

УДК 637.134

DOI: 10.31388/2078-0877-19-2-117-129

ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНІ ДОСЛІДЖЕННЯ ПАРАМЕТРІВ СТРУМИННОГО ГОМОГЕНІЗАТОРА МОЛОКА З РОЗДІЛЬНОЮ ПОДАЧЕЮ ВЕРШКІВ ЩІЛЬОВОГО ТИПУ

Самойчук К. О., д. т. н.,
Ковальов О. О., аспірант,^{*}
Паляничка Н. О., к. т. н.,
Колодій О. С., к. т. н.,
Лебідь М. Р., студент

*Таврійський державний агротехнологічний університет імені Дмитра Моторного
Тел. (0619) 42-13-06*

Анотація – у статті наведено результати експериментальних досліджень процесу гомогенізації в струминному гомогенізаторі молока з роздільною подачею вершків щілинного типу. Визначено та обґрунтовано діапазон коливань змінних факторів процесу. Встановлено залежність між середнім діаметром жирових кульок після диспергування, швидкістю подачі знежиреного молока та діаметром камери гомогенізації в місці найбільшого звуження. Проведено обробку експериментальних даних та побудовано графіки, які демонструють залежність середнього діаметра жирових кульок від швидкості подачі вершків, жирності вершків та діаметру камери гомогенізації в місці найбільшого звуження. Представлено та проаналізовано залежність середнього діаметра жирових кульок від жирності вершків та ширини кільцевої щілини струминного гомогенізатора молока з роздільною подачею вершків. Представлено графік, що демонструє залежність потужності диспергатора від продуктивності експериментального зразку для експериментальних та теоретичних значень потужності приводу насосів подачі знежиреного молока та вершків і загальної потужності процесу.

Ключові слова: щілинний гомогенізатор, молоко, енергетичні витрати, вершки, середній діаметр, жирова кулька.

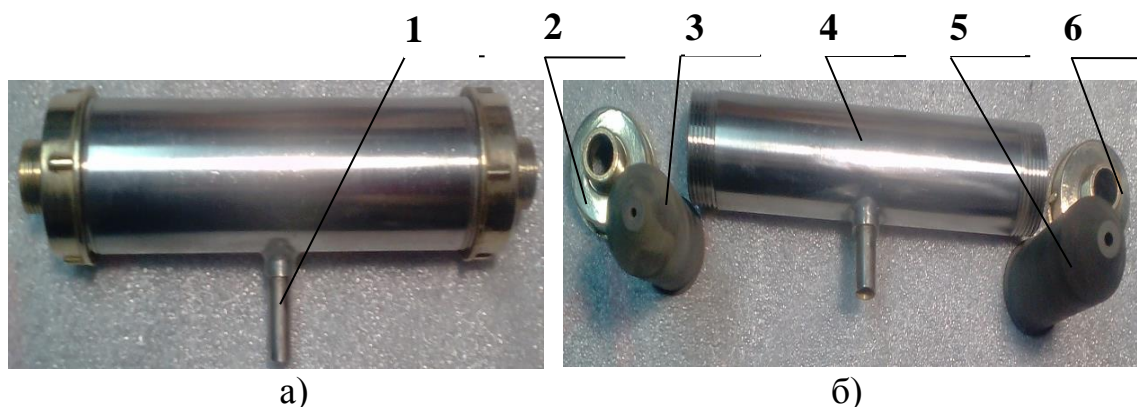
Постановка проблеми. Диспергування належить до нормативних операцій, що використовуються у більшості технологічних процесів з переробки молочної продукції. Її характерною ознакою для найбільш поширених у промисловості конструкціях клапанних машин є те, що при забезпеченні середнього

© Самойчук К. О., Ковальов О. О., Паляничка Н. О., Колодій О. С., Лебідь М. Р.

^{*} Науковий керівник – д. т. н., доц. Самойчук К. О.

діаметру жирових кульок на рівні технологічно обумовлених значень (0,8–1,2 мкм) енергетичні витрати процесу складають понад 8 кВт·год/т гомогенізованого молока [1]. Підвищення енергоефективності процесу гомогенізації є основною задачею фахівців галузі та науковців. Однак, процес дослідження перспективних конструкцій гомогенізаторів ускладнюється відсутністю єдиної теорії процесу, що пояснюється мікроскопічним розміром жирових кульок, що складають менше 1 мкм та високих швидкостей руху молока, значення яких перевищують 100–150 м/с.

Аналіз останніх досліджень. Новітні дослідження перспективних конструкцій диспергаторів дозволяють стверджувати, що досягти суттєвого зниження енергетичних витрат на гомогенізацію можливо при використанні конструкцій, дія яких заснована на створенні максимальної різниці між швидкостями знежиреного молока та вершків [2]. Такий принцип можливо реалізувати в конструкції струминного гомогенізатора молока з роздільною подачею вершків щільового типу [3]. Загальний вигляд та складові частини камери струминно–щільового гомогенізатора молока представлені на рис. 1а, б.



