

**МОДЕЛЮВАННЯ КОМБІНОВАНИХ ПРОЦЕСІВ ПЕРЕНОСУ.
ОПТИМІЗАЦІЯ ОБЛАДНАННЯ ТА СИСТЕМ**

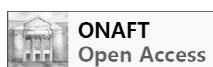
УДК 637.134

**МЕХАНІЗМИ ДИСПЕРГУВАННЯ ЖИРОВИХ КУЛЬОК В
СТРУМИННОМУ ГОМОГЕНІЗАТОРІ МОЛОКА
THE MECHANISMS OF FAT GLOBULES IN JET-MIXING
HOMOGENIZER OF MILK**

**Самойчук К. О., канд. техн. наук, доцент, Ковальов О.О., асистент
Таврійський державний агротехнологічний університет, м. Мелітополь
Samoichuk K. O., Kovalyov A. A.
Tavria state agrotechnological university, Melitopol Ukraine**

Copyright © 2016 by author and the journal "Scientific Works".

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>

В роботі набула подальшого розвитку теорія диспергування жирової фази молока в струминному гомогенізаторі з роздільною подачею вершків. Актуальність досліджень обумовлена необхідністю підвищення ефективності процесу сучасних пристроїв для гомогенізації з метою зниження енерговитрат, для чого необхідно розробити єдину теорію гомогенізації молока у струминних апаратах. Метою статті є аналіз механізмів подрібнення в струминному гомогенізаторі молока з роздільним подаванням жирової фази з визначенням істотності впливу на ступінь диспергування жирових кульок. Проведені аналітичні дослідження базуються на відомих рівняннях руху твердих тіл, гідродинаміки та коливальних процесів. Розглянуто вплив на диспергування різниці швидкостей фаз, осциляції, подрібнення без зіткнення потоку та струменю і механізму Колмогорова – Обухова. На процес подрібнення також впливатимуть, пульсації вихорів дрібного масштабу спричиняють на кульки в зоні між стінкою у місці найбільшого звуження центрального каналу камери гомогенізатора та віссю потоку. З'ясовано, що в умовах лабораторної установки руйнування за механізмом Колмогорова-Обухова не матиме суттєвого впливу на процес диспергування, оскільки при ньому зменшення розмірів жирових кульок відбувається в пристінних шарах, що займають невелику частку площі камери гомогенізатору. При аналізі дії сил осциляції з'ясовано, що в струминному гомогенізаторі молока крапля під дією змінних напорів дисперсійного середовища не зазнає явища резонансу. Проведені теоретичні дослідження за механізмом подрібнення без зіткнення краплі з потоком, показали, що в залежності від числа Вебера в струминному гомогенізаторі молока з роздільним подаванням жирової фази буде відбуватись квазістатичне руйнування крапель жирової фази. Отримані дані необхідні для розвитку теоретичних основ диспергування в струминному гомогенізаторі та є базисом для створення вичерпної математичної моделі процесу.

In current paper a further development of the theory of the dispersion of the fat phase of jet-milk homogenizer with separate giving of cream. The relevance of research is caused by necessity of increase of efficiency of process of modern devices for homogenization to reduce energy consumption, which is necessary to develop a unified theory of milk homogenization in the jet apparatus. The purpose of this article is to analyze the mechanisms of the destruction process in jet homogenizer milk with the separate submission of a fatty phase with the definition of materiality of influence on the degree of dispersion of fat globules. Conducted analytical studies are based on the known equations of motion of rigid bodies, hydrodynamics and oscillatory processes. The influence on the dispersion of the velocity difference of the phases of the oscillation, the destruction without any contact of the flow and jet and mechanism of Kolmogorov – Obukhov. The destruction process also affect the pulsation of the small scale vortices cause the beads in the area between the wall in the place of the greatest narrowing of the Central canal of the homogenization camera and the axis of the stream. It is found that in conditions of laboratory installation damage mechanism Kolmogorov-Obukhov will have a significant impact on the process of dispersion; as it reducing the size of fat globules occurs in the wall boundary layers occupy a small proportion of the area of the homogenizer camera. In the analysis of the forces oscillations clarified that the jet homogenization milk droplet under the action of the variable pressure of the dispersion medium does not undergo the phenomenon of resonance. Conducted theoretical research on mechanism of destruction without colliding drops with the flow, showed that depending on the Weber number of the jet homogenization of milk with the separate giving of a fatty phase will occur quasi-static fracture of droplets of fatty phase. The obtained data are needed for the development of the theoretical foundations of dispersion in the jet homogenization and is the basis for the creation of a comprehensive mathematical model of the process.

