

УДК 637.134

ВПЛИВ ШЛЯХУ ЗМІШУВАННЯ НА ПРОЦЕС ДИСПЕРГУВАННЯ В СТРУМИННОМУ ГОМОГЕНІЗАТОРІ МОЛОКА

INFLUENCE OF THE MIXING PATH ON THE DISPERSION PROCESS IN A JET MILK HOMOGENIZER

О. О. Ковальов, канд. техн. наук, **К. О. Самойчук**, д-р техн. наук,
Н. О. Паляничка, канд. техн. наук, **І. С. Панов**

Таврійський державний агротехнологічний університет імені Дмитра Моторного

Анотація. Дослідження присвячено аналізу процесу гомогенізації молока в струминному гомогенізаторі з роздільною подачею жирової фази. Основною метою роботи було визначення ключових механізмів подрібнення жирових кульок та розробка теоретичних передумов для створення математичної моделі процесу. В якості об'єкта дослідження розглядається лабораторний зразок струминного гомогенізатора, потік у якому моделюється як затоплений турбулентний струмінь. Ключовим результатом аналітичних розрахунків є визначення впливу геометрії робочої зони – діаметра конфузора в місці найбільшого звуження (d_k). Встановлено, що його зменшення до 2 мм призводить до підвищення дотичних напружень до $1,1 \cdot 10^{-4}$ Па, що є оптимальним для інтенсифікації процесу. Проте, розрахована товщина граничного шару, в якому створюються максимальні градієнти швидкості, виявилася надзвичайно малою – від $1,2 \cdot 10^{-3}$ мм до $5,3 \cdot 10^{-2}$ мм. Це дозволяє зробити висновок про другорядну роль механізму руйнування безпосередньо біля твердої поверхні.

Наукова новизна роботи полягає у кількісному обґрунтуванні домінуючого механізму диспергування – подрібнення за рахунок різниці швидкостей фаз. Розрахована величина шляху змішування ($l_{зм} = 0,78-1,56$ мм для $d_k = 2-4$ мм) та аналіз динаміки процесу дозволили встановити, що саме досягнення критичного значення критерію Вебера за рахунок високої швидкості знежиреного молока ($>24,5$ м/с) є визначальним фактором. Інші досліджені механізми (осциляція, руйнування турбулентними пульсаціями) визнані другорядними через відсутність умов для резонансу або незначний обсяг зони їхньої дії. Отримані результати є основою для подальшого моделювання та проектування енергоефективних струминних гомогенізаторів.

Ключові слова: гомогенізація молока, струминний гомогенізатор, жирова кулька, граничний шар, шлях змішування, дотичні напруження, критерій Вебера, диспергування.

Вступ

Незважаючи на значну увагу, що приділяється зниженню енергоємності процесу гомогенізації, ця проблема залишається актуальною. У зв'язку з цим перспективним є дослідження струминного гомогенізатора. У такому апараті за рахунок створення максимальної різниці швидкостей між жировими кульками та дисперсійним середовищем можна досягти високої ефективності гомогенізації, а також поєднати в одній установці операції гомогенізації та нормалізації при умові дозованої подачі вершків [1, 2].

Аналіз сучасних досліджень та публікацій показує, що питання формулювання єдиної теорії подрібнення жирових кульок у процесі гомогенізації досі залишається невирішеним. Існує низка конкуруючих гіпотез, серед яких [1, 3]:

- руйнування під дією поздовжнього градієнта швидкості при вході потоку в клапанну щілину;
- руйнування внаслідок поперечного градієнта швидкості у клапанній щілині;
- руйнування під впливом відцентрових сил при обертанні жирової кульки в градієнтному полі швидкостей;

- руйнування в результаті здування мікрочастинок з поверхні кульки;
- гіпотеза субквітаційної гомогенізації.