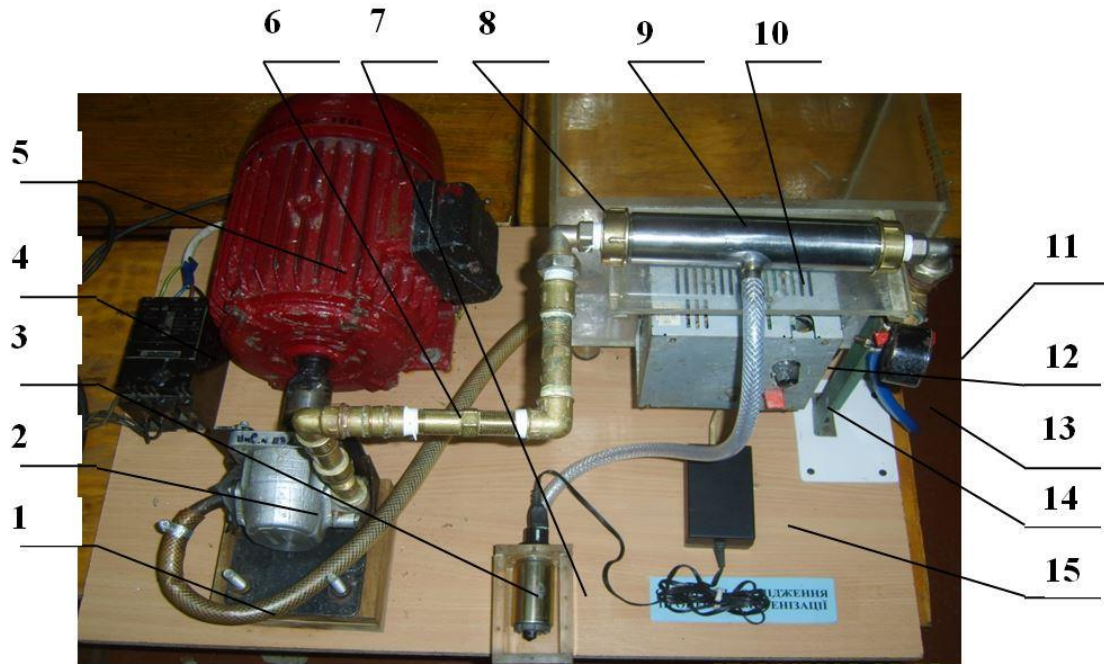
а) зовнішній вигляд; б) внутрішня будова; 1 – ємність з вершками; 2 – патрубок подачі знежиреного молока; 3 – профілююча вставка, що імітує звуження конфузору; 4 – корпус камери струминно–щільового гомогенізатора молока; 5 – вставка, що імітує розширення дифузору; 6 – патрубок відведення гомогенізованого молока.

Рис. 1. Фото струминно–щільового гомогенізатора молока.

Камера струминного гомогенізатора молока (рис. 1 б) складається з корпусу 4 в якому монтується вставки 3 та 5, які формують місце найбільшого звуження в центральній частині камери. Попередньо знежирене молоко подається крізь патрубок подачі 2, після чого досягає місце найбільшого звуження, що формується шляхом профілювання внутрішніх поверхонь камери, де до знежиреного молока, що в цьому місці має найбільшу швидкість з

ємності з вершками 1 у співвідношенні, що розраховується з рівняння матеріального балансу крізь щілину, що має невелику ширину та формується між конфузором та дифузором, подається певна кількість вершків, яка розраховується з рівняння матеріального балансу [4]. Гомогенізоване молоко відводиться крізь патрубок 6.

Розроблена на базі кафедри ОПХВ імені професора Ф. Ю. Ялпачика лабораторна установка струминно–щільового гомогенізатора молока представлена на рис. 2.



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

Рис. 2. Зовнішній вигляд лабораторної установки струминно–щільового гомогенізатора молока.

Лабораторна установка струминно–щільового гомогенізатора молока, зовнішній вигляд якої показано на рис. 2 складається з ємності зі знежиреним молоком 8, з якої воно надходить по гнучкому шлангу 1 до шестеренного насосу 2 типу НШ, який приводиться в дію від електричного трифазного двигуна 5, який запускається при включенні пакетного вимикача 4. Робочий тиск знежиреного молока регулюється шляхом перекриття дроселюючої засувки та

контролюється розташованим поруч з нею манометром 11. Дисперсійна фаза з насоса 2 крізь трубопроводи 6 подається до камери гомогенізації 9, де в місці найбільшого звуження до нього з ємності з вершками 3 за допомогою насосу 7 через гнучкий шланг 10 подаються вершки. Насос подачі вершків приводиться в дію при вмиканні до електричної мережі джерела живлення 15 та запуску тумблеру 14, при цьому необхідна кількість вершків забезпечується за допомогою частотного перетворювача з регулятором 12. Нормалізоване та гомогенізоване молоко відводиться крізь гнучкий шланг 13 у спеціальну ємність.

