

УДК 637.134

DOI:

**ОПТИМІЗАЦІЯ ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНИХ ПАРАМЕТРІВ  
ТА ВИЗНАЧЕННЯ ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНОГО ЗНАЧЕННЯ  
КРИТЕРІЮ ВЕБЕРА СТРУМИННО-ЩІЛИННОГО  
ГОМОГЕНІЗАТОРА МОЛОКА**

Самойчук К. О., д. т. н.,

Ковальов О. О., асп.,\*

Колодій О. С., к. т. н.,

Серий І. О., асп.\*\*

*Таврійський державний агротехнологічний університет  
ім. Д. Моторного*

Тел. (0619) 42-13-06

**Анотація** – у статті представлено та проаналізовано результати оптимізації основних параметрів струминно-щілинного гомогенізатора молока, за графіками, побудованими на основі даних, отриманих при проведенні експериментальних досліджень. Наведені результати оптимізації за показником жирності вершків, що використовуються при складанні нормалізованої суміші в залежності від ширини кільцевої щілини струминного диспергатора молока щілинного типу. Проаналізовано графік оптимізації швидкості дисперсної фази в залежності від жирності вершків, які використовувались при проведенні експериментальних досліджень процесу гомогенізації молочної емульсії. Наведені та обґрунтовані раціональні значення жирності вершків та швидкості їх подачі, при використанні яких забезпечуються мінімальні витрати енергії гомогенізатора при одночасному забезпеченні середнього діаметра жирових кульок, що знаходиться на рівні технологічно обумовлених значень (0,85 мкм). На основі експериментальних даних визначено критичне значення критерію Вебера, який є основним показником подрібнення жирових кульок в струминному диспергаторі молока щілинного типу.

**Ключові слова** – щілинний диспергатор, молоко, енергетичні витрати, середній діаметр кульок, вершки, жирова кулька, оптимізація.

**Постановка проблеми.** Гомогенізація належить до нормативних операцій, що використовуються для покращення поживних, смакових та товарних якостей для більшості молочних

---

© Самойчук К. О., Ковальов О. О., Колодій О. С., Серий І. О.

\* Науковий керівник – д. т. н., доцент Самойчук К. О.

\*\* Науковий керівник – к. т. н., доцент Кувачов В. П.

продуктів. Відмінною рисою гомогенізації є те, що для отримання продукту, дисперсність якого знаходиться у межах технологічно обумовлених значень (0,8-1,2 мкм), витрати енергії для найбільш поширених у промисловості конструкцій клапанних гомогенізаторів можуть сягати понад 8 кВт·год/т гомогенізованого молока [1]. Водночас з цим енергетичні витрати на проведення диспергування складають суттєвий відсоток в енергетичному балансі технологій отримання продукту. Зниження витрат енергії на диспергування призведе до зростання конкурентоспроможності та підвищить споживчий попит на молочну продукцію. Однак підвищення енергоефективності процесу диспергування ускладнюється відсутністю єдиної теоретичної бази процесу, що в свою чергу пов'язано з високими швидкостями руху рідини (понад 100-200 м/с) та мікроскопічним розміром досліджуваних часток дисперсної фази (менше 1 мкм).

*Аналіз останніх досліджень.* Перспективні дослідження новітніх конструкцій гомогенізаторів дозволяє стверджувати, що досягти значного зниження енергетичних витрат на гомогенізацію при отриманні середнього розміру жирових кульок на рівні технологічно обумовлених значень можливо досягти при дослідженні та впровадженні конструкцій, дія яких заснована на створенні максимальної різниці між швидкостями дисперсійної та дисперсної фаз молока [2]. Такий принцип реалізується в конструкції розробленого лабораторного зразка струминно-щілинного диспергатора молока з роздільною подачею дисперсної фази [3]. Загальний вигляд та складові частини камери струминного диспергатора молока щілинного типу наведені на рис. 1.

