



DOI: 10.31388/2220-8674-2023-2-13

УДК 637.134

К. О. Самойчук, д.т.н, проф.

ORCID: 0000-0002-3423-3510

О. О. Ковальов, к.т.н., ст. викл.

ORCID: 0000-0002-4974-5201

О. О. Червоткіна, асист.

ORCID: 0000-0002-6814-0566

Таврійський державний агротехнологічний університет імені Дмитра Моторного

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

ПОРІВНЯННЯ ЕНЕРГОЕФЕКТИВНОСТІ СТРУМИННИХ ГОМОГЕНІЗАТОРІВ МОЛОКА З РОЗДІЛЬНОЮ ПОДАЧЕЮ ВЕРШКІВ

Анотація. В статті проведено порівняння енергоефективності струминного гомогенізатора молока та струминно-щілинного гомогенізатора, обидва з яких реалізують принцип роздільної подачі вершків. Отримані результати свідчать про високі значення потужності насоса подачі вершків, які перевищують відповідні показники насоса подачі знежиреного молока в 5,5–5,7 разів. В результаті проведеного аналізу визначено, що при однакових показниках продуктивності на рівні 1000 л/год потужність струминно-щілинного гомогенізатора молока майже в 1,5 рази менше за відповідний показник у струминному гомогенізаторі молока з роздільною подачею вершків. Аналіз мікрофотографій процесу свідчить про більш ефективне зменшення середнього діаметра жирових кульок при обробці в струминно-щілинному гомогенізаторі (0,82 мкм) в порівнянні з струминним гомогенізатором з роздільною подачею вершків (0,88 мкм).

Ключові слова: середній діаметр, струминний гомогенізатор, канал подачі, вершки, енергетичні витрати, молоко, порівняльна оцінка

Постановка проблеми. Низька енергоефективність конструкцій, які використовуються для диспергування жирової фази молочної емульсії являє досі не вирішену проблему молокопереробної галузі. Здебільшого, причиною цього є відсутність єдиної теорії, яка би узагальнювала би наявні відомості та раніше отримані залежності. Наявні гіпотези, кількість яких перевищує 10, мають суперечності та протиріччя [1]. А створені на основі них конструкції не можуть забезпечити технологічні обумовлені значення середнього діаметру жирових кульок (яке для найбільш поширених в молокопереробній галузі складає 0,75–0,85 мкм) серед яких електрогідравлічні, вакуумні



та ін. конструкції [2]. У випадку їх відповідності за показниками якості диспергування (середній діаметр жирових кульок, розподіл по розмірних групах) вони мають високі значення питомих витрат енергії (мікрофлюїдизатори, клапанні) [3, 4].

Аналіз останніх досліджень. Результати новітніх досліджень базуються на гіпотезі, що забезпечити підвищення енергоефективності процесу диспергування можливо за рахунок розробки та дослідження конструкцій, принцип дії яких заснований на створенні максимальної різниці між швидкостями знежиреного молока та вершків [5]. Така ідея реалізується в пристроях, які використовують принцип роздільної подачі вершків [5,6]. Згідно до результатів досліджень [7] його впровадження в технологічних процесах молокопереробної галузі дозволяє знизити енергетичні витрати диспергування на 50–60%. Практичне втілення цієї ідеї передбачає попереднє проведення сепарації з отриманням знежиреного молока та вершків. В подальшому необхідно забезпечити проектування конструкцій таким чином, щоб забезпечити максимальну різницю швидкості подачі знежиреного молока та вершків, що виходить з рівняння матеріального балансу. Також це є необхідною умовою підвищення енергоефективності гомогенізації, при якому можливо забезпечити поєднання в одному технологічному циклі гомогенізації та нормалізації [5].

На основі згаданої вище гіпотези гомогенізації авторства К.О. Самойчука на базі кафедри обладнання переробних і харчових виробництв імені професора Ф. Ю. Ялпачика було створено лабораторні установки струминного гомогенізатора молока з роздільною подачею вершків та струминно–щілинного диспергатора молочних продуктів.

Принцип дії струминного гомогенізатора молока з роздільною подачею вершків полягає в тому, що знежирене молоко після сепарації з високою швидкістю подається до камери гомогенізації. В місці її найбільшого звуження розташовані декілька каналів, по яких до швидкісного потоку знежиреного молока подається необхідна для отримання нормалізованої суміші заданої жирності кількість вершків [5].

Принцип дії струминно-щілинного гомогенізатора молока ґрунтується на тому, що попередньо знежирене молоко подається до звуження конфузору, розташованого в камері гомогенізації. Місце найбільш вузької в діаметрі частини конфузору оточує кільцева щілина, крізь яку подається необхідна кількість вершків. Перевагою цієї конструкції по відношенню до струминного гомогенізатора молока з роздільною подачею вершків є можливість забезпечення більш рівномірного впливу потоку знежиреного молока на кільцевий струмінь вершків малої товщини [6]. Крім цього, використання



кільцевої щілини замість каналів подачі вершків дозволяє суттєво знизити швидкість облітерації торцевих поверхонь конфузору та дифузору, що контактують з вершками [8].