Формулювання цілей статті (постановка завдання). Для обґрунтування раціональних параметрів струминного гомогенізатора молока з роздільною подачею вершків щільового типу необхідно визначити змінні та сталі фактори процесу та межі їх коливання, провести експериментальні дослідження, визначити характер зв'язку між основними параметрами гомогенізатора і середнім розміром жирових кульок після диспергування і виконання перевірки адекватності результатів аналітичних досліджень. Тому метою даної статті було визначення раціональних параметрів струминно-щільового гомогенізатора молока для забезпечення середнього діаметру жирових кульок після диспергування на рівні технологічно обумовлених значень та визначення потужності пристроїв для проведення гомогенізації. Для досягнення поставленої мети, вирішувалось декілька задач, зокрема визначались:

- сталі та змінні фактори процесу диспергування та межі їх коливання;
- характер залежності між шириною щілини струминно-щільового гомогенізатора молока та середнім діаметром жирових кульок після гомогенізації;
- залежність між діаметром камери в місці найбільшого звуження, жирністю і швидкістю подачі вершків та середнім діаметром жирових кульок після диспергування;
- характер залежності між потужністю насосів приводу подачі знежиреного молока, вершків та загальною потужністю, що витрачався на процес гомогенізації від продуктивності струминно-щільового гомогенізатора молока.

Основна частина. До змінних факторів процесу належить діаметр камери гомогенізації в місці найбільшого звуження, жирність дисперсної фази, ширина кільцевої щілини та швидкість подавання знежиреного молока.

Згідно результатів аналітичних досліджень та залежностей у найбільш близькій за будовою конструкції струминного гомогенізатора молока з роздільною подачею вершків, жирність дисперсної фази, що використовується для нормалізації має

знаходиться в діапазоні 10–40% [5]. При цьому нижня межа обумовлена зростанням енергетичних витрат для забезпечення необхідної жирності вихідного продукту, а верхня межа обґрунтована посиленням тенденцій до утворення вторинних агломерацій при використанні вершків більшої жирності. Для проведення експериментальних досліджень використовувались вершки жирністю 10, 25 та 40%.

Ширина кільцевої щілини згідно результатів аналітичних розрахунків має складати 0,1–0,9 мм. При цьому нижня межа діапазону обумовлена необхідністю забезпечення продуктивності гомогенізатора, а верхня обґрунтована стрімким збільшенням середнього діаметру жирових кульок після гомогенізації [6]. При цьому дослідження проводились при ширині щілини на рівні 0,1, 0,5, 0,9 мм.

Швидкість подавання знежиреного молока, згідно найбільш близької за будовою та принципом дії конструкції струминного гомогенізатора молока з роздільною подачею вершків має коливатись від 30 до 90 м/с. Нижня межа діапазону обґрунтована необхідністю створення різниці між швидкостями дисперсної та дисперсійної фаз, а верхня обумовлена суттєвим зростанням енергетичних витрат, що пов'язано з перебігом процесу по принципу клапанних гомогенізаторів [5]. При проведенні експериментальних досліджень швидкість подачі знежиреного молока на різних рівнях складала відповідно 30, 60, 90 м/с.

Діаметр камери гомогенізації в місці найбільшого звуження також є важливим параметром, що забезпечує зменшення розміру внутрішніх поверхонь камери, яке необхідне для створення максимальної швидкості потоку знежиреного молока в центральній частині камери, де до нього додаються вершки. Згідно результатів аналітичних розрахунків цей параметр має варіювати в межах 0,4–1,2 мм. При цьому нижня межа обумовлена необхідністю забезпечення продуктивності диспергатора на рівні промислових зразків, а верхня обґрунтована розсіюванням дисипації потужності, що погіршує процес зменшення середнього розміру жирових кульок [7]. При проведенні експериментальних досліджень використовувались камери, діаметр яких в місці найбільшого звуження складав 0,4, 0,8, 1,2 мм.

Після отримання дослідних даних виконувалась їх перевірка на наявність грубих похибок дослідження. Обчислення середнього діаметру жирових кульок після гомогенізації виконувалось шляхом комп'ютерної обробки мікрофотографій зразків, що були зроблені для характерних полів зору через оптичний мікроскоп з приєднаною цифровою камерою.