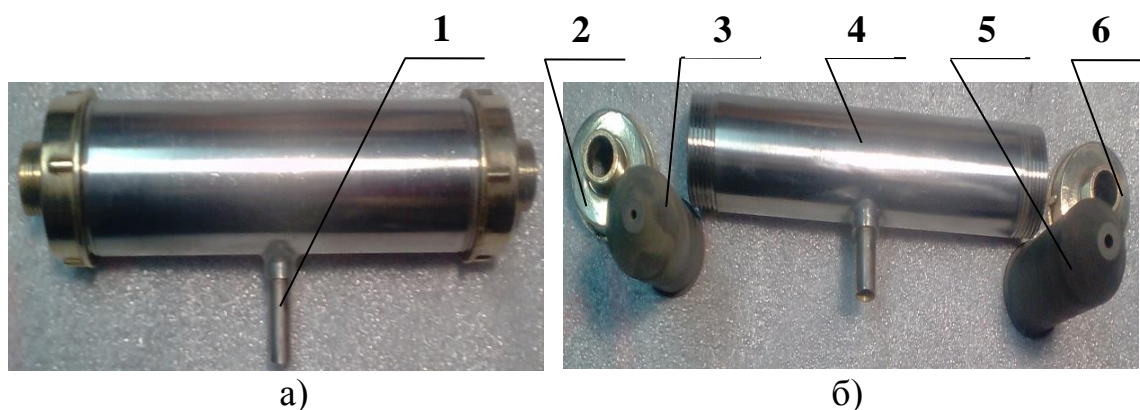


Рис. 1. Камера струминного гомогенізатора молока щілинного типу: а) у зборі, б) внутрішня будова: 1 – патрубок подачі продукту з ємності з вершками; 2 – патрубок подачі знежиреного молока; 3 – конфузор; 4 – корпус камери струминного диспергатора молока щілинного типу; 5 – дифузор; 6 – патрубок для відведення гомогенізованого та нормалізованого за жирністю молока

Основним вузлом конструкції гомогенізатора є камера струминно-щілинного диспергатора молока (рис. 1, б), яка складається з корпусної частини 4, у яку встановлюються профільовані вставки 3 та 5, які являють собою відповідно місця найбільшого звуження конфузору та відповідно розширення дифузору. Технологічний процес передбачає попереднє проведення сепарації молока, що отримане від корів різного віку, різних способів утримання та ін. Після цього знежирене молоко подається крізь патрубок подачі 2 з високою швидкістю, для отримання продукту, показники якості якого мають знаходитись в межах технологічно обумовлених значень. При проходженні продукту в місці найбільшого звуження конфузору, де знежирене молоко має найбільшу швидкість, до нього в співвідношенні, що розраховується згідно рівняння матеріального балансу з ємності з вершками крізь патрубок 1 (рис. 1, а) додається необхідна кількість вершків крізь кільцеву щілину. Готовий продукт відводиться крізь патрубок відведення 6.

*Формулювання цілей статті (постановка завдання).*

Підвищення енергоефективності гомогенізатора можливо за умови визначення та встановлення раціональних параметрів струминного диспергатора молока щілинного типу. Такий результат можливо отримати при впровадженні конструкції струминно-щілинного гомогенізатора молока, заснованому на створенні максимальної різниці швидкостей фаз, що дозволить знизити робочий тиск подачі знежиреного молока та відповідно енергетичні витрати на проведення диспергування. Для цього на підставі попередньо отриманих даних аналітичних досліджень проводилась оптимізація параметрів струминного диспергатора молока щілинного типу, результати якої наведено в [2]. Крім цього за результатами отриманими при проведенні експериментальних досліджень для визначення раціональних значень якісно-енергетичних показників диспергатора необхідно провести оптимізацію параметрів [3]. Тому метою даної статті було визначення раціональних параметрів роботи струминно-щілинного диспергатора, встановлення яких забезпечує отримання продукту з найменшим середнім розміром жирових кульок на рівні технологічно обумовлених показників при мінімальних витратах енергії на здійснення операції. Для досягнення поставленої мети визначались:

- раціональні параметри жирності та швидкості подачі вершків;
- експериментальні значення критерію Вебера.

*Основна частина.* У попередньо опублікованих працях [4, 5] було аналітично визначено раціональні параметри струминно-щілинного гомогенізатора молока, обґрунтовано діапазон коливання

змінних факторів процесу, наведено отримані залежності середнього діаметра та енергетичних витрат від основних параметрів струминного диспергатора молока щілинного типу.

Для визначення раціональних значень жирності вершків проводимо оптимізацію, за даними якої при середньому розмірі жирових кульок, що знаходиться в межах технологічно обумовлених значень (0,85 мкм) проводимо лінії рівної дисперсності, позначені суцільною лінією, зображеною на рис. 2.