Формулювання цілей статті (постановка завдання). Метою даної статті є порівняння енергоефективності струминного гомогенізатора молока з роздільною подачею вершків та струминно-щілинного диспергатора. Для досягнення поставленої мети вирішувались наступні задачі:

- проведення аналізу аналітичних залежностей споживаної потужності гомогенізаторів при однаковій продуктивності пристроїв;
- здійснення аналізу мікрофотографій, отриманих при проведенні експериментальних досліджень параметрів гомогенізаторів.

Основна частина. За конструктивними ознаками конструкції струминного гомогенізатора молока з роздільною подачею вершків та струминно-щілинного диспергатора є близькими. В обох пристроях реалізується принцип роздільної подачі вершків, що забезпечує зниження необхідної потужності приводів та підвищення енергоефективності диспергування відносно клапанних гомогенізаторів та інших конструкцій струминного типу. Але який з розроблених гомогенізаторів є більш енергоефективним? Для відповіді на поставлене запитання проаналізуємо отримані залежності потужності гомогенізаторів, знайдені аналітичним шляхом, адекватність яких було перевірено при проведенні експериментальних досліджень [5].

Аналітична залежність, що пов'язує потужність струминного гомогенізатора молока з роздільною подачею вершків з конструктивними, гідравлічними та технологічними параметрами пристрою, отримана при проведенні досліджень має вигляд (1) [5]

$$P = Q_{zn}^3 \left(\frac{\rho_{zn}}{2\mu_k^2 s^2} + \left(\frac{J_n - J_{zn}}{J_g - J_n} \right)^2 \frac{8\rho_g}{\mu_g^2 N^2 \pi^2 d_g^4} \right), \quad (1)$$

де ρ_{zn} – густина знежиреного молока, кг/м³;

d_b – діаметр каналу подачі вершків, м.

ρ_b – густина вершків, кг/м³;

N – кількість каналів подачі вершків;

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

μ_k , μ_b – коефіцієнти витрат відповідно конфузора та каналу подачі вершків, які враховують гідродинамічні умови на ділянці надходження вершків до потоку знежиреного молока;

s – площа перерізу в місці найбільшого звуження центрального каналу, м²;

Q_{zn} – подача знежиреного молока, м³/с.



Отримана залежність потужності від продуктивності по знежиреному молоку має гіперболічний характер, при цьому потужність насоса подачі вершків P_v (що являє собою праву частину наведеного виразу) в рази перевищує потужність насоса подачі знежиреного молока P_{zn} (яка знаходиться відповідно у лівій частині відношення (1)). Наприклад, при $d_v=0,8$ мм, необхідна потужність для приводу насосів, що забезпечують подачу вершків в 5.5–5.7 разів перевищує потужність насоса подачі знежиреного молока [5,9]. Величина P_v суттєвою мірою залежить від кількості каналів подачі вершків та їх діаметрів. Результати моделювання параметрів струминного гомогенізатора молока з роздільною подачею вершків свідчать, що для забезпечення технологічно обумовлених величин середнього діаметру жирових кульок після диспергування діаметр каналу подачі вершків має дорівнювати 0,6мм [5]. Таким чином при забезпеченні необхідної якості гомогенізованого продукту складова потужності P_v буде продовжувати зростати, одночасно збільшуючи загальну потужність струминного гомогенізатора молока з роздільною подачею вершків.

Аналітична залежність, яка пов'язує потужність струминно-щілинного гомогенізатора молока з конструктивними, гідравлічними та технологічними параметрами пристрою, визначена при проведенні досліджень має вигляд (2) [6,10]

$$P = Q_{zn}^3 \left(\frac{8\rho_{zn}}{2\mu_k^2 \pi^2 d_k^4} + \left(\frac{J_n - J_{zn}}{J_g - J_n} \right)^2 \frac{\rho_g}{2\mu_{щ}^2 h^2 \pi^2 d_k^2} \right), \quad (2)$$

де d_k – діаметр конфузору в місці найбільшого звуження, м.

$\mu_{щ}$ – коефіцієнт витрат кільцевої щілини;

h – ширина кільцевої щілини, м;

Аналіз отриманих результатів свідчить про її гіперболічний характер залежності потужності від продуктивності по знежиреному молоку, при цьому потужність насоса подачі знежиреного молока P_{zn} (що являє ліву складову виразу) має значно більші значення за P_v . Результати досліджень залежності потужності розробленого гомогенізатора при різних значеннях продуктивності по знежиреному молоку свідчать, що при ширині кільцевої щілини $h=0,6$ мм та $Q_{zn}=1000$ кг/год потужність насоса подавання вершків у 8 менше за потужність насоса подачі знежиреного молока.