Залежність між середнім діаметром жирових кульок після диспергування має параболічний характер, як зображено на графіку (рис. 3)

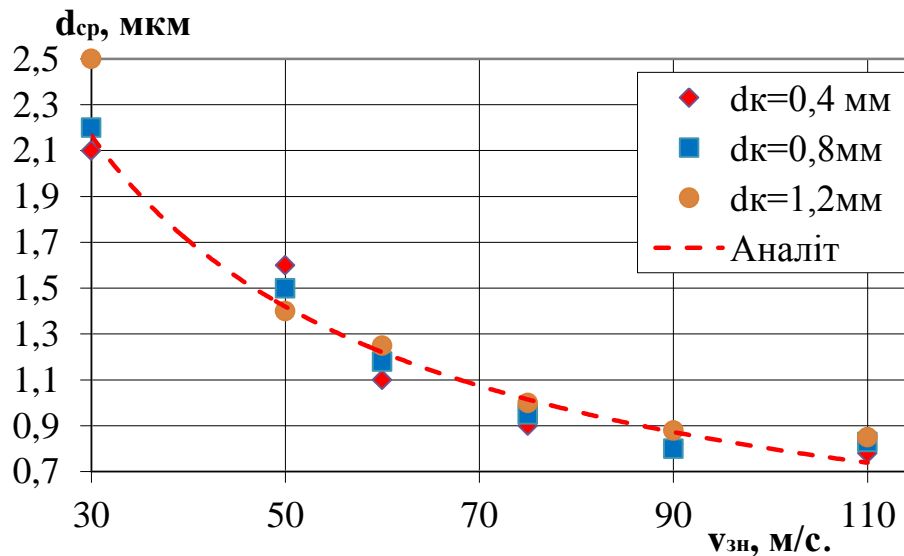


Рис. 3. Графік залежності середнього діаметра жирових кульок $d_{ср}$ від швидкості знежиреного молока $v_{зн}$ і діаметра камери гомогенізації в місці найбільшого звуження d_k (при $We_k = 28$, $\sigma = 0,1$).

Аналіз залежності, зображеної на графіку (рис. 3) свідчить, що збільшення діаметра камери в місці найбільшого звуження в межах коливання при проведенні експерименту дає незначний вплив на зміну середнього розміру жирових кульок в усьому діапазоні швидкостей руху знежиреного молока (30–110 м/с). Найменший розмір жирових кульок, що знаходиться в межах технологічно обумовлених значень можливо досягти при швидкості подачі знежиреного молока, що знаходиться в діапазоні 60–100 м/с та більше. Слід зазначити, що при перевищенні швидкості подачі знежиреного молока більше 100 м/с, перебіг процесу диспергування відбувається аналогічно до клапанного типу конструкцій, внаслідок чого спостерігається кратне зростання енергетичних витрат на здійснення гомогенізації. Отже, робочий діапазон швидкостей руху знежиреного молока для забезпечення заданої дисперсності має коливатись в межах 60–100 м/с. Оскільки при зменшенні діаметру камери в місці найбільшого звуження до значень менше 0,4–0,8 мм згідно результатів аналітичних розрахунків спостерігається значне зростання енергетичних витрат, раціональний параметр діаметра камери в місці найбільшого звуження має знаходитись в межах указанного діапазону. Оптимальне значення цього параметру дозволить визначити оцінка енергетичних витрат при проведенні експериментальних досліджень та проведення оптимізації параметрів процесу.

Дослідження залежності середнього діаметра жирових кульок після диспергування від швидкості подачі вершків та жирності дисперсної фази являє собою залежність, наведену на рис. 4.