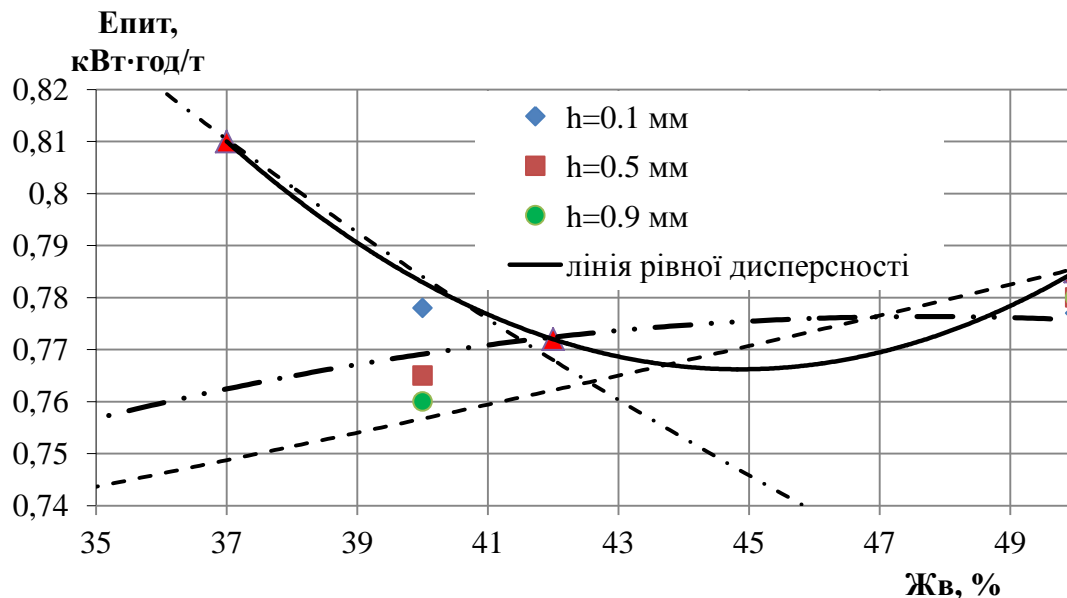


Рис. 2. Оптимізація жирності вершків, що використовуються при нормалізації знежиреного молока до жирності 3,5% та ширини щілини в струминно-щілинному гомогенізаторі молока

Аналіз отриманих залежностей свідчить, що для отримання жирових кульок, середній діаметр яких складає 0,85 мкм, при використанні щілини, ширина якої дорівнює  $h=0,4-0,6$  мм, найменші енергетичні витрати забезпечуються при використанні вершків, жирністю 42-48%. При використанні щілини, ширина якої складає  $h=0,9$  мм, питомі енерговитрати зростають на 1-2%, при цьому жирність вершків, що використовуються для отримання нормалізованої молочної емульсії жирністю 3,5% має складати 44-50%. Найбільші енергетичні витрати має варіант з використанням щілини, шириною  $h=0,1$  мм та менше, у якому для отримання молочної емульсії жирністю 3,5% потрібно використовувати вершки жирністю 36-37%. Отже при ширині щілини  $h=0,5$  мм, раціональними параметрами струминно-щілинного диспергатора що забезпечує мінімальні витрати енергії є використання вершків жирністю 40-42%.

Для визначення раціонального значення швидкості подачі вершків слід провести оптимізацію даних, отриманих при проведенні експерименту, зображену на рис. 3.