Розбіжності в результатах пов'язані з тим, що в випадку з струминним гомогенізатором молока з роздільною подачею вершків для створення необхідної для диспергування різниці швидкостей фаз необхідно забезпечити подачу вершків крізь канал або канали малого діаметру, що збільшує цю складову загальних енерговитрат цього



гомогенізатора. Підтвердженням таких висновків є той факт, що при зменшенні діаметру каналу подачі вершків до $d_k=0,2\text{мм}$, загальна потужність струминного гомогенізатора молока з роздільною подачею вершків зростає в 17–18 разів [5]. Однак при однаковій продуктивності $Q_{\text{зн}}=1000$ кг/год потужність струминного гомогенізатора молока з роздільною подачею вершків (1,0 кВт) майже в 1,5 рази перевищує загальну потужність струминно-щілинного гомогенізатора (0,7 кВт), що свідчить про високу енергоефективність конструкції [6,11].

Оцінка енергоефективності неможлива без врахування показників якості диспергування. При проведенні експериментальних досліджень в якості методу оцінки середнього діаметра жирових кульок було обрано метод мікрофотографування. Дисперсний склад жирових кульок після диспергування 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. В якості системи, що забезпечувала калібрування системи візуалізації та забезпечувала відлікову систему для проведення вимірювань середнього діаметра жирових кульок використовувався об'єктив мікрометр минаючого світла ОМ-П з ціною поділки 0,001 мм. Досліди при проведенні випробувань на різних рівнях варіювання змінних факторів процесу виконувалися у трикратній повторності. Відповідність отриманого продукту вимогам якості, вказаних у нормативній документації визначався за середнім діаметром жирових кульок молочної емульсії та шириною полігону, що визначав розподіл дисперсного складу обробленого продукту [12,13].

При проведенні досліджень впливу величини діаметра каналу подачі вершків та ширини кільцевої щілини на якість гомогенізації в обох диспергаторах були зроблені характерні мікрофотографії процесу, наведені на рис. 1.

Аналіз отриманих мікрофотографій (рис.1) свідчить про менші значення середнього діаметра жирових кульок при обробці продукту в струминно-щілинному гомогенізаторі молока. Це пояснюється більшою залученістю сусідніх шарів рідини, що досягається при використанні кільцевої щілини замість каналів для подачі вершків [6,14]. Це призводить до підвищення відносної швидкості $\dot{\gamma}$, як наслідок, до підвищення інтенсивності перебігу процесу гомогенізації. При цьому потік знежиреного молока більш ефективно впливає на центральну та периферійну частину струменю вершків, що забезпечує ефективне зменшення середнього діаметра жирових кульок.

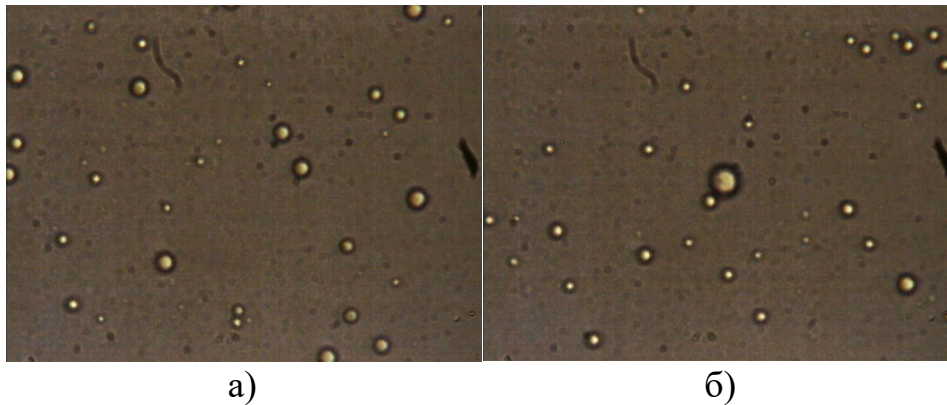


Рисунок 1. Мікрофотографії: *а* – після гомогенізації в струминному гомогенізаторі молока з роздільною подачею вершків (при $d_b=0,8$ мм; $s=6$ мм²; Жв=30 %) ($d_{cp}=0,88$ мкм); *б* – після гомогенізації в струминно-щілинному гомогенізаторі молока (при $h=0,8$ мм; $d_k=3$ мм; Жв=30 %) ($d_{cp}=0,82$ мкм)

Висновки. Проведене порівняння розроблених конструкцій струминних гомогенізаторів молока з роздільною подачею вершків. Отримані результати свідчать, що потужність для приводу насосів подачі вершків в струминному гомогенізаторі молока в 5,5–5.7 разів перевищують потужності приводу насосу подачі знежиреного молока. Це обумовлює збільшення енерговитрат, які при однакових значеннях продуктивності у струминного гомогенізатора молока з роздільною подачею вершків перевищують показники струминно-щілинного гомогенізатора молока майже в 1,5 рази.

