

РОЗДІЛ 10. ПІДВИЩЕННЯ ЕФЕКТИВНОСТІ ПРОЦЕСУ ГОМОГЕНІЗАЦІЇ МОЛОКА В РОТОРНО-ПУЛЬСАЦІЙНОМУ АПАРАТІ

У харчовій, як і в багатьох інших галузях промисловості, широко розповсюджені процеси гомогенізації і диспергування. Апарати, які використовуються для їх проведення, мають ряд суттєвих недоліків і часто не відповідають сучасним вимогам якості та енергозбереження. Наприклад, при переробці молока клапанні гомогенізатори мають енерговитрати більше 8 кВт/т і швидкий знос плунжерних пар і робочих органів, вакуумні – не забезпечують необхідного ступеня диспергування тощо [1; 2]. Тому задача удосконалення існуючих конструкцій диспергаторів, наприклад, за рахунок концентрації енергії та ефективного її розподілення по об'єму продукту, що обробляється, є актуальною [3].

Рішення задачі розробки енергоефективних конструкцій гомогенізаторів ускладнюється відсутністю загальноовизнаної теорії процесу диспергування. Спостереження за процесом дроблення мікроскопічної жирової кульки молока в щілині клапанного гомогенізатора вперше було здійснене у 2005 році в університеті Лунда (Швеція) при використанні сапфірового вікна в сидлі клапана і пульсуючих лазерів вздовж робочої щілини. Доведене твердження про визначальну роль у процесі деформації і руйнування жирової кульки молока в клапанному гомогенізаторі градієнта швидкості [4].

Відомо, що серед великої кількості конструкцій апаратів для гомогенізації та диспергування максимальний градієнт швидкості створюється в роторних апаратах [5]. Серед них виділяються роторно-пульсаційні апарати, призначені для багатофакторного імпульсного впливу на гетерогенну рідину для отримання стабільних високодисперсних емульсій і суспензій. За останні роки удосконаленню та розширенню сфер використання таких апаратів присвячено значну кількість публікацій [6]. В Україні найбільш раціонально та послідовно ідея використання коливального руху рідини в технологічних процесах реалізована в дослідженнях Інституту технічної теплофізики НАН України під керівництвом А. А. Долинського [7]. Недоліком при гомогенізації молока в роторно-імпульсних апаратах є присутність часток жиру великої фракції, які утворились або внаслідок коалесценції жирових кульок, або потрапили у зону недостатнього енергетичного впливу і не були зруйновані [5].

Ефективним методом підвищення ефективності роторно-пульсаційних апаратів (РПА) є накладення механічних коливань на

оброблюване середовище для виникнення резонансних явищ [8]. Якщо розглянути дисипацію потужності в РПА, то внаслідок високої нерівномірності її розподілення по об'єму апарата (у пристінних зонах градієнт швидкості на порядок вище, ніж у центральних) дисипація потужності відбувається не на поверхні розділу фаз, в результаті чого енергія використовується неефективно. Оскільки увесь об'єм гетерогенної рідини в апараті з вібруючим ротором здійснює коливання, то логічно припустити, що дисипація відбуватиметься у всьому об'ємі з однаковою інтенсивністю. При цьому вдасться усунути застійні зони, з низьким градієнтом швидкості та позбавитися недоліків у дисперсному складі оброблюваного продукту [6; 7; 9]. До схожого висновку доходили й інші автори, в результаті чого з'явилась конструкція РПА з вібруючим ротором [10]. Але процеси диспергування, що відбуваються в пульсаційних апаратах з вібруючим ротором (ПА з ВР) практично не досліджені [11].

Відповідно до цього логічним є висновок, що високого ступеня гомогенізації (на рівні пульсаційних) при невисоких енерговитратах можливо досягти при гомогенізації молока в пульсаційному апараті з вібруючим ротором [12–15].

У результаті аналітичних досліджень зміни площі переривника ПА з ВР [16] і швидкості осьового руху ротора на основі рівняння нерозривності потоку знайдені залежності швидкості руху емульсії через переривник, що викликані відцентровим тиском при обертанні ротора та осьовими коливаннями ротора [17]. Таке розмежування швидкостей дало змогу:

- дослідити характер зміни кожної швидкості з часом та визначити варіанти синхронізації фаз між обертанням та осьовими коливаннями ротора, при яких характер зміни швидкостей за величиною та часом подібний [18; 19];

- визначити енерговитрати на обертання ротора та осьові коливання ротора окремо [20];

- визначити продуктивність ПА з ВР [21].

Подібний характер зміни швидкостей, викликаних коливаннями та обертанням ротора, призводить до виникнення резонансних явищ, які очікувано призведуть до збільшення амплітуди пульсацій емульсії, підвищення прискорення, збільшення дисперсності жирової фази молока та зменшення енерговитрат. Умовами для виникнення резонансу є співвідношення між частотою обертання ротора та кривошипа $n_p = n_k / z$ та кут зсуву фаз між ними $\beta = 3\pi / 4$ [19].

Для визначення оптимальних параметрів ПА з ВР введено фактор, який характеризує збільшення прискорення емульсії на 1 кВт/т

питомих енерговитрат процесу гомогенізації [22]. Дослідження цього фактора дали змогу визначити вимоги для підвищення ефективності конструкції ПА з ВР: збільшення діаметра ротора, зменшення кількості отворів та радіуса кривошипа і незалежність від частоти обертання кривошипа.

10.1. Розробка конструктивного рішення пульсаційного гомогенізатора з ротором, що вібрує, та методика проведення експериментальних досліджень

Основною задачею проведення експериментальних досліджень є: обґрунтування параметрів і режимів роботи ПА з ВР для отримання достатнього ступеня гомогенізації за мінімальних енерговитрат на процес.

Програмою експериментальних досліджень передбачалось дослідити [23]:

- вплив часу обробки, частоти обертання ротора, кратності обробки та вібрації на розміри жирових кульок та енерговитрати.

- вплив встановленого теоретично оптимального варіанта синхронізації фаз руху ротора та кривошипа: відношення частоти обертання ротора та кривошипа і кута зсуву фаз на середній розмір жирових кульок молока.

- вплив амплітуди коливань ротора та частоти обертання ротора та кривошипа на середній розмір жирових кульок молока та перевірити його відповідність аналітичній моделі.

- вплив амплітуди коливань ротора та частоти обертання ротора та кривошипа на продуктивність ПА з ВР та встановити адекватність знайденої аналітичної залежності.

- вплив амплітуди коливань ротора та частот обертання ротора та кривошипа на енерговитрати ПА з ВР і встановити адекватність знайденої аналітичної залежності.

- характеристики дисперсності та стабільності жирової фази молока до та після гомогенізації у ПА з ВР і порівняти їх з дисперсністю жиру в молоці після його обробки в клапанному гомогенізаторі.

Роторно-пульсаційні апарати радіального типу з циліндричним ротором і радіальними пазами використовують частіше завдяки більш високій ефективності та створенню насосного ефекту, тому було обрано цей тип РПА [23].

Розроблено схему та експериментальну установку ПА з ВР (рис. 10.1, 10.2), яка складається з гомогенізуючого вузла (7) (рис.

10.1), привода вібрації ротора (що включає кривошипний механізм (9) і електродвигун (10)) і привода обертання ротора (що включає електродвигун (2) і клинопасову передачу (1) [24; 25]. Гомогенізуючий вузол ПА з ВР має лопатки (8) для підвищення насосного ефекту, що дозволяє працювати без додаткових насосів.

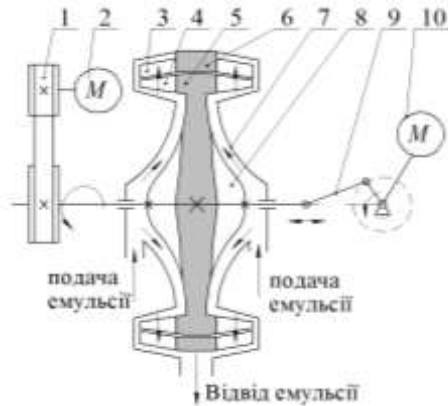


Рис. 10.1. Схема експериментальної установки ПА з ВР: 1 – пасова передача; 2 – електродвигун приводу обертання ротора; 3 – отвори статора; 4 – отвори ротора; 5 – ротор; 6 – статор; 7 – гомогенізуючий вузол; 8 – лопатки; 9 – кривошипний механізм приводу вібрації ротора; 10 – електродвигун приводу вібрації ротора

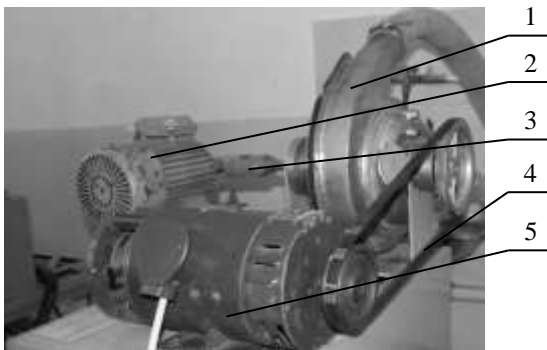


Рис. 10.2. Експериментальна установка для дослідження ПА з ВР: 1 – гомогенізуючий вузол; 2 – електродвигун приводу вібрації ротора; 3 – кривошипний механізм; 4 – клинопасова передача; 5 – електродвигун обертання ротора

Конструкція та геометрія апарата виконувалась відповідно до останніх досліджень і рекомендацій для проєктування РПА, призначених для диспергування та гомогенізації жирових емульсій (рис. 10.3).

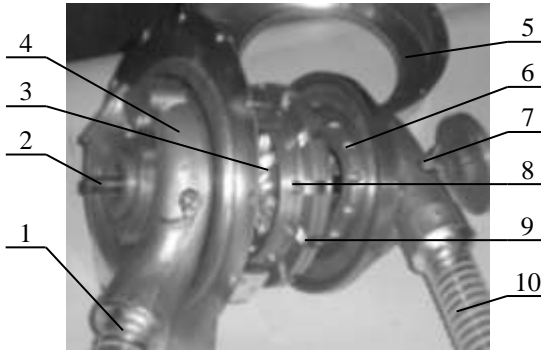


Рис. 10.3. Гомогенізуючий вузол ПА з ВР: 1 – патрубок відведення продукту; 2 – вісь ротора; 3 – лопатки; 4 – корпус; 5 – кришка; 6 – статор; 7 – перепускний вентиль; 8 – отвори ротора; 9 – розгонні пази ротора; 10 – патрубок подачі продукту

Прототипом для створення робочої камери ПА з ВР є турбіна ТКР-12. Гомогенізуючий вузол ПА з ВР має лопатки (3) для підвищення насосного ефекту та розгонні пази, що дозволяє такому РПА працювати без додаткових насосів. В порожнині створюється надлишковий тиск рідини, під дією якого продукт відводиться з апарата через патрубок (1). Радіальні отвори ротора (8) та статора (6) створюють необхідну пульсацію рідини, формуючи модулятор ПА. В пазах (9) здійснюється зіткнення цих потоків емульсії, що додатково підвищує ефективність емульгування продукту. Перепускний вентиль (7) необхідний для заповнення продуктом робочого простору гомогенізуючого вузла при його пуску.

Дисперсні показники молочної емульсії визначали комп'ютерним аналізом мікрофотографій проб молока, отриманих за допомогою оптичного мікроскопа та цифрової камери [26]. Обробляли результати у програмному забезпеченні Microsoft Visual Studio та OpenCV Sharp [27].

При вирішенні оптимізаційних задач критеріями оптимізації обрано отримання середнього діаметра жирових кульок молочної емульсії 0,8 мкм за мінімальних енерговитрат.

10.2. Експериментальні дослідження дисперсності жирової фази молока при обробці в пульсаційному гомогенізаторі з ротором, що вібрує в умовах резонансних явищ

Перед повнофакторним експериментом був проведений пошуковий експеримент, який дозволяє оцінити більшість статистичних характеристик змінних об'єкта дослідження. Проте цих відомостей недостатньо для постановки основного експерименту. Основним його завданням є дослідження впливу різних чинників на мінливість середніх значень спостережуваних випадкових величин і їх кількісна оцінка.

Для двофакторного дисперсійного аналізу ПА з ВР:

- А – частота обертання ротора, об./хв;
- В – ступінь відкриття заслінки, %;
- АВ – фактор взаємодії : частота обертання ротора + ступінь відкриття заслінки.

Результати наведені у табл. 10.1 і 10.2 [23; 28].

Таблиця 10.1

Оцінка впливу факторів на середній розмір жирової кульки

Фактори	Оцінка впливу факторів, частки одиниці			
	Одно-кратна обробка	Двократна обробка	Однократна обробка з вібрацією	Двократна обробка з вібрацією
А	0,684	0,669	0,784	0,870
В	0,275	0,214	0,152	0,072
АВ	0,005	0,016	0,005	0,004
Вплив повторень	0,005	0,007	0,012	0,007
Вплив випадкових чинників	0,031	0,094	0,048	0,047

Таблиця 10.2

Оцінка впливу факторів на питомі енерговитрати

Фактори	Оцінка впливу факторів, частки одиниці			
	Однократна обробка	Двократна обробка	Однократна обробка з вібрацією	Двократна обробка з вібрацією
1	2	3	4	5
А	0,723	0,530	0,507	0,630

Продовження таблиці 10.2

1	2	3	4	5
B	0,072	0,292	0,277	0,315
AB	0,116	0,017	0,044	0,028
Вплив повторень	0,004	0,003	0,008	0,004
Вплив випадкових чинників	0,084	0,158	0,164	0,023

Як показує дисперсійний аналіз, найбільш суттєвим на процес диспергування емульсії є вплив чинника А – частоти обертання ротора – більше 50 %; В – ступінь відкриття заслінки справляє менш істотний вплив – 7–32 %. Чинник взаємодії АВ в математичній моделі буде незначущий (може бути відсутнім), що узгоджується з теоретичними дослідженнями.

Відповідно до складеного плану був проведений повнофакторний експеримент щодо визначення впливу часу обробки (ступеня відкриття заслінки), частоти обертання ротора, кратності обробки та вібрації ротора на розміри жирових кульок [23; 28].

Для однократної обробки без вібрації розмір часток рівномірно зменшується з підвищенням частоти обертання ротора (рис. 10.4а), що пояснюється збільшенням щільності енергії, яка підводиться до робочого об'єму продукту.

Подібний характер має вплив ступеня відкриття заслінки, що пояснюється збільшенням часу диспергування.

Енерговитрати очікувано мінімальні при мінімальній частоті обертання та мініальному опорі всмоктуванню емульсії – повністю відкритій заслінці (рис. 10.4б).

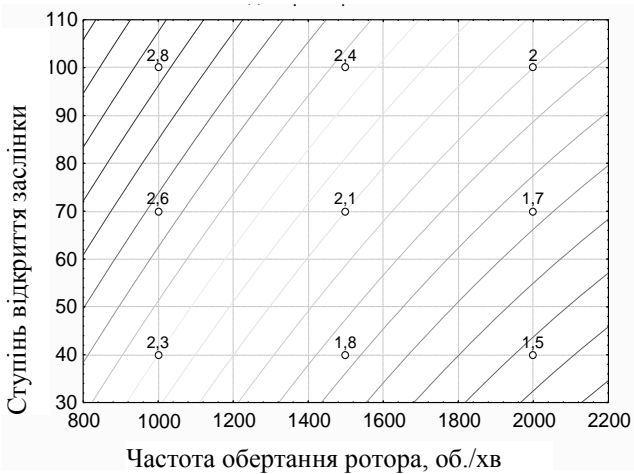
Розкодована модель прогнозування розміру жирової частки:

$$y_i = 3,18 - 0,00144x_1 + 0,00883x_2 + 0,000000203x_1^2. \quad (10.1)$$

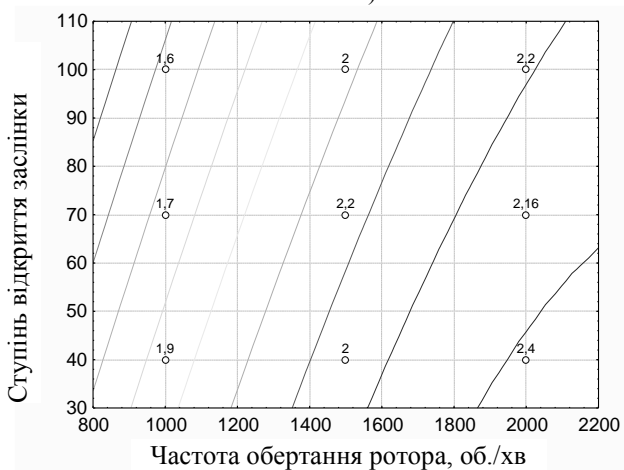
Розкодована модель енерговитрат:

$$y_i = 3,52 - 0,00252x_1 + 0,005x_2 + 0,000000588x_1^2. \quad (10.2)$$

Мінімальний розмір часток становить 1,6 мкм при частоті 1900–2000 об/хв. і ступені відкриття заслінки 40 % за питомих енерговитрат 2,2–2,4 кВт·год/т. Мінімальні енерговитрати – 1,6 кВт·год/т при розмірі часток 2,8 мкм.



а)



б)

Рис. 10.4. Поверхня і лінії рівнів функції відгуку при однократній обробці: а – розмір часток, б – питомі енерговитрати

Для двократної обробки характерно підвищення ступеня дисперсності емульсії на 10–15 % після обробки при частотах 1000–1600 об./хв і мінімальному відкритті заслінки порівняно з однократною (рис. 10.5а).

При частотах 1800–2000 об./хв якість обробки практично не відрізняється від однократної, але енерговитрати зростають майже в 2 рази (рис. 10.5б). Таким чином, збільшення кратності обробки у пульсаційному апараті неефективне і не призводить до збільшення ефективності гомогенізації як це спостерігається, наприклад, у клапанних гомогенізаторах.