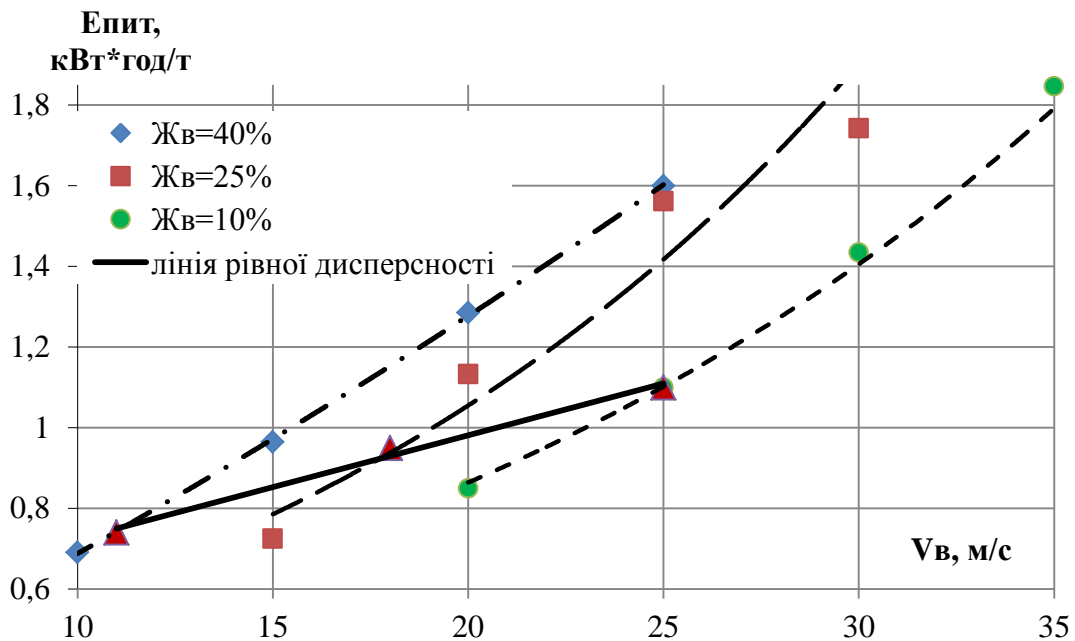


Рис. 3. Оптимізація швидкості та жирності вершків, що використовуються при нормалізації в струминно-щілинному гомогенізаторі молока

Аналіз отриманих при проведенні оптимізації швидкості подачі вершків даних (рис. 3) свідчить, що забезпечити мінімізацію енергетичних витрат на проведення диспергування для отримання молочної емульсії жирністю 3,5%, можливо при використанні вершків жирністю 40%, що досягається при швидкості подачі вершків, що дорівнює 11-13 м/с. Енергетичні витрати процесу при цьому не будуть перевищувати 0,7-0,75 кВт·год/т гомогенізованого молока. При збільшенні жирності вершків до 50% незначне 3-5% зниження енергії на диспергування буде компенсуватись підвищеними витратами енергії на проведення сепарації для отримання високо жирних вершків. При зменшенні жирності вершків до 25%, енергетичні витрати процесу зростають на 18-20%, оскільки згідно рівняння матеріального балансу збільшується кількість потрібних для складання нормалізованої суміші вершків, що підвищує необхідну швидкість знежиреного молока для забезпечення максимальної різниці швидкостей фаз. Енергетичні витрати при забезпеченні середнього розміру жирових кульок на рівні технологічно обумовлених значень мають максимальне значення (1,1 кВт·год/т) при використанні вершків жирністю 10%. Отже, найменші енергетичні витрати процесу диспергування забезпечуються при використанні вершків жирністю 40% при швидкості їх подачі, що коливається в межах 11-13 м/с.

Ефективне подрібнення жирових кульок забезпечується при виконанні умови (1) [2]

$$We^m = \frac{2\rho_{пл} \cdot k_{щ}^2 \cdot v_{зн}^2 \cdot d_{cp}}{\sigma_{ж-п}} \geq We_k, \quad (1)$$

де  $\rho_{пл}$  – густина молочної плазми,  $\text{кг/м}^3$   $\rho_{пл} = 1030 \text{ кг/м}^3$ ;

$d_{cp}$  – середній діаметр жирової кульки після гомогенізації, який згідно нормативних вимог має складати 0,85мкм;

$v_{зн}$  – швидкість потоку знежиреного молока в місці подавання жирової фази, яка при діаметрі камери в місці найбільшого звуження  $d_k=1,2$  складає 40м/с;

$k_{щ}$  – коефіцієнт струминно–щілинної гомогенізації, значення якого з врахуванням знайдених та позначених в роботі емпіричних залежностей приймається рівним одиниці;

$\sigma_{ж-п}$  – поверхневий натяг на межі розділу жиру та плазми,  $\sigma_{ж-п} = 0,1 \text{ Н/м}$ .

Згідно результатів проведених розрахунків отримане значення числа Вебера для струминно-щілинного гомогенізатора підтверджує дані попередніх досліджень [2, 5] та дорівнює 28.

*Висновки.* Згідно результатів проведених експериментальних досліджень виявлено, що для забезпечення середнього розміру жирових кульок на рівні технологічно обґрунтованих значень (0,85 мкм) ширина кільцевої щілини має дорівнювати 0,5 мм. При цьому для забезпечення максимальної різниці між швидкостями знежиреного молока та вершків, швидкість подачі вершків за умови мінімальних енергетичних витрат має коливатись в діапазоні 11-13 м/с, а жирність вершків, що використовуються при складанні нормалізованої суміші має знаходитися в діапазоні 40-42%. Експериментальні дослідження підтвердили значення критерію Вебера, що було прийнято для аналітичних розрахунків, яке складає 28. В ході подальших досліджень планується розробити методику розрахунку промислового зразка струминно-щілинного гомогенізатора молока.