Аналіз останніх досліджень

Однією з ключових труднощів у дослідженні гомогенізації є відсутність єдиної теорії, обумовлена високими швидкостями процесу (сотні м/с) та малими розмірами часток (1–3 мкм). На основі теоретичних розрахунків було обґрунтовано гіпотезу, що подрібнення жирових кульок вершків у потоці знежиреного молока відбувається за рахунок створення максимальної різниці швидкостей між фазами [4–6]. Відповідно до цієї гіпотези було розроблено лабораторний зразок струминного гомогенізатора молока, схема якого подана на рис. 1

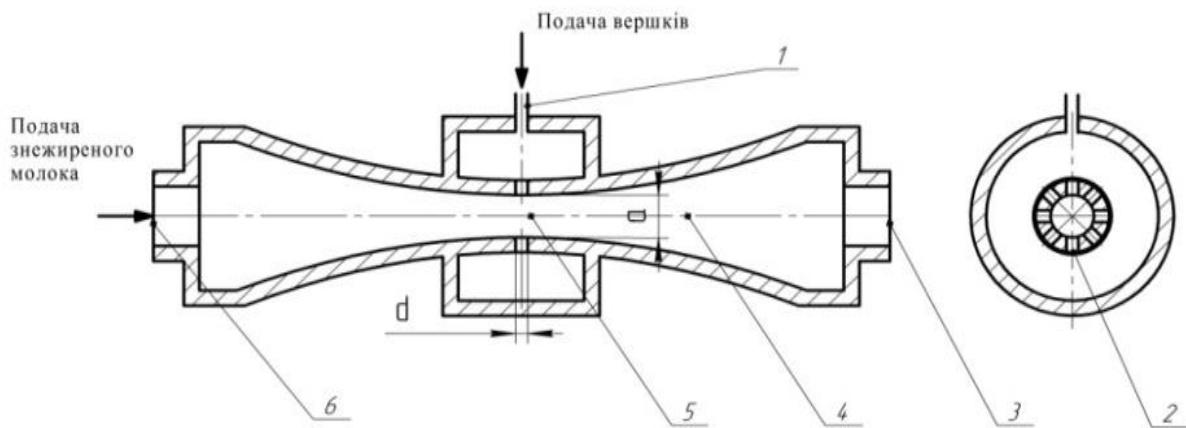


Рисунок 1 – Схема струминного гомогенізатора молока:

1 – патрубок подачі вершків; 2 – канал подавання жирової фази; 3 – патрубок відведення гомогенізованого молока; 4 – центральний канал; 5 – зона диспергування жирової фази; 6 – патрубок подачі знежиреного молока

Принцип роботи гомогенізатора полягає в наступному [6–8]. Молоко попередньо сепарується на знежирене молоко та вершки. Потік знежиреного молока подається під тиском через патрубок 6 до зони максимального звуження 5 центрального каналу 4, де досягає найвищої швидкості. Жирова фаза (вершки) подається через канали 2 діаметром d .

Основний матеріал дослідження

Метою роботи є розробка математичної моделі процесу гомогенізації молока в струменевому гомогенізаторі з роздільною подачею жирової фази, що потребує визначення механізмів подрібнення та рушійних сил цього процесу. Для досягнення поставленої мети вирішувались наступні задачі:

– аналітично дослідити залежність величини дотичних напружень та ефективності подрібнення від діаметра конфузора в зоні найбільшого звуження (d_k), зокрема для значень 2 мм та 4 мм, і встановити оптимальні геометричні параметри для досягнення максимального зменшення розміру жирових кульок;

– порівняти внесок різних механізмів подрібнення (руйнування в граничному шарі, за рахунок різниці швидкостей фаз, турбулентних пульсацій та осциляції) у загальну ефективність гомогенізації. Кількісно оцінити частку кульок, що руйнуються в граничному шарі за розрахованої його товщини ($1,2 \cdot 10^{-3} - 5,3 \cdot 10^{-2}$ мм), та обґрунтувати ключову роль критерію Вебера;

– створити модель, що зв'язує час руйнування жирової кульки зі швидкістю потоку знежиреного молока (24,5 м/с) та довжиною шляху змішування ($l_{зм}=0,78-1,56$ мм). Модель

повинна дозволяти прогнозувати ефективність гомогенізації за відсутності прямого зіткнення часток.

Подальший аналіз ґрунтується на розгляді потоку в гомогенізаторі як затопленого турбулентного струменя. У такому струмені турбулентність розвивається таким чином: ламінарна ядрова частина звужується та зникає на відстані приблизно шести діаметрів від вихідного отвору, тоді як турбулентна частина розширюється за рахунок вихрових рухів [2, 9]. Біля стінок, де рух рідини обмежений, зберігається ламінарний режим з низькими усередненими швидкостями. Товщина цього шару зменшується зі зростанням числа Рейнольдса. Турбулентні пульсації збуджують рух часток, що підтримується інерцією рідини та гальмується силами в'язкості [10].