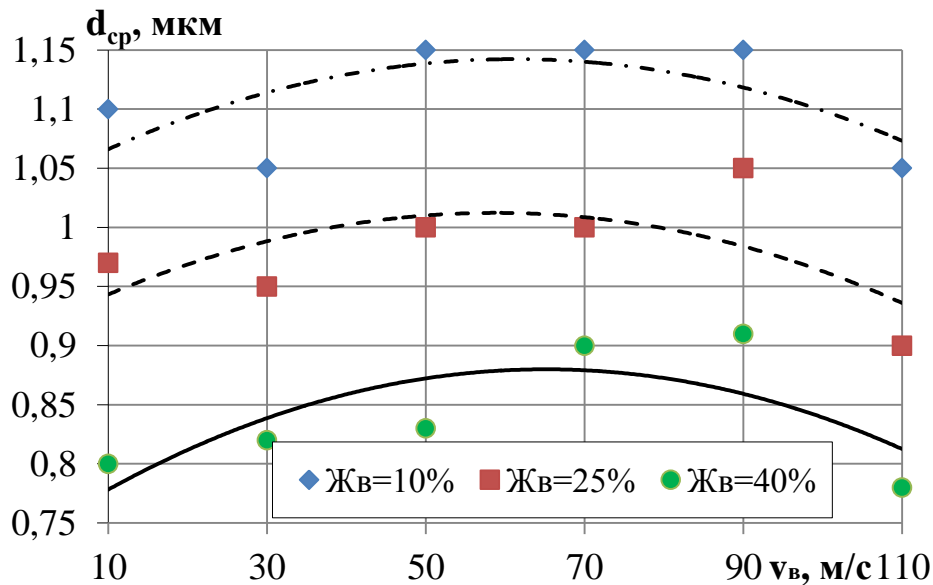


Рис. 4. Графік залежності середнього діаметра жирових кульок d_{cp} від швидкості вершків v_v і жирності вершків J_v , що додаються при нормалізації молочної емульсії.

Аналіз отриманої залежності, зображеної на рис. 4 свідчить, що для зменшення середнього розміру жирових кульок до технологічно обумовлених показників та нижче можна досягти шляхом підвищення жирності вершків, що додаються до знежиреного молока або підвищенням швидкості подачі вершків. Заданий середній розмір жирових кульок після диспергування досягається при швидкості подачі вершків $v_v = 10\text{--}40$ м/с та при швидкості, що перевищує 100 м/с. Це пояснюється тим, що в діапазоні значень швидкості подачі вершків $v_v = 50\text{--}100$ м/с забезпечується мінімальна різниця між швидкостями руху дисперсійної та дисперсної фазами продукту. З іншого боку високу дисперсність дозволяє отримати використання режиму, що передбачає подачу вершків зі швидкістю $v_v \geq 100$ м/с, але при цьому гомогенізація буде проходити подібно до процесу в клапанних диспергаторах з відповідним зростанням енергетичних витрат процесу. Отже, раціональні значення швидкості подачі вершків знаходяться в діапазоні 10–40 м/с, при цьому для отримання молочних продуктів з високим ступенем дисперсності слід використовувати вершки жирністю 25–40%.

Результати експериментальних досліджень характеру залежності між середнім діаметром жирових кульок після диспергування, шириною кільцевої щілини та жирністю вершків, що використовуються в гомогенізаторі–нормалізаторі щільового типу, наведені на рис. 5.

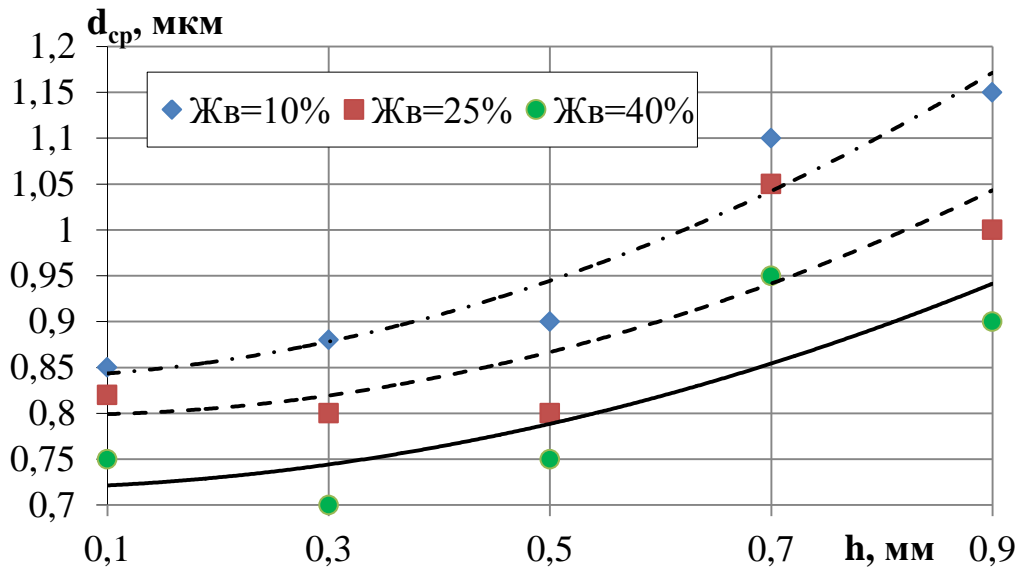


Рис. 5. Графік залежності середнього діаметра жирових кульок $d_{ср}$ від ширини щілини камери гомогенізації в місці найбільшого звуження h і жирності вершків $J_{в}$.

Аналіз отриманої залежності, зображеної на рис. 5 свідчить, що досягти зменшення середнього розміру жирових кульок можливо шляхом зменшення ширини кільцевої щілини h та підвищенням жирності вершків. При зменшенні ширини щілини до розміру $h=0,1-0,5$ мм можливо отримати продукт з середнім розміром жирових кульок, що складає $0,7-0,95$ мкм, що знаходиться на рівні показників дисперсності клапанного гомогенізатора. Але, використання кільцевої щілини, ширина якої є меншою за $h=0,4$ мм згідно результатів аналітичних досліджень призводить до 3–4 кратного зростання енергетичних витрат, порівняно з використанням гомогенізатору, ширина кільцевої щілини в якому коливається в межах $h=0,5-0,9$ мм.

