрунтування межі варіювання значень параметрів, які будуть досліджуватись. Для ПСГМ ними можуть бути, наприклад відстань між форсунками, тиск диспергування, для СГРПВ відповідно тиск подачі знежиреного молока та діаметр каналів подачі вершків, для СЩГМ окрім тиску подачі дисперсійної фази ($\Delta p_{\text{зН}}$), ширина кільцевої щілини (h) (рис.1).

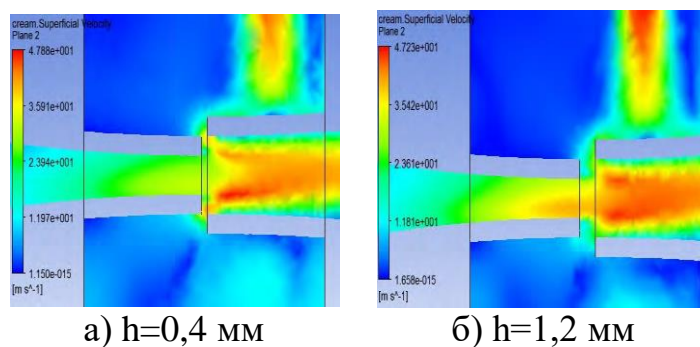


Рисунок 1. Поля швидкостей при тиску подачі знежиреного молока $\Delta p_{\text{зН}}=8$ МПа та ширині кільцевої щілини h



На етапі проведення аналітичних досліджень важко оцінити вплив деяких факторів на показники якості процесу диспергування. Тому для оцінки значення реальних величин можна використовувати неявні залежності (коефіцієнти) впливу параметрів, у СГПРВ каналів подачі вершків, у СЦГМ, відповідно параметрів кільцевої щілини [6,9]. Цей коефіцієнт ($k_{щ}$) у випадку СЦГМ уточнював вплив жирності вершків, ширини кільцевої щілини та швидкості подачі вершків на показники якості диспергування в СЦГМ [3,9].

Наступним кроком є знаходження залежностей, що пов'язують конструктивні, технологічні та гідравлічні параметри досліджуваного гомогенізатора з середнім діаметром жирових кульок (d_{cp}) після диспергування. Поставлені задачі вирішувались з використанням теоретичного інструментарію, серед якого: залежності класичної гідродинаміки, теорії затоплених струменів, граничного шару Шліхтінга, локальної ізотропної турбулентності Колмогорова-Обухова. Наприклад, для СГПРВ така залежність має вигляд (1) [3, 15]

$$d_{cp} = \frac{We_k \sigma_{ж-п} \varepsilon_k s^2}{2 \rho_{пл} k_c^2 Q_{зн}^2} \quad (1)$$

де We_k – критичне значення критерію Вебера;

k_c – коефіцієнт струминної гомогенізації;

$\sigma_{ж-п}$ – поверхневий натяг на межі розділу жиру та плазми, Н/м;

ε_k – коефіцієнт стиснення для центральної частини камери, який залежить від форми профілю внутрішніх поверхонь камери;

s – площа каналів подачі вершків, м²;

$Q_{зн}$ – подача знежиреного молока, м³/с;

$\rho_{пл}$ – густина молочної плазми, кг/м³.

Отримана формула (1) може бути представлена в вигляді графічних залежностей, що дає змогу визначити раціональні величини параметрів процесу диспергування з точки зору мінімізації середнього діаметру жирових кульок. На підставі отриманої залежності (1) можна виразити до яких значень мають прямувати параметри процесу диспергування для забезпечення мінімально можливих величин середнього діаметру жирових кульок після диспергування (2) [3]

$$\left(We_k, \sigma_{ж-п}, \varepsilon_k, d_k \right) \rightarrow \min; \left(k_{щ}, Q_{зн} \right) \rightarrow \max \dots \quad (2)$$