Для турбулентного потоку характерне формування нерухокої пристінної плівки, яка гальмує суміжні шари рідини. Цей вплив поширюється вглиб потоку, утворюючи шар з ламінарним рухом, де швидкість зростає від нуля біля стінки до значень, характерних для турбулентного ядра потоку [11].

Граничний шар у зоні звуження конфузора є областю з високим поздовжнім градієнтом швидкості, що створює умови для ефективного руйнування жирових кульок. Для оцінки його впливу необхідно визначити товщину шару, яка залежить від шляху змішування та дотичних напружень, що виникають при русі жирових кульок у потоці.

Біля стінки камери спостерігається ковзання рідини, причому дотичні напруження зростають у напрямку осі у межах граничного шару, а поза ним їхній вплив незначний. Товщина граничного шару збільшується за рахунок включення часток, уповільнених силами в'язкості та тертям між об'ємами рідини та дисперсною фазою [1,8]. Оцінка товщини граничного шару є складною задачею; за повної турбулентності він може займати всю площу перерізу камери [3, 12].

$$l_{zm} = k \cdot d_k \quad (1)$$

де k – універсальний коефіцієнт пропорційності, що не залежить від числа Рейнольдса $k \approx 0,39$; d_k – діаметр камери гомогенізатора в місці найбільшого звуження конфузору, при $d_k = 2..4$ мм, l_{zm} дорівнює відповідно 0,78...1,56 мм.

Зазначена залежність пояснюється тим, що амплітуда пульсацій зростає із збільшенням швидкості, при цьому довжина шляху змішування є пропорційною до діаметра камери конфузора в області його максимального звуження d_k [1, 3].

У вдосконаленій теорії Прандтля, яка базується на аналізі не молекулярної структури, а характеристик турбулентного руху, встановлено, що характерний масштаб пульсаційної швидкості дорівнює добутку градієнта усередненої швидкості та характерного масштабу довжини l_{zm} , який отримав назву шляху змішування. Градієнт швидкості у напрямку, перпендикулярному до внутрішніх стінок конфузора, досягає значних величин, тоді як поза межами граничного шару значення дотичних напружень є низькими [2, 13]. Величину дотичних напружень можна визначити за формулою [1]:

$$\tau \sim \mu_{nl} \cdot v_{nl} \cdot \sqrt{\frac{2\rho_{nl} \cdot u_c}{\pi \cdot \mu_{nl} \cdot d_k}} \quad (2)$$

де ρ_{nl} – густина плазми молока, кг/м³; τ – дотичні напруження, Н; μ_{nl} – динамічна в'язкість молочної плазми, г/(см·с); v_{nl} – кінематична в'язкість молочної плазми, см²/с; u_c – середня швидкість руху потоку знежиреного молока, м/с.

Коефіцієнт динамічної в'язкості μ_{nl} при температурі 60°C становить приблизно $7 \cdot 10^{-4}$ Па·с. Відповідно до [6] та [7] середня швидкість рідини дорівнює 24,5 м/с (реально її значення буде більшим з врахуванням форми камери гомогенізації), при цьому дотичні напруження при діаметрі конфузора 4 мм складають $7,9 \cdot 10^{-5}$ Па; при діаметрі 2 мм відповідно $1,1 \cdot 10^{-4}$ Па.

У граничному шарі градієнт швидкості $\partial u/\partial y$ в напрямку, перпендикулярному до стінки, є надзвичайно високим. Навіть незначна за величиною в'язкість $\mu_{пл}$ чинить істотний вплив на характер течії, оскільки дотичні напруження, зумовлені тертям, можуть досягати високих значень [5, 14]. Товщина граничного шару є пропорційною до квадратного кореня з кінематичної в'язкості:

$$\delta = \sqrt{\nu} = \sqrt{1,5 \cdot 10^{-6}}. \quad (3)$$

Граничний шар є областю руху рідини, в якій величини сили тертя та сили інерції мають однаковий порядок, що дає можливість оцінити його товщину [15]:

$$\delta \sim \sqrt{\frac{\pi \cdot \mu_{пл} \cdot d_k}{2 \rho_{пл} \cdot \nu}}. \quad (4)$$

Згідно результатів розрахунків за формулами (3) та (4) товщина граничного шару становить $1,2 \cdot 10^{-3}$ та $3,8 \cdot 10^{-2} \dots 5,3 \cdot 10^{-2}$ мм відповідно. Розбіжність між отриманими величинами пояснюється наближеністю оцінки коефіцієнта динамічної в'язкості молочної плазми та значення шляху змішування [16].