Експериментальні дослідження дозволили встановити зв'язок між середнім діаметром жирових кульок після гомогенізації, жирністю вершків та шириною камери в місці найбільшого звуження, що має близький до лінійного характер, зображений на рис. 6.

Аналіз експериментальної залежності, наведеної на рис. 6 свідчить, що для забезпечення середнього діаметра жирових кульок на рівні клапанних машин, ширина щілини в місці найбільшого звуження має знаходитись в діапазоні $0,5$ мм та менше. Найгірші показники дисперсності забезпечуються при швидкості подачі вершків, яка складає $v_{в}=60$ м/с, що пояснюється низькою різницею між швидкостями знежиреного молока та вершків, що є необхідною умовою подрібнення жирових кульок. Високі показники дисперсності, які забезпечуються при швидкості подачі вершків $v_{в}=110$ м/с

пояснюються перебігом процесу подібно до диспергування в клапанних гомогенізаторах, та є економічно неефективним.

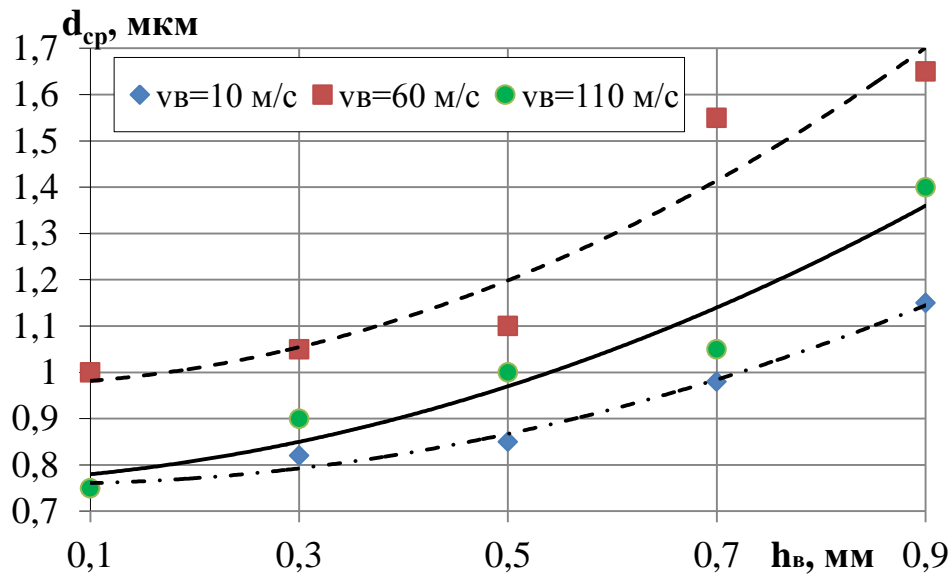


Рис. 6. Графік залежності середнього діаметра жирових кульок після диспергування d_{cp} від ширини щілини камери гомогенізації в місці найбільшого звуження h і швидкості вершків v_v .

Отже, найкращі показники дисперсності можна забезпечити при швидкості подачі вершків, що дорівнює 10 м/с, що пояснюється високою швидкістю обтікання жирової кульки знежиреним молоком, при якій створюються необхідні гідродинамічні умови для ефективного зменшення розмірів часток дисперсної фази.

Результати експериментальних досліджень характеру залежності між жирністю вершків та шириною щілини камери гомогенізації в місці найбільшого звуження h наведені на рис. 7.

Аналіз отриманої залежності (рис. 7) свідчить, що забезпечити середній розмір жирових кульок на рівні нормативних вимог можливо при використанні камери, що має якомога меншу ширину кільцевої щілини та використання вершків, жирність яких складає 30–40%. Середній діаметр жирових кульок при цьому незначною мірою залежить від ширини кільцевої щілини та при збільшенні її розміру з $h=0,1$ мм до $h=0,9$ мм при використанні вершків жирністю 30% показники дисперсності погіршуються лише на 10%.

Згідно отриманих даних після обробки та обчислення було знайдено потужності насосів, що забезпечують подачу дисперсійної, дисперсної фаз та сумарна потужність, що витрачається на роботу диспергатора, наведені на рис. 8.