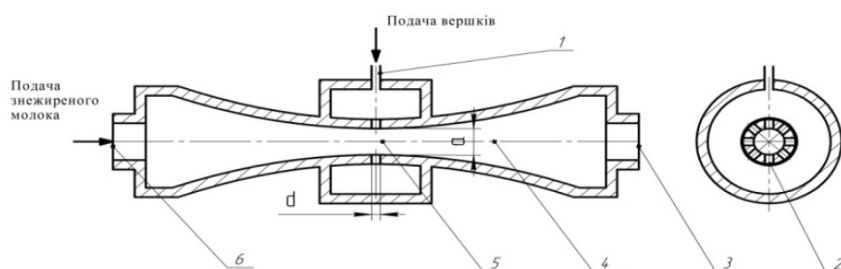
МОДЕЛЮВАННЯ КОМБІНОВАНИХ ПРОЦЕСІВ ПЕРЕНОСУ. ОПТИМІЗАЦІЯ ОБЛАДНАННЯ ТА СИСТЕМ

Ключові слова: жирова кулька, сили, дисперсна фаза, механізм, руйнування, струменева гомогенізація, теорія.

Keywords: fat globule, forces, the dispersed phase, mechanism, destruction, jet homogenization, theory.

Формулювання проблеми в загальному вигляді. Однією з проблем дослідження процесу гомогенізації є відсутність єдиної теорії процесу, зважаючи на швидкості процесу порядку сотень метрів на секунду та розмірів досліджуваних часток 1 – 3 мкм. В результаті теоретичних досліджень процесу була обґрунтована гіпотеза подрібнення жирових кульок вершків в потоці плазми знежиреного молока за рахунок створення максимальної різниці швидкостей фаз. На базі гіпотези був створений лабораторний зразок струминного гомогенізатору молока, схема якого надана на (рис.1).

Струминний гомогенізатор молока з роздільною подачею вершків працює таким чином [1]. До подачі в пристрій молоко сепарується на знежирене молоко та вершки. Потік знежиреного молока через патрубок подачі 6 під тиском подається до місця найбільшого звуження 5 центрального каналу 4, де набуває максимальної швидкості. До потоку, крізь канали подачі жирової фази 2 діаметром d , подаються вершки через патрубок 1. Молоко з подрібненими жировими частками відводиться крізь патрубок 3.



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

Рис. 1 – Схема струминного гомогенізатора молока

Мета досліджень. Основну роль при диспергуванні відіграє різниця швидкостей дисперсійної та дисперсної фаз продукту. Однак, подрібнення жирових кульок відбувається при взаємодії декількох одночасно протікаючих процесів. По перше, жирові кульки надходячи до швидкісного потоку знежиреного молока зі швидкістю значно меншою за швидкість потоку молока починають деформуватись за рахунок дії тангенційних напружень, значення яких збільшується за мірою наближення часток до вісі потоку [2]. Під дією сил деформації частки спочатку приймають форму деформованого шару, потім форму тору, після чого розпадаються на множину дрібних краплин. По друге, мікропульсації рідини будуть створювати умови для зменшення розміру часток за рахунок динамічних навантажень потоку. По третє, можливе створення умов резонансу що є умовою для подрібнення від сил осциляції. В четвертих, згідно умов лабораторної установки вершки подаються поперек потоку, отже, виконується умова для можливого подрібнення крапель за відсутності зіткнення потоку молока та струменю вершків. Отже, метою статті є аналіз механізмів подрібнення в струминному гомогенізаторі молока з роздільним подаванням жирової фази з визначенням істотності впливу на ступінь диспергування жирових кульок.