На підставі отриманих результатів можна зробити висновок, що діаметр конфузора у місці найбільшого звуження робочої камери гомогенізатора має набувати мінімально можливих значень, оскільки це призводить до зростання дотичних напружень, які сповільнюють рух вершків. За умов високої швидкості знежиреного молока дотримання цієї вимоги створює необхідні умови для ефективного диспергування в зоні граничного шару. Однак, беручи до уваги незначну товщину граничного шару, в ньому подрібнюється лише мала частка жирових кульок, що робить недоцільним розгляд цього фактора як основного механізму подрібнення.

У [5, 17] наведено результати аналітичних досліджень дотичних напружень, значення яких, на відміну від нормальних напружень, є визначальним для процесу руйнування жирової кульки. Отримані результати свідчать, що для забезпечення 1,4-кратного збільшення величини дотичних напружень діаметр конфузора в місці подачі вершків має становити 2 мм або менше.

Визначено довжину шляху змішування як відстані, яку жирова кулька повинна подолати після введення в потік знежиреного молока до моменту повного вирівнювання її швидкості зі швидкістю потоку дисперсійної фази. У діапазоні діаметрів конфузора $d_k = 2 \dots 4$ мм, $l_{зм}$ дорівнює відповідно 0,78...1,56 мм, що дає змогу на підставі швидкості подачі знежиреного молока розрахувати час руйнування жирової кульки в потоці та перевірити наявність у струминному гомогенізаторі такого механізму руйнування, як подрібнення за відсутності прямого зіткнення.

Розраховано товщину граничного шару, величина якого за різними оцінками для досліджуваного апарату змінюється в межах від $1,2 \cdot 10^{-3}$ мм до $3,8 \cdot 10^{-2} \dots 5,3 \cdot 10^{-2}$ мм. Настільки незначна товщина області, в якій створюється високий градієнт швидкості та необхідні умови для руйнування жирових кульок, дозволяє стверджувати, що цей механізм зменшення розміру жирових кульок не може бути визнаний основним через малу кількість кульок, що зазнають руйнування в цій зоні.

Оскільки з урахуванням товщини граничного шару руйнування жирових кульок поблизу твердої поверхні, незважаючи на високі значення градієнта швидкості, є проблематичним основним механізмом, основним чинником залишається створення значної різниці швидкостей між знежиреним молоком та вершками. Наведені у [6, 7] результати аналітичних досліджень дозволили використати формулу, запропоновану Хінце, яка пов'язує величину дотичних напружень із критичним значенням критерію Вебера. Саме цей критерій є основним параметром, що дозволяє судити про перебіг або відсутність процесу диспергування жирових кульок у струминному гомогенізаторі.

Дослідження вторинних механізмів руйнування жирових кульок, таких як осциляція (подрібнення, можливе при збігу власної та вимушеної частот коливань кульки, що призводить до резонансу та розпаду первинної краплі на дрібніші), дозволили констатувати наявність явища осциляції у досліджуваному диспергаторі [6, 7]. Однак, оскільки не виконується необхідна для подрібнення за цим механізмом умова (резонанс), його вплив на загальний процес руйнування жирових кульок є несуттєвим [6, 18].

Дослідження впливу інших факторів та механізмів, що діють на руйнування жирових кульок молока, дозволило встановити, що подрібнення під дією турбулентних пульсацій відбуватиметься в струминному гомогенізаторі, оскільки процес диспергування в зоні пристінних шарів відповідає необхідним вимогам. Проте, враховуючи той факт, що в пристінному шарі руйнується незначний відсоток від загальної кількості жирових кульок, цей механізм слід віднести до другорядних факторів, що обумовлюють руйнування жирових кульок у струминному гомогенізаторі молока.