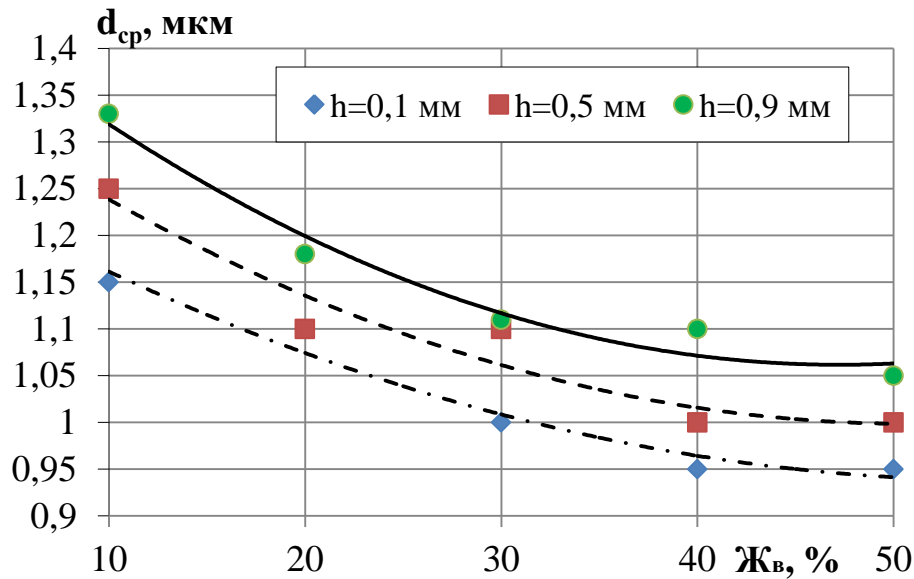


Рис. 7. Графік залежності середнього діаметра жирових кульок d_{cp} від жирності вершків $Ж_v$, та ширини щілини камери гомогенізації в місці найбільшого звуження h .

Аналіз графіку, наведеного на рис. 8 свідчить про те, що характер даних, отриманих в ході експериментальних досліджень в цілому узгоджується з результатами аналітичних досліджень. При цьому експериментальні витрати перевищують показники, отримані в ході аналітичних досліджень на 7–12%, що пояснюється втратою потужності за рахунок ККД насосів та приводів.

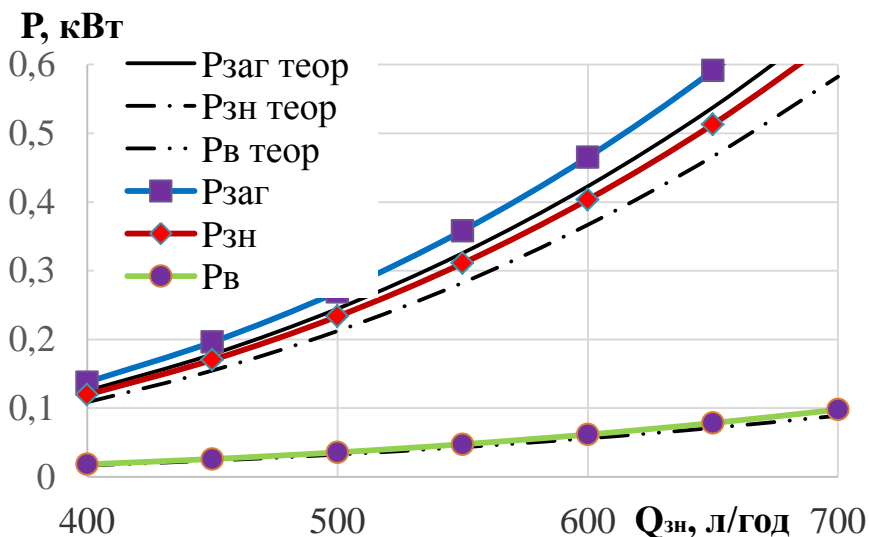


Рис. 8. Графік залежності потужності насосів для подачі знежиреного молока, вершків та сумарної потужності від продуктивності струминно-щілинного гомогенізатора молока.

Висновки. Згідно результатів проведених експериментальних досліджень виявлено, що для забезпечення середнього розміру жирових кульок на рівні технологічно обґрунтованих значень (0,8–1,2 мкм) при проведенні диспергування діаметр камери в місці найбільшого звуження має незначний вплив на показники дисперсності. При цьому для забезпечення максимальної різниці між швидкостями знежиреного молока та вершків, швидкість подачі дисперсійної фази має коливатись в діапазоні 60–100 м/с, а швидкість подачі вершків має складати 10–40 м/с.

Згідно результатів експериментальних досліджень отримати жирові кульки розміром 0,8 мкм можливо при швидкості подачі знежиреного молока, що дорівнює 88–95 м/с, діаметрі камери в місці найбільшого звуження 0,8 мм, ширині кільцевої щілини в межах 0,1–0,5 мм, жирності вершків 30–40%, швидкості подачі вершків 15–23 м/с. Для визначення раціональних параметрів струминно-щільового гомогенізатора молока планується проведення дослідження зв'язку між основними параметрами диспергатора та енергетичними витратами процесу, після якого буде виконана оптимізація експериментальних параметрів гомогенізатора.