Порівняння середнього діаметру жирових кульок при інших рівних параметрах свідчить про більшу ефективність струминно-щілинного гомогенізатора молока. Це пояснюється збільшенням залученості до диспергування більшого об'єму рідини і інтенсифікацією процесу диспергування при заміні каналів подачі вершків на кільцеву щілину.

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. 64, Pp 3389–3406.

2. Нужин Е. В., Гладушняк А. К. Гомогенизация и гомогенизаторы: монография. Одесса: Печатный дом. 2007. 264 с.



3. Innings F.; Trägårdh C. Visualization of the drop deformation and break-up process in a high pressure homogenizer. *Chem. Eng. Technol.* 2005, 28, Pp. 882–891.
4. Huppertz T. Homogenization of Milk Other Types of Homogenizer (High-Speed Mixing, Ultrasonics, Microfluidizers, Membrane Emulsification). *Encyclopedia of Dairy Sciences*, 2nd Edition, 2011. Pp. 761–764.
5. Самойчук К. О. Розвиток наукових основ гідродинамічного диспергування молочних емульсій: автореф. дис ... док. техн. наук: 05.18.12 Харків, 2018. 44 с.
6. Ковальов О. О. Обґрунтування параметрів струминно-щілинного гомогенізатора молока з роздільною подачею вершків : автореф. дис. ... канд. техн. наук : 05.05.11. ТДАТУ. Мелітополь, 2021. 20 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. 200, Pp. 93-114.
8. Dhankhar P. Homogenization fundamentals. *IOSR Journal of Engineering*, 2014. 4(5), Pp. 1–8.
9. Walstra P, Wouters J. T. M., Geurts T. J. Homogenization. In: *Dairy Science and Technology*. Second Edn. Taylor & Francis Group, LLC. Boca Raton London New York. 2006, 279 p.
10. Tartar L. *The General Theory of Homogenization. Lecture Notes. Springer.* 2009. P. 470.
11. Capretto L., Cheng W., Hill M., Zhang X., Micromixing within Microfluidic Devices. *Top Curr Chem*, 2011. 304, Pp.27–68.
12. Vladisavljevic G., Al Nuamani R., Nabavi S. Microfluidic production of multiple emulsions. *Micromachines* 2017, 8, 75 p.
13. Yong A. P.; Islam M. A.; Hasan N. The Effect of pH and High-Pressure Homogenization on Droplet Size. *Sigma J. Eng. Nat. Sci.* 2017, 35, Pp. 1–22.
14. Ward K., Fan Z. H. Mixing in Microfluidic Devices and Enhancement Methods. *J. Micromech. Microeng.* 2015, 25 (9), Pp. 94001–94017.

Стаття надійшла до редакції 21.04.23



К. Samoichuk, A. Kovalyov, A. Chervotkina
Dmytro Motornyi Tavria state agrotechnological university

**COMPARISON OF ENERGY EFFICIENCY OF STREAM MILK
HOMOGENIZERS WITH SEPARATE CREAM SUPPLYK.**

Summary

The results of the latest research indicate that it is possible to increase the energy efficiency of the process of dispersing the fat phase of a milk emulsion due to the implementation of the principle of separate feeding of cream. This principle was implemented taking into account the hypothesis of the dominant role in the process of the destruction of fat globules of the difference between the speeds of skimmed milk and cream in the two designs.

The article compares the energy efficiency of a jet milk homogenizer and a jet-slot homogenizer, both of which implement the principle of separate cream feeding. The obtained results indicate high values of the power of the cream supply pump, which exceed the corresponding indicators of the skim milk supply pump by 5.5–5.7 times. As a result of the analysis, it was determined that with the same performance indicators at the level of 1000 l/h, the power of the jet-slit milk homogenizer is almost 1.5 times less than the corresponding indicator in the jet milk homogenizer with separate cream supply. The analysis of photomicrographs of the process shows a more effective reduction of the average diameter of fat balls during processing in a jet-slit homogenizer (0.82 μm) compared to a jet homogenizer with a separate supply of cream (0.88 μm). This fact is explained by the greater involvement of the adjacent liquid layers in the dispersion process, which leads to the intensification of the process and is associated with the use of an annular gap in the jet-slit homogenizer instead of cream supply channels.

To increase the efficiency of dispersion in a jet milk homogenizer with separate cream supply, it is necessary to reduce the diameter of the cream supply channels, which will naturally lead to an increase in the required power of the drives.

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