Наступним кроком є аналітичне знаходження залежностей, які пов'язують конструктивні, гідравлічні та технологічні параметри гомогенізатора з потужностями для його приводу (від гідроциліндру у випадку ПСГМ та від насосів подачі знежиреного молока та вершків у випадку СГПРВ та СЦГМ) та питомими енерговитратами диспергування. Така залежність може мати вигляд, подібний до формули, що пов'язує параметри гомогенізатора та питомі витрати



енергії для СЦГМ (3) [3,15]

$$E_{пит} = \frac{Q_{zn}^2 \left(\frac{8 \cdot \rho}{\mu_k^2 \cdot d_k^4} + \left(\frac{J_v - J_{zn}}{J_v - J_n} \right)^3 \cdot 2 \cdot d_k^2 \cdot h^2 \cdot \mu_{щ}^2 \right)}{\pi^2 \cdot \rho_m \cdot \left(\frac{J_v - J_{zn}}{J_v - J_n} \right)} \quad (3)$$

де ρ_m – густина молочної плазми, кг/м³;

d_k – діаметр конфузору в місці найбільшого звуження, м.

ρ_v – густина вершків, кг/м³;

h – ширина кільцевої щілини, м;

J_{zn} , J_v , J_n – жирності відповідно знежиреного молока, вершків та нормалізованої емульсії, %;

μ_k , $\mu_{щ}$ – коефіцієнти витрат відповідно конфузора та кільцевої щілини, які враховують гідродинамічні умови на ділянці надходження вершків до потоку знежиреного молока.

Отримана формула (3) може бути представлена в вигляді графічних залежностей, що дає змогу визначити раціональні величини параметрів процесу диспергування з точки зору мінімізації питомих витрат енергії. Залежність (3) дає змогу виразити до яких значень мають прямувати параметри процесу диспергування для забезпечення мінімально можливих величин питомих витрат енергії (4).

$$\begin{aligned} (\mu_k, \mu_v, h, J_v) &\rightarrow \max \\ (Q_{zn}, J_n) &\rightarrow \min \end{aligned} \quad (4)$$

Отриманих даних достатньо для проведення оптимізації. Процес диспергування молока в має забезпечувати зменшення середнього діаметра жирових кульок до рівня 0,75–0,80 мкм при мінімальних енергетичних витратах. Гідравлічні, конструктивні і технологічні параметри гомогенізатора, які відповідають таким вимогам, будемо вважати оптимальними. Для визначення оптимальних параметрів гомогенізатора молока необхідно побудувати лінії рівної дисперсності на графіках залежностей питомих витрат енергії $E_{пит}$ при різних величинах раціональних значень довжини кільцевої щілини $l_{щ}$ (8,4–9,4) і різних формах профілю внутрішніх поверхонь конфузору, визначених при проведенні аналітичних досліджень струминно-щілинного гомогенізатора [15]. Після цього за даними, визначеними з експериментальних графіків на рівні, необхідному для забезпечення середнього діаметра жирових кульок на рівні вимог нормативної документації проводиться лінія рівної дисперсності, позначена на обох графіках суцільною лінією [16]. На перетині лінії рівної дисперсності, що має значення 0,8 мкм з кожною з кривих у легенді, знаходимо відповідні значення питомих витрат енергії. Нанесемо знайдені

значення питомих витрат енергії на попередньо побудовані графіки залежності питомих витрат енергії гомогенізатора від довжини кільцевої щілини при різних типах внутрішнього профілю конфузору [15].