Виклад основного матеріалу дослідження. Рівняння руху жирової частки (1) для струминного гомогенізатора має вигляд [2].

$$m \frac{dv}{dt} = \overline{F}_o + \overline{F}_n + \overline{F}_i + \overline{F}_m. \quad (1)$$

В наведеному рівнянні $\overline{F}_o$ сил опору, $\overline{F}_n$ – дію сил приєднаної маси, $\overline{F}_i$ – сил інерції, $\overline{F}_m$ – дію сил турбулентного фрезю.

При турбулентному режимі додаткові до основного збудження руху часток, що виникають при цьому підтримують проявлення інерції рідини та нівелюються силами в'язкості. При підвищенні тиску диспергування теоретично обґрунтованих та необхідних для подрібнення часток від 3 до 9 МПа відбувається збільшення швидкості основного руху рідини, що призводить до розвитку збудженого руху часток [3]. Турбулентну течію можна розкласти на власний осереднений рух та пульсаційні утворення, накладенні на осереднений рух та отримати наступний вираз для швидкості та тиску

$$u = \overline{u}_i + u_i', v = \overline{v}_i + v_i', \omega = \overline{\omega}_i + \omega_i', p = \overline{p}_i + p_i', \quad (2)$$

де $\overline{u}_i, \overline{v}_i, \overline{\omega}_i, \overline{p}_i$ – та компоненти осередненої швидкості в напрямку вісей x, y, z та тиску.

МОДЕЛЮВАННЯ КОМБІНОВАНИХ ПРОЦЕСІВ ПЕРЕНОСУ. ОПТИМІЗАЦІЯ ОБЛАДНАННЯ ТА СИСТЕМ

$u'_i, v'_i, \omega'_i, p'_i$ – і – та компонента пульсаційної швидкості в напрямку вісей x, y, z та тиску.

Потік вище межі граничного шару має постійну осереднену швидкість u , вихори рухаються в межах шару за хаотичних коливань місцевих швидкостей порядку частини u . Найбільший розмір вихору l приблизно дорівнює товщині граничного шару який обчислюється за формулою (3) [4].

$$\delta \approx \sqrt{\frac{\mu_{nl} \cdot l_z}{\rho_{nl} \cdot v}}, \quad (3)$$

де v – кінематична в'язкість молока, Па·с; ρ_{nl} – густина плазми, кг/м³, μ_{nl} – динамічна в'язкість молока, П; l_z – шлях змішування, м.

$$l_z = ka, \quad (4)$$

де k – універсальний коефіцієнт пропорційності, що не залежить від числа Рейнольдса $k \approx 0,39$;

a – діаметр (ширина) потоку в місці найбільшого звуження, згідно результатів проведеного моделювання його раціональне значення складає 1мм (рис.1).

Згідно формул (3) та (4) $\delta = 6,2 \cdot 10^{-4}$, $l_z = 3,9 \cdot 10^{-4}$ м.

Досліди Г.Райнхардта показали, що поперечні пульсації змінюються за шириною каналу порівняно мало та складають біля 4% від середньої швидкості потоку u , що складає 1,65м/с, повздовжні пульсації мають в безпосередній близькості від стінок різко виражений максимум, що дорівнює 0,13 u , тобто 5,4м/с [5]. Середня швидкість молока визначається за формулою [6]

$$u = \sqrt{\frac{17,8 \cdot \sigma}{d_k \cdot \rho_{nl}}}, \quad (5)$$

де σ – поверхневий натяг на границі жир-плазма, Н/м;

d_k – діаметр жирової кульки до початку подрібнення $d_k = 3 \cdot 10^{-6}$ м;

Досліджуючи рух крапель в турбулентному потоці Колмогоров висунув припущення, що диспергування відбувається внаслідок деформації крапель під дією динамічних напорів дисперсійного середовища, які перевищують сили між фазного натягу.