#### Література:

1. *Фиалкова Е. А.* Гомогенизация. Новый взгляд: монография-справочник. Санкт-Петербург: ГИОРД, 2006. 392 с.
2. Аналітичні дослідження енергетичних показників і параметрів якості струминно-щільового гомогенізатора молока / *К. О. Самойчук* та ін. // Праці ТДАТУ. Мелітополь, 2019. Вип. 19, т. 1. С. 3-18.
3. Експериментальні дослідження параметрів струминного

гомогенізатора молока з роздільною подачею вершків щільового типу / К. О. Самойчук та ін. // Праці ТДАТУ. Мелітополь, 2019. Вип 19, т. 2. С. 117-129.

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

5. *Самойчук К. О.* Розвиток наукових основ гідродинамічного диспергування молочних емульсій : автореф. дис ... док. техн. наук: 05.18.12. Харків, 2018. 44 с.

## **ОПТИМИЗАЦИЯ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ ПАРАМЕТРОВ И ОПРЕДЕЛЕНИЕ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОГО ЗНАЧЕНИЯ КРИТЕРИЯ ВЕБЕРА СТРУЙНО-ЩЕЛЕВОГО ГОМОГЕНИЗАТОРА МОЛОКА**

Самойчук К. О., Ковалев А. А., Колодий А. С., Серый И. А.

**Аннотация** – в статье представлены и проанализированы результаты оптимизации основных параметров струйно-щелевого гомогенизатора молока, построенных на основании данных, полученных в ходе экспериментальных исследований. Приведены результаты оптимизации жирности сливок, используемых при составлении нормализованной смеси, в зависимости от ширины кольцевой щели в струйном диспергаторе молока щелевого типа. Проанализирован график оптимизации скорости дисперсной фазы в зависимости от жирности сливок, используемых при проведении экспериментальных исследований процесса гомогенизации молочной эмульсии. Представлены и обоснованы рациональные значения жирности сливок, ширины кольцевой щели диспергатора и скорости подачи дисперсной фазы, при использовании которых достигаются минимальные затраты энергии при одновременном обеспечении среднего диаметра жировых шариков на уровне технологически обусловленных требований (0,85 мкм). На основании данных экспериментальных исследований, определено значение критерия Вебера, являющегося основным показателем, определяющим уменьшение среднего размера жировых шариков в струйном диспергаторе молока щелевого типа.

## **OPTIMIZATION OF EXPERIMENTAL PARAMETERS AND IDENTIFYING THE EXPERIMENTAL VALUES OF WEBER CRITERION IN THE SLOT TYPE JET-MIXING HOMOGENIZER OF MILK**

K. Samoichuk, O. Kovalyov, O. Kolodiy, I. Seriy

### *Summary*

**Reducing the energy costs of homogenization while ensuring the average diameter of fat globules at the level of technologically determined values (0.8-1.2 microns), is a priority for scientists in the industry. Prospective studies claim to reduce energy costs for the dispersing it is possible to achieve when using a jet homogenization, whose operation is based on creating the maximum difference between the velocity dispersion and the dispersed phase of the product, in particular design of of the jet–slot milk homogenizer type.**

**The article presents and analyzes the results of optimization of the main parameters, based on the data obtained in the course of experimental studies. The results of optimization of the cream fat content used in the preparation of the normalized mixture, depending on the width of the annular slit in the jet milk disperser of the slit type are presented. The graph of optimization of the disperse phase speed depending on the cream fat content used in the experimental studies of the milk emulsion homogenization process is analyzed. The rational values of cream fat content, the width of the ring slit of the dispersant and the speed of the dispersed phase supply are presented and justified, using which the minimum energy costs are achieved while ensuring the average diameter of the fat globules at the level of technologically conditioned requirements (0.85  $\mu\text{m}$ ). On the basis of experimental data, the value of the Weber criterion, which is the main indicator determining the decrease in the average size of fat globules in the jet milk dispersant of the slit type, is determined.**

**According to the results obtained, to reduce the energy costs of the dispersion process while ensuring the diameter of the fat globules at the level of technologically determined values, cream with a fat content of 40-42% should be used, which must be fed through an annular slot whose width is 0.5 mm at a speed of 11-13 m/s. The experimentally determined value of the Weber number for the jet-slot dispersant is 28 and confirms the results obtained in the study of the jet homogenizer of milk with a separate supply of cream.**