Аналіз можливості руйнування жирових кульок у струминному гомогенізаторі під дією динамічних навантажень у залежності від часу перебування часток дисперсної фази та періоду їх власних коливань у зоні взаємодії з потоком знежиреного молока свідчить, що зменшення розмірів жирових кульок у цьому випадку має квазістатичний характер та значною мірою залежить від величини критерію Вебера [7, 10].

Руйнування жирових кульок у струминному гомогенізаторі відбувається в два етапи: на першому етапі відбувається руйнування за рахунок мікропульсацій рідини, дії осциляції та безіткненого розпаду крапель; на другому етапі основним фактором стає різниця швидкостей між потоком знежиреного молока та струменем дисперсної фази. Зниження поверхневого натягу (шляхом підвищення температури або введення емульгаторів) призводить до зміни параметрів струменя вершків, створюючи сприятливіші передумови для руйнування жирових кульок у ньому.

Висновки

На основі аналітичних розрахунків встановлено, що ключовим параметром для створення ефективних умов диспергування є діаметр конфузора в зоні найбільшого звуження. Його оптимальне значення становить 2 мм або менше, що забезпечує зростання дотичних напружень до $1,1 \cdot 10^{-4}$ Па та сприяє руйнуванню жирових кульок. Це підтверджує, що саме геометрія робочої зони безпосередньо впливає на інтенсивність гомогенізації.

Розраховані характеристики потоку свідчать, що шлях змішування ($l_{зм}$) для діапазону діаметрів 2–4 мм становить 0,78–1,56 мм. Проте товщина граничного шару, де градієнт швидкості максимальний, є дуже малою – лише від $1,2 \cdot 10^{-3}$ мм до $5,3 \cdot 10^{-2}$ мм. Через мізерний об'єм цієї зони, руйнування жирових кульок у граничному шарі не може розглядатися як основний механізм подрібнення.

Основним фактором руйнування жирових кульок у струминному гомогенізаторі є створення високої різниці швидкостей між фазами – знежиреним молоком (24,5 м/с та більше) та вершками. Дослідження підтвердило, що саме критичне значення критерію Вебера, яке досягається за рахунок цієї різниці швидкостей, є вирішальною умовою ефективного диспергування, тоді як інші механізми (осциляція, турбулентні пульсації) відіграють другорядну роль.