$$\frac{C \cdot \rho_{nl} \cdot \Delta u_y^2}{2} \geq \frac{4\sigma}{d_k}, \quad (6)$$

де C – коефіцієнт пропорційності, наближений до одиниці;

Δu_y – різниця швидкостей суцільної середи, що діють на відстані y , м/с;

За великих значень числа Рейнольдса на потік діють турбулентні пульсації першого порядку i_1 , які здійснюють переміщення та перемішування об'ємів рідини з середньою швидкістю потоку $u = 41$ м/с. Сутність теорії Колмогорова – Обухова в наступному, оскільки пульсації першого порядку є нестійкими на них накладаються пульсації другого та менших порядків з меншим масштабом, що буде відбуватись до моменту коли в'язкість рідини буде попереджати утворення пульсацій i_1+1 порядку.

За абсолютною величиною Δu_y можна порівняти з пульсаційною складовою швидкості u' , що дуже часто коливається від діапазону значень середньої швидкості в межах $\pm 30\%$. Пульсаційні швидкості змінюються вздовж та поперек потоку та можуть набувати позитивних та від'ємних значень. Відхилення від середньої швидкості за різних значень тиску дорівнює від приблизно 13 м/с до 29 м/с. При цьому значення нерівності за формулою (6) дорівнює $6695 \geq 133333$ та $14935 \geq 133333$ не відповідають дійсності. Отже, вищенаведене рівняння описує умови подрібнення краплі при впливу на неї динамічних напорів в пристінних шарах рідини. Об'єм пристінних шарів є невеликим, тому головна маса крапель подрібнюється в турбулентному ядрі потоку [4,5]. Отже, руйнування за механізмом Колмогорова – Обухова суттєвого впливу не оказує.

Під дією періодично змінного напору динамічної середи, що виникає внаслідок турбулентних пульсацій, збуджується осциляція крапель, що також може бути причиною їх подрібнення. З теорії коливань відомо, що кінетична енергія осциляції залежить по – перше, від співвідношення частоти збуджуючої сили та власної частоти коливань системи; по – друге, від величини в'язкого демпфування [7].

Власна частота коливань краплі дорівнює

$$\omega_k = \omega_k^* \sqrt{1 - \delta_z}, \quad (7)$$

де ω_k^* – частота гармонійних коливань краплі;

δ_z – декремент затухання, що характеризує в'язке демпфування краплі.

Для частоти гармонійних коливань краплі Лемб отримав рівняння підтверджене експериментальними даними [7]

МОДЕЛЮВАННЯ КОМБІНОВАНИХ ПРОЦЕСІВ ПЕРЕНОСУ. ОПТИМІЗАЦІЯ ОБЛАДНАННЯ ТА СИСТЕМ

$$\omega_{\kappa}^* = 14 \left(\frac{\sigma}{(3\rho_{ж} + 2\rho_{пл}) \cdot d_{\kappa}^3} \right)^{0,5}, \quad (8)$$

де $\rho_{ж}$ – густина вершків, кг/м³.

Безрозмірний декремент затухання для випадку осциляції рідкої краплі

$$\delta_z = \frac{1,62 \cdot (v_{ж} + 2v_{пл})}{\sqrt{\sigma \cdot d_{\kappa} (3\rho_{ж} + 2\rho_{пл})}}, \quad (9)$$

де $v_{ж}$, $v_{пл}$ – відповідно кінематична в'язкість вершків та плазми, для рідин з невеликою в'язкістю декремент затухання не перевищує $\delta_z \leq 0,5$.

Характерна частота турбулентних пульсацій в потоці суцільного середовища

$$\omega_m = 2\pi \sqrt{\frac{\Delta u^2}{d_{\kappa}}}. \quad (10)$$

При співпаданні частоти вимушуючої сили з частотою коливань краплі вступає в силу явище резонансу $\omega_{\kappa} = \omega_m$, коли енергія осциляцій та амплітуда коливань зростають до дуже великих значень.