Література:

1. *Фиалкова Е. А.* Гомогенизация. Новый взгляд: монография–справочник. Санкт-Петербург: ГИОРД, 2006. 392 с.
2. *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*. Мелітополь, 2015. Вип. 15, т. 1. С. 240-248.
3. *Самойчук К. О., Ковалев А. А., Бездичный А. А.* Моделирование процесса струйной гомогенизации молока с раздельной подачей сливок // *Вестник МГУП*. Могилев, 2015. Вип. 2 (19). С. 69-76.
4. *Walstra P., Wouters J. T. M., Geurts T. J.* Homogenization. In: *Dairy Science and Technology*. Second Edn. London, New York: Taylor & Francis Group, LLC. Boca Raton, 2006. P. 279.
5. *Самойчук К. О.* Розвиток наукових основ гідродинамічного диспергування молочних емульсій : автореф. дис ... докт. техн. наук: 05.18.12. Харків, 2018. 44 с.
6. *Goulet A., Glasgow I., Aubry N.* Effects of microchannel geometry on pulsed flow mixing // *Mechanics Research Communications*. 2006. Vol. 33. P. 739-746.
7. *Матвиенко О. В., Ушаков В. М., Евтюшкин Е. В.* Математическое моделирование турбулентного переноса дисперсной фазы в турбулентном потоке // *Вестник ТГПУ*. Томск, 2004. Вып. 6. С. 50-53.

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ ПАРАМЕТРОВ СТРУЙНОГО ГОМОГЕНИЗАТОРА МОЛОКА С РАЗДЕЛЬНОЙ ПОДАЧЕЙ СЛИВОК ЩЕЛЕВОГО ТИПА

Самойчук К. О., Ковалев А. А., Паляничка Н. А.,
Колодий А. С., Лебедь М. Р.

Аннотация – в статье приведены результаты экспериментальных исследований процесса гомогенизации в струйном гомогенизаторе молока с раздельной подачей сливок щелевого типа. Определен и обоснован диапазон колебаний переменных факторов процесса. Установлена зависимость между средним диаметром жировых шариков после диспергирования, скоростью подачи обезжиренного молока и диаметром камеры гомогенизации в месте наибольшего сужения. Проведена обработка экспериментальных данных и построены графики, демонстрирующие зависимость среднего диаметра жировых шариков от скорости подачи сливок, жирности сливок и диаметра камеры гомогенизации в месте наибольшего сужения. Представлена и проанализирована зависимость среднего диаметра жировых шариков от жирности сливок и ширины кольцевой щели струйного гомогенизатора молока с раздельной подачей сливок. Представлен график, демонстрирующий зависимость мощности диспергатора от производительности экспериментального образца для экспериментальных и теоретических значений мощности привода насосов подачи обезжиренного молока и сливок, и общей мощности процесса.

AN EXPERIMENTAL STUDY OF PARAMETERS IN THE SLOT TYPE JET-MIXING HOMOGENIZER OF MILK

K. Samoichuk, A. Kovalyov, N. Palyanichka, A. Kolodiy, M. Lebed

Summary

Aiming to reduce the cost of a liter of milk in the process of its processing, experts come to the need to reduce energy costs for one of the most expensive processes of technology—homogenization. This conclusion is due to the fact that the energy costs for the most common in the dairy industry design of the valve milk homogenizer exceed 8 kW•h/t of the manufactured product. According to the results of long-term studies, a significant reduction in energy costs for dispersion can

be achieved using designs based on creating a maximum difference between the rates of dispersion and dispersed phases of the product.

For this purpose, on the basis of the Department of OPHV (TSATU) was developed the design of jet–slit homogenizer of milk, which provides the ability to supply the required amount of cream to skim milk, which flows through the chamber, reaches the place of greatest contraction, where normalization occurs. One of the tasks of experimental studies is to study the dependence of the average diameter of fat globules, which is the main indicator of quality on the parameters of the dispersion process.

The experimental studies have allowed to establish the dependence of the average diameter of fat globules on the speed of skim milk in the place of the greatest narrowing of the homogenization chamber and the chamber diameter in the place of the greatest narrowing. In addition, during the studies it was possible to establish the nature of the dependence of the average size of fat globules after dispersion on the fat content of cream, cream feed rate, the width of the annular slit in the place of the greatest narrowing of the chamber of the jet–slit milk homogenizer.

The experimental studies and subsequent processing of the data allowed to calculate the power costs used to drive the pumps of skim milk, cream and the total power of the dispersion process and to compare the obtained values with the dependencies obtained by the analytical way.