Література

1. Liao, Y. X., Lucas, D. A literature review of theoretical models for drop and bubble breakup in turbulent dispersions. *Chemical Engineering Science*, 2009. 64. 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-щілинного гомогенізатора молока з роздільною подачею вершків : автореф. дис. ... канд. техн. наук : 05.05.11. ТДАТУ. 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 (Second Edition)*, 2011. 761–764, <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-374407-4.00226-0>
5. Innings, F., Trägårdh, C. Visualization of the drop deformation and break-up process in a high pressure homogenizer. *Chemical Engineering & Technology*, 2005. 28. 882–891, <https://doi.org/10.1002/ceat.200500080>
6. Самойчук К.О., Ковальов О.О. Механізми диспергування жирових кульок в струминному гомогенізаторі молока. *Наукові праці ОНАХТ*, 2016. Т. 80. Вип. 1. С. 103–107.
7. Самойчук К.О., Ковальов О.О. Механізм руйнування жирових кульок у струминному гомогенізаторі з роздільним подаванням вершків. *ДонНУЕТ*. 2013. Вип. 30. С. 148–155.
8. Vitenko, T., Marynenko, N., Kramar, I. European Experience in Waste Management. *Environmental Sciences Proceedings*, 2021. 9. 17. <https://doi.org/10.3390/environsciproc2021009017>
8. Самойчук К. О., Бойко В. С., Олексієнко В. О. та ін. Основи розрахунку та конструювання обладнання переробних і харчових виробництв: підручник. Мелітополь: Вид. «ММД», 2020. 428 с.
9. Samoichuk, K., Kovalyov, A., Fuchadzy, N., Hutsol, T., Jurczyk, M., Pajak, T., Banaś, M., Bezalychna, O., Shevtsova, A. Energy Costs Reduction for Dispersion Using a Jet-Slot Type Milk Homogenizer. *Energies* 2023. 16 (5). 2211, <https://doi.org/10.3390/en16052211>
10. Kovalyov, A., Samoichuk, K., Palyanychka, N., Verkholantseva, 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). 33–38, <https://doi.org/10.15587/2312-8372.2017.103240>
11. Jiang, B., Shi, Y., Lin, G., Kong, D., Du, J. Nanoemulsion prepared by homogenizer: The CFD model research. *Journal of Food Engineering*, 2019. 241. 105–115, <https://doi.org/10.1016/j.jfoodeng.2018.08.014>
12. Morales, J., Watts, A., McConville, J. Mechanical particle-size reduction techniques. *Formulating Poorly Water Soluble Drugs*, Springer, Cham. 2016. 22. 165–213, https://doi.org/10.1007/978-3-319-42609-9_4
13. Postelmans, A., Aernouts, B., Jordens, J., Van Gerven, T., Saeys, W. Milk homogenization monitoring: Fat globule size estimation from scattering spectra of milk. *Innovative Food Science & Emerging Technologies*, 2020. 60. 102311, <https://doi.org/10.1016/j.ifset.2020.102311>
14. Yang, B., Zhu, Z., Gao, M., Yan, X., Zhu, X., Guo, W. A portable detector on main compositions of raw and homogenized milk. *Computers and Electronics in Agriculture*, 2020. 177. 105668, <https://doi.org/10.1016/j.compag.2020.105668>
15. Tartar, L. The General Theory of Homogenization. Lecture Notes. Springer, 2009. 470. <https://doi.org/10.1007/978-3-642-05195-1>
16. Ward K., Fan Z. H. Mixing in microfluidic devices and enhancement methods. *Journal of Micromechanics and Microengineering*, 2015. 25 (9), <https://doi.org/10.1088/0960-1317/25/9/094001>
17. 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.

UDC 637.134

Influence of the Mixing Path on the Dispersion Process in a Jet Milk Homogenizer

A. Kovalyov, K. Samoichuk, N. Palianychka, I. Panov
Dmytro Motornyi Tavria State Agrotechnological University

Summary

This study investigates the milk homogenization process in a jet homogenizer with separate injection of the fat phase. The primary objective was to identify the dominant mechanisms governing fat globule breakup and to establish theoretical foundations for the development of a mathematical model of the process. A critical review of existing homogenization mechanisms—including disruption caused by longitudinal and transverse velocity gradients, centrifugal effects, bubble-induced breakup, and related phenomena—is presented. An alternative approach is proposed, based on maximizing the relative velocity between the dispersed phase (cream) and the continuous phase (skim milk), which is considered the key factor for effective dispersion in jet-based systems.

The experimental object is a laboratory-scale jet homogenizer, where the flow is modeled as a submerged turbulent jet, a configuration commonly used in food process engineering analyses. The analytical study focuses on the influence of the working zone geometry, particularly the diameter of the converging section at the point of maximum constriction (d_k). It was found that reducing d_k to 2 mm increases the shear stress up to $1.1 \cdot 10^{-4}$ Pa, which is favorable for homogenization intensification. At the same time, the calculated thickness of the hydrodynamic boundary layer, where the highest velocity gradients occur, was extremely small ($1.2 \cdot 10^{-3}$ – $5.3 \cdot 10^{-2}$ mm), indicating a limited contribution of wall-induced breakup mechanisms.

The scientific novelty of this work lies in the quantitative justification of the dominant dispersion mechanism—fat globule breakup driven by interphase velocity differences. The calculated mixing path length ($l_{mix}=0.78$ – 1.56 mm for $d_k=2$ – 4 mm), together with the dynamic analysis of the flow, demonstrates that achieving the critical Weber number due to the high velocity of the continuous phase (~ 24.5 m/s) is the governing factor of the homogenization process. Other mechanisms, such as oscillatory deformation and breakup caused by turbulent fluctuations, were found to be secondary due to the lack of resonance conditions or the limited spatial extent of their effective regions. The results obtained form a basis for further modeling and design of energy-efficient jet homogenizers for dairy applications.

Keywords: milk homogenization, jet homogenizer, dairy processing, fat globule breakup, boundary layer, mixing length, shear stress, Weber number, dispersion.