Згідно формул (7 – 10) $\omega_{\kappa}^* = 9023047$; $\delta_z = 1,43$; $\omega_{\kappa} = 5916807$; характерна частота пульсацій краплі ω_m в залежності від значення Δu буде знаходитись в межах 47135 – 105147. Отримані дані свідчать про те, що осциляція в процесі присутня, але вирішального впливу, який би відбувся за досягнення резонансу не дає.

Розглянемо можливе подрібнення жирових кульок в умовах відсутності збудження тиску при співпадінні характерного часу деформації крапель та періоду власних коливань з часом перебування часток в зоні взаємодії з струменем молока [8]. Процес подрібнення крапель за відсутності зіткнення залежить від часу знаходження крапель всередині струменю

$$\delta t = d/v_{\perp}, \quad (11)$$

де $v_{\perp}$ – швидкість руху крапель поперек потоку плазми молока, м/с.

$$We_{\perp} = \rho_m v_{\perp}^2 d_{\kappa} / \sigma < We_m = \rho_m v_m d_{\kappa} / \sigma, \quad (12)$$

де ρ_m – густина молока, кг/м³;

v_m – швидкість потоку знежиреного молока, м/с.

При виконанні умови (12) на краплю діють Π – подібні гідродинамічні сили з амплітудою $We_{\max}$ та тривалістю дії $\theta \approx \delta t$, що виконується для процесу струминної гомогенізації де значення $We_{\perp}$ для діапазону зміни тиску коливається в діапазоні 10 – 40 а значення We_m 55 – 270.

Час миттєвого руйнування крапель розраховується

$$\tau = d_{\kappa} u^{-1} (\rho_{ж} \rho_{пл})^{0,5}. \quad (13)$$

де u – відносна швидкість руху краплі до потоку знежиреного молока, $u = (v_{\perp}^2 + v_m^2)^{0,5}$.

Час миттєвого руйнування крапель, який знаходиться в діапазоні значень $2,8 - 6,5 \cdot 10^{-8}$ с та періоду власних коливань краплі, що знаходиться в межах $3,5 - 7,9 \cdot 10^{-10}$ с з часом перебування крапель в зоні подрібнення, що складає в залежності від тиску від $2,7$ до $8,4 \cdot 10^{-4}$ с свідчать про те, що руйнування крапель відбувається квазістатично та суттєво залежить від діючого навантаження (числа Вебера).

Висновки. Основна роль в процесі гомогенізації належить швидкості ковзання жирової кульки відносно плазми молока. Розглянуто вплив на диспергування різниці швидкостей фаз, осциляції, подрібнення без зіткнення потоку та струменю і механізму Колмогорова – Обухова, а також пульсацій вихорів дрібного масштабу. З'ясовано, що руйнування за механізмом Колмогорова-Обухова не матиме суттєвого впливу на процес диспергування, оскільки при ньому зменшення розмірів жирових кульок відбувається в пристінних шарах, що займають невелику частку площі камери гомогенізатору. При аналізі дії сил осциляції дійшли висновку, що в струминному гомогенізаторі молока крапля під дією змінних напорів дисперсійного середовища не зазнає явища резонансу. Проведені теоретичні дослідження за механізмом подрібнення без зіткнення краплі з потоком, показали, що в залежності від числа Вебера в струминному гомогенізаторі молока з роздільним подаванням жирової фази буде відбуватись квазістатичне руйнування крапель жирової фази.

Отримані дані щодо механізмів подрібнення в струминному гомогенізаторі необхідні для створення повної математичної моделі процесу гомогенізації в струминних апаратах.