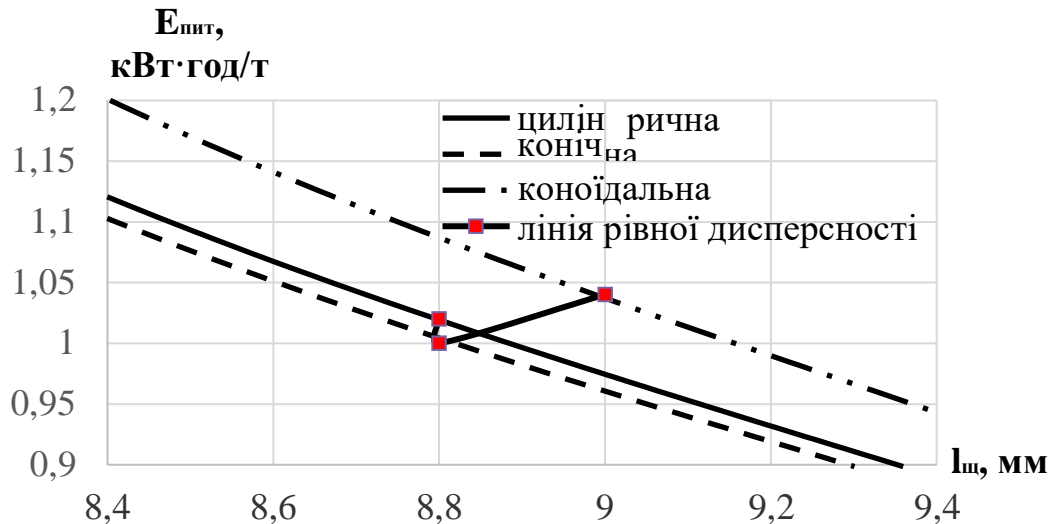


Рисунок 2. Оптимізація форми внутрішніх поверхонь камери та діаметра конфузору в місці найбільшого звуження камери струминно-щілинного гомогенізатора молока (при $J_{зп}=0,05\%$; $J_{н}=3,5\%$; $J_{в}=40\%$; $h=0,5$ мм; $\mu_{в}=0,1$; $Q_{г}=1000$ кг/год)

Перед проведенням експериментальних досліджень визначаються сталі та обираються змінні фактори процесу, як показано на рис.3 для СЦГМ.

Наприклад у випадку з СГПРВ ними були швидкості подачі знежиреного молока, вершків, жирність вершків, площа каналів подачі вершків тощо. Після цього здійснювалось обґрунтування діапазону варіювання кожного зі змінних факторів процесу. Наприклад жирність характеризує відсоткову кількість жирової фази в загальному об'ємі вершків [17]. При використанні вершків жирністю нижче за 10% спостерігається суттєве зростання питомих енерговитрат [18]. Це пов'язано з необхідністю подачі жирової фази з більшою швидкістю для забезпечення необхідної жирності нормалізованого продукту. Також не рекомендовано використовувати вершки, жирність яких перевищує 50% [19]. Це пов'язано зі значним зростанням витрат енергії, що необхідні для проведення додаткової гомогенізації при використанні вершків високої жирності [20].

Отриманих даних досліджень достатньо для здійснення обґрунтування схеми лабораторного зразку гомогенізатору та

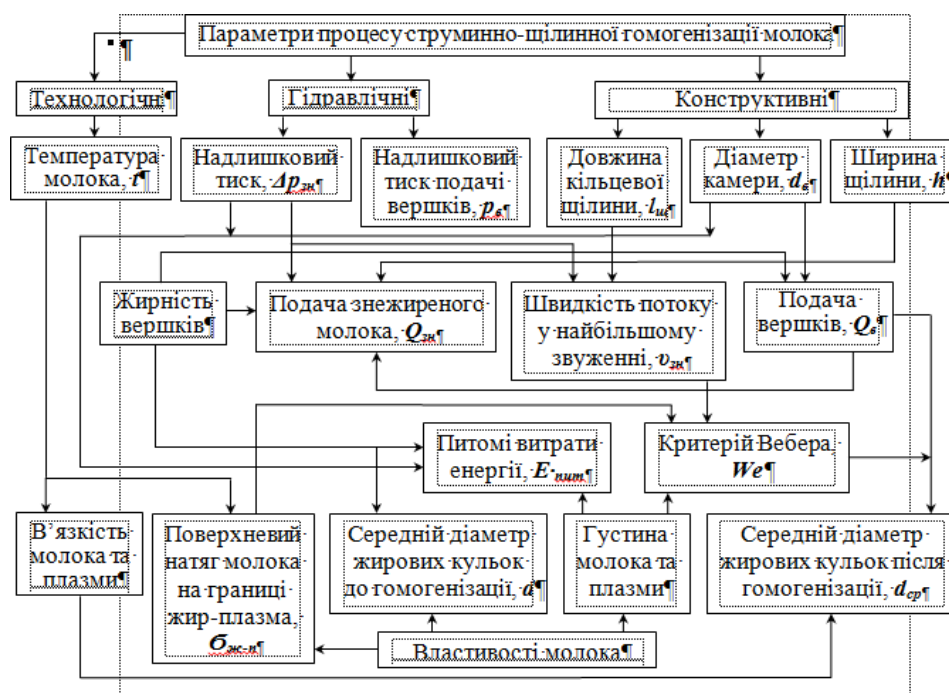


Рисунок 3. Блок-схема взаємозв'язку основних факторів, вихідних параметрів та критеріїв оптимізації в струминно-щілинному гомогенізаторі молока

створення його в металі. Наступним кроком є планування експерименту за рівнями варіювання факторів та обґрунтування вибору засобів контролю параметрів при проведенні експериментальних досліджень. На цьому ж етапі відбувається обґрунтування методів контролю якості гомогенізації. Обраний метод мікрофотографування дозволяє не тільки визначати середній діаметр жирових кульок, а й оцінити їх розподіл за розмірними групами. Дисперсний склад жирових кульок після гомогенізації визначався за допомогою оптичного мікроскопу Микромед Р-1-LED загальною кратністю збільшення 1500 крат. До нього приєднувалась цифрова камера Mustek Wcam 300 з роздільною здатністю 640x480 [6,9].

З отриманих при проведенні експериментальних досліджень даних були складені матриці, які оброблялися на персональному комп'ютері за допомогою програм Mathcad [12] та Microsoft Office Excel 2010 за обраною методикою. Розраховувались дисперсії достовірності, однорідність дисперсії за критерієм Кохрена). Перевірку значущості коефіцієнтів отриманих рівнянь регресії проводили за критерієм Стьюдента, а похибку апроксимації дослідних даних – за критерієм Фішера. Рівень значущості приймали рівним 0,05.

Отримані дані заносились до спеціальних таблиць, згідно розмірних класів, де до кожного класу належала група жирових кульок певного розміру. За визначальний розмір класу приймався

максимальний розмір жирової кульки даної групи [15]. У полі зору мікроскопа підраховувались кількість жирових кульок та їх діаметр. Шляхом оцінки максимальних коливань діапазону значень результатів дослідів виключалися грубі помилки вимірів [12]. Внаслідок обробки було отримано розподіл розмірів жирових кульок в інтервалі класу за їх кількістю шляхом обробки сукупності одиниць, відібраних для контролю з партії. Обчислення основних параметрів вибірки, виконувалось за допомогою програми Microsoft Office Excel 2010 [12].

Отримані результати можуть бути представлені в вигляді графічних залежностей, що дає змогу визначити раціональні та оптимальні величини параметрів процесу диспергування з точки зору отримання продукту з мінімальними значеннями середнього діаметра жирових кульок СЦГМ (рис.4) або мінімізації питомих витрат енергії.

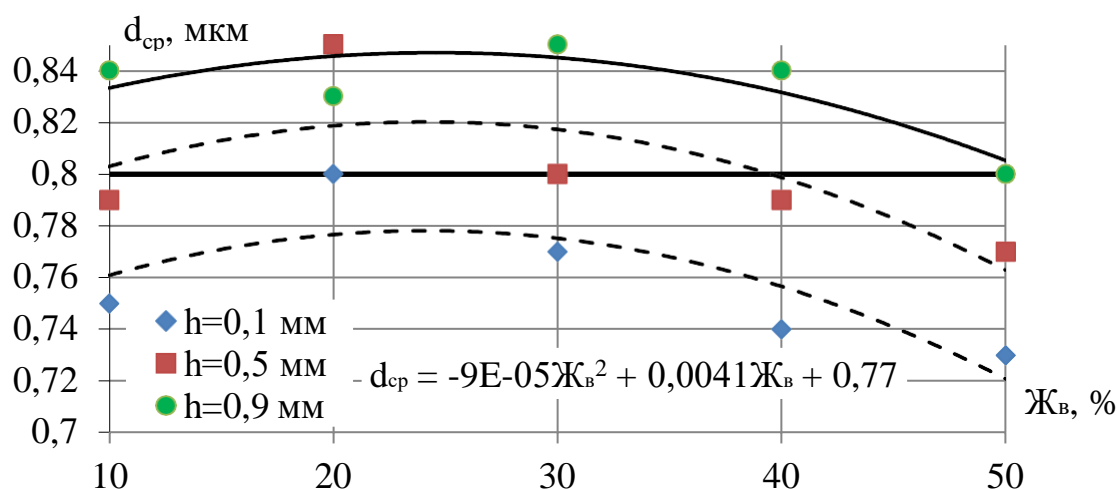
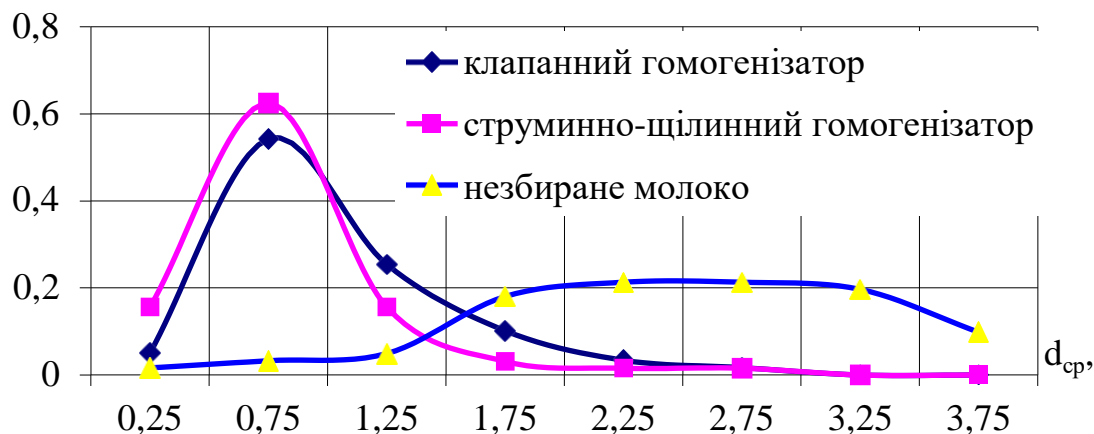


Рисунок 4. Графік залежності середнього діаметра жирових кульок $d_{ср}$ від жирності вершків $Ж_в$, та ширини щілини камери гомогенізації в місці найбільшого звуження h при $Ж_н=3,5$ %, $d_к=3$ мм, $v_{зп}=60$ м/с

Для знайдених раціональних параметрів гомогенізатора, після аналізу мікрофотографій будувалась гістограма розподілу середнього діаметра жирових кульок по розмірних групах, визначалась дисперсія та коефіцієнт варіації, як для СЦГМ (рис.5) [9]

Оскільки на етапі аналітичних досліджень для уточнення впливу параметрів каналу подачі вершків у СГПРВ та кільцевої щілини у СЦГМ вводились коефіцієнти, наприкінці експериментальних досліджень проводилось визначення реального значення цих величин. Проведене на основі отриманих емпіричних даних прогнозування, виконане методом екстраполяції експериментальних даних, дозволило знайти уточнене критичне значення критерію Вебера для диспергування молока, яке складає 29 [15]. Знайдене значення необхідне для розробки математичних моделей процесу диспергування молочного жиру та дослідження більш ефективних конструкцій



a – після струминно-щілинної гомогенізації; *б* – після струминної гомогенізації з роздільним подаванням жирової фази; *в* – необробленого молока

Рисунок 5. Гістограма розподілу середнього діаметру жирових кульок за розмірними групами.

гомогенізаторів молока.

Наступним етапом було проведення розробки методики розрахунку параметрів промислового зразку гомогенізатора. В ньому враховуються уточнені значення коефіцієнтів впливу параметрів відповідно каналу подачі вершків для СГПРВ та кільцевої щілини для СЦГМ та критерію Вебера. Вихідними технологічними даними для розрахунку параметрів СГПРВ з використанням нормалізації за жирністю були [3,6,15]:

– необхідний середній діаметр жирових кульок молока d_{cp} після гомогенізації;

– загальна продуктивність струминного агрегату, мінімальні значення якої для промислового зразку складають 1000 кг/год, або $2,8 \cdot 10^{-4}$ кг/с;

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

– жирність вершків, що задана технологічними вимогами проведення процесу та згідно результатів аналітичних досліджень для отримання високого ступеню дисперсності має дорівнювати 30–50%.

З вихідних даних послідовно розраховуються середній діаметр жирових кульок після диспергування, необхідна кількість знежиреного молока та вершків для отримання нормалізованої емульсії з заданим відсотком жирності. Визначався діаметр камери в місці найбільшого звуження, діаметр та необхідна кількість каналів подачі вершків, надлишкові тиски та швидкості подачі знежиреного молока та вершків. Після цього обчислювались необхідні потужності приводів насосів подачі знежиреного молока та вершків з врахуванням ККД насосів, редукторів і передач між насосами та обчислювались питомі витрати



енергії в діапазоні продуктивності промислових гомогенізаторів 1-10 т/год. Отримані дані зводились до таблиці, загальний вигляд якої для СГПРВ наведено в табл.2 [3]

Таблиця 2

Розрахункові дані типорозмірів СГПРВ

Продуктивність, Q_r , т/ГОД	Діаметр камери $d_{кам}$, мм	Діаметр каналу верхків d_v , мм	Кількість каналів N	Потужність насосу верхків, P_v , кВт	Потужність насосу знежир. молока, P_{zn} , кВт	Сумарна потужність, P , кВт	Питоме енергоспоживання, $E_{пит}$ кВт·ГОД/т
1,0	2,2	1,4	2	0,10	0,7	0,8	0,8
2,5	3,6	2,2	2	0,18	1,8	2,0	0,8
5,0	5,0	3,0	2	0,35	3,6	4,0	0,8
10,0	4,4	2,8	2	0,72	7,2	7,9	0,8

Отримані результати дали необхідну інформацію для розробки рішення промислового зразку, обрання необхідних технологічних ємностей, камери гомогенізації, насосів, двигунів, редукторів, з'єднувальної арматури та контрольно-регулюючої апаратури [12]. Розроблені та втілені в металі промислові зразки гомогенізатора проходили випробування та перевірку показників роботи в умовах масложирового комбінату «Південний». Отримані при випробуванні техніко-економічні показники використовувались для оцінки економічної ефективності впровадження результатів досліджень в якості заміни найбільш енерговитратним конструкціям клапанних гомогенізаторів. Обчислення економічної ефективності проводилось за загальноприйнятою методикою з визначенням річного економічного ефекту, ступеню зниження енерговитрат, терміну окупності тощо.

Висновки. Необхідність розробки методології досліджень параметрів струминних гомогенізаторів молока обумовлена відсутністю узагальнюючої інформації, що полегшує проведення досліджень нових типів енергоефективних гомогенізаторів цієї групи. Розроблена структурна схема проведення досліджень структурує послідовність дій, які повинен виконати науковець для перевірки робочої гіпотези досліджень.

Детальний опис етапів програми аналітичних досліджень та стадій її розробки дозволяє скоротити час, який раніше витрачався на планування етапів проведення досліджень. Надана послідовність розробки та реалізації програми проведення експериментальних досліджень дозволяє скоротити обсяг досліджень до необхідної та



достатньої кількості для перевірки адекватності залежностей, отриманих аналітичним шляхом.

Рекомендації відносно розробки методики обчислення параметрів та розробки промислового зразка узагальнюють інформацію, здобуту авторами при проведенні досліджень створених на базі кафедри ОПХВ новітніх конструкцій енергоефективних гомогенізаторів молока. Матеріали статті можуть бути використані при проведенні досліджень перспективних та малодосліджених конструкцій диспергаторів, наприклад струминного гомогенізатора молока з зустрічною подачею вершків.

Дослідження виконано в рамках науково-технічної роботи "Розроблення технології переробки молочних продуктів з використанням нових типів гомогенізаторів", яка фінансується МОН за договором № ДЗ/132 - 2022.

Список використаних джерел

1. Liao Y. X., Lucas D. A literature review of theoretical models for drop and bubble breakup in turbulent dispersions. *Chem. Eng. Sci.* 2009. Vol. 64. P. 3389–3406.
2. Нужин Е. В., Гладушняк А. К. Гомогенизация и гомогенизаторы: монография. Одесса: Печатный дом. 2007. 264 с.
3. Ковальов О. О. Обґрунтування параметрів струминно-щільного гомогенізатора молока з роздільною подачею вершків : автореф. дис канд. техн. наук : 05.05.11. Мелітополь, 2021. 20 с.
4. Huppertz T. Homogenization of Milk|Other Types of Homogenizer (High-Speed Mixing, Ultrasonics, Microfluidizers, Membrane Emulsification). *Encyclopedia of Dairy Sciences*. 2nd Edition, 2011. P. 761–764.
5. Innings F.; Trägårdh C. Visualization of the drop deformation and break-up process in a high pressure homogenizer. *Chem. Eng. Technol.* 2005. Vol. 28. P. 882–891.
6. Самойчук К. О. Розвиток наукових основ гідродинамічного диспергування молочних емульсій: автореф. дис док. техн. наук: 05.18.12. Харків, 2018 . 44 с.
7. Håkansson A., Fuchs L., Innings F., Revstedt J., Trägårdh C., Bergenståhl B. Velocity measurements of turbulent two-phase flow in a high-pressure homogenizer model. *Chemical Engineering Communications*, 2013. T. 200. P. 93-114.
8. Haponiuk E.; Zander L.; Probola G. Effect of the homogenization process on the rheological properties of food emulsions. *Pol. J. Nat. Sci.* 2015. Vol. 30. P. 149–158.



9. Kovalyov A., Samoichuk K., Palyanychka N., Verkholtantseva V., Yanakov, V. Experimental investigations of the parameters of the jet milk homogenizer with separate cream supply. *Technology audit and production reserves*. 2017. № 3/3(35). P. 33–39.

10. Jiang, B., Shi, Y., Lin, G., Kong, D., Du, J. Nanoemulsion prepared by homogenizer The CFD model research. *Journal of Food Engineering*, 2019. T. 241. P. 105–115

11. Dhankhar P. Homogenization fundamentals. *IOSR Journal of Engineering*. 2014. Vol. 4(5). P. 1–8.

12. Дідур В. А., Савченко О. Д., Журавель Д. П., Мовчан С. І. Гідравліка та її використання в агропромисловому комплексі: підручник. Київ: Аграрна освіта, 2008. 577 с.

13. Ward K., Fan Z. H. Mixing in microfluidic devices and enhancement methods. *Journal of Micromechanics and Microengineering* 2015. Vol. 25. P. 102-118.

14. Walstra P, Wouters J T M and Geurts T J. Homogenization. In: *Dairy Science and Technology*. Second Edn. Taylor & Francis Group, LLC. Boca Raton London New York, 2006. 279 p.

15. Samoichuk K., Kovalyov A., Fuchadzhy N., Hutsol T., Jurczyk M., Pająk T., Banaś M., Bezalychna O., Shevtsova A. Energy Costs Reduction for Dispersion Using a Jet-Slot Type Milk Homogenizer. *Energies*. 2023. Vol. 16. No 2211.

16. Jiang B., Shi, Y., Lin, G., Kong, D., Du, J. (2019). Nanoemulsion prepared by homogenizer The CFD model research. *Journal of Food Engineering*. T. 241. P. 105–115.

17. Morales J., Watts A., McConville J. Mechanical particle-size reduction techniques. *AAPS Adv. Pharm. Sci. Ser.* 2016. Vol. 22. P.165–213.

18. Postelmans A., Aernouts B., Jordens J., Van Gerven T., Saeys W. Milk homogenization monitoring: Fat globule size estimation from scattering spectra of milk. *Innov. Food Sci. Emerg. Technol.* 2020. Vol. 60. No 102311.

19. Yanga B., Zhua Z., Gaoa M., Yana X., Zhua X., Guo W. A portable detector on main compositions of raw and homogenized milk. *Comput. Electron. Agric.* 2020. Vol. 177. No 105668.

20. Tartar L. (2009). The General Theory of Homogenization. *Lecture Notes*, 2009. P. 470.

Стаття надійшла до редакції 21.04.2023



A. Kovalov, K. Samoichuk, N. Fuchadzhy
Dmytro Motornyi Tavria state agrotechnological university

METHODOLOGY OF STUDYING THE PARAMETERS OF FLOW MILK HOMOGENIZERS

Summary

Increasing the energy efficiency of the process of dispersing milk emulsions is still one of the most urgent problems of the milk processing industry. According to the results of the latest research, it is possible to ensure a significant reduction in the specific energy consumption of the process while ensuring quality indicators at the level of valve homogenizers due to the introduction of jet milk homogenizers. The principle of operation of these structures is based on creating the maximum difference between the speeds of skimmed milk and cream, which is the basis of increasing the energy efficiency of the dispersion process. However, the more dynamic research process of homogenizers of this group is hindered by the lack of methodological foundations of the research, which were provided in this article.

The article proposed a methodology for researching the parameters of jet milk homogenizers. A structural scheme for researching the parameters of jet-type milk homogenizers has been developed and given. The given sequence of actions allows you to structure the process of studying the parameters of jet-type homogenizers. A detailed description of the theoretical research program and the stages of its development is provided. A set of actions is sequentially laid out, from the creation of a model of the destruction of a fat ball and simulation to the determination of rational and optimal parameters of the homogenizer.

The stages of development of the program for conducting experimental research are presented, which include a set of actions from the selection of variable factors to the determination of the optimal values of these parameters and the dependencies that connect them with the indicators of quality and energy costs of the homogenizer. The methodological basis for the development of the methodology for calculating the parameters of an industrial model and evaluating the effectiveness of its implementation in the conditions of real production is provided. The developed methodological bases for the study of jet milk homogenizers will allow the research of little-known designs, for example, a jet homogenizer with a counter supply of cream.

Key words: methodology, parameters, annular gap, supply channel, cream, jet homogenizer, milk

Електронне наукове фахове видання

Науковий вісник
Таврійського державного агротехнологічного університету

Випуск 13, том 1.

Відповідальний за випуск – к.т.н., професор Скляр О. Г.

Комп'ютерна верстка: Комар А. С.

Підписано до друку 22 квітня 2023 р.
Друкарня ТДАТУ
26,76 умов. друк. арк.