**МОДЕЛЮВАННЯ КОМБІНОВАНИХ ПРОЦЕСІВ ПЕРЕНОСУ.
ОПТИМІЗАЦІЯ ОБЛАДНАННЯ ТА СИСТЕМ**

Література

1. Самойчук К.О. Розробка лабораторного зразка струминного гомогенізатору з роздільною подачею вершків / К.О.Самойчук, О.О.Ковальов. Праці ТДАТУ – Мелітополь: 2011 – 77-84с.
2. Самойчук К.О. Аналіз сил дроблення жирових кульок в струминному гомогенізаторі /К .О. Самойчук, О.О. Ковальов // Наукові праці (ПФ НУБіП України "КАТУ") : Сімферополь – 2013. – Вип.153. – С. 26-34.
3. Добросельский К.Г. Симметрия уравнений Рейнольдса и полуэмпирические теории турбулентной затопленной струи / К.Г.Добросельский,А.Г. Просянник // Информатика и системы управления. – 2004. – № 1. – С. 37 – 43.
4. Абрамович Г.Н. Теория турбулентных струй/Г.Н. Абрамович. – Эколит – М.: 2011 – 728с.
5. Матвиенко О.В. Математическое моделирование турбулентного переноса дисперсной фазы в турбулентном потоке / О.В. Матвиенко, Е.В. Евтюшкин // Вестник ТГПУ, 2004. Вып. 6, С. 50 – 53.
6. Самойчук К.О. Аналітичні параметри процесу струминної гомогенізації молока з роздільною подачею вершків / К.О. Самойчук, О.О. Ковальов //Наукові праці ОНАХТ: Одеса – 2013.– Вип. 43. – Том 2 С. 77-81.
7. Соколов В.Н. Аппаратура микробиологической промышленности/В.Н.Соколов, М.А.Яблоков – Ленинград.:Машиностроение, 1988 – 278с.
8. Вьель Б. Критерии безударного дробления капель солитонобразными газодинамическими импульсами при высоком давлении / Б. Вьель, Б.Е. Гельфанд, И. Гекальп, К. Шаво // Изв. РАН. МЖГ. 2001. № 4. С. 106-112.

References

1. Samoichuk, K. and Kovalyov, A. (2011), The designing of laboratory device of jet-mixing homogenizer with the separated giving of creams [Razrabotka laboratornogo obraztsa struynogo gomogenizatora s razdelnoy podachei slivok], *Scientific study of TSATU*, pp. 77-84.
2. Samoichuk, K. and Kovalyov, A. (2013), "The analysis of power of destruction of fat globules in jet-mixing homogenizer with the separated giving of creams" [Analiz sil izmelcheniya zhirovyyh sharikov v struynom gomogenizatore], *Scientific study of SF NUBaP of Ukraine*, No. 153, pp. 26-34.
3. Dobroselsky, K. and Prosyannik, A. (2004), "The symmetry of the Reynolds equations and semi-empirical theory of turbulent submerged jet" [Simmetriya uravneniy Reynoldsa i poluempiricheskie teorii turbulentnoy zatoplennoy strui], No. 1, pp. 37-43.
4. Abramovich, G. (2011), "The theory of turbulent streams" [Teoriya turbulentnykh struy], Ekolite, Moscow, 728p.
5. Matvienko, O. and Evtushkin, E. (2004), "Mathematical modeling of the turbulent transport of dispersed phase in a turbulent flow" [Matematicheskoe modelirovaniye turbulentnogo perenosa dispersnoy fazyi v turbulentnom potoke], *Bulletin TDPU*, No. 6, pp.50-53.
6. Samoichuk, K. and Kovalyov, A. (2013), "Analytical parameters of the fluid process of homogenization of milk with separate feed of cream" [Analiticheskiye parametryi protsessu struynoy gomogenizatsii moloka s razdelnoy podachei slivok], *Scientific study of ONAFT*, Vol 43, No 2, pp.77-81.
7. Sokolov, V., Yablokov, M. (1988), "The apparatus of microbiological industry " [Apparatura mikrobiologicheskoy promyshlennosti], Mechanical engineering, Leningrad, 278p.
8. V'ell, B., Gelfand, B., Gekalp, I., Shavo, K. (2001), "Criteria unstressed crushing drops solitonoshskiy gas-dynamic pulses at high pressure" [Kriterii bezudarnogo drobleniya kapel solitonobraznyimi gazodinamicheskimi impulsami pri vyisokom davlenii], *Scientific study of RAN MLG*, No. 4, pp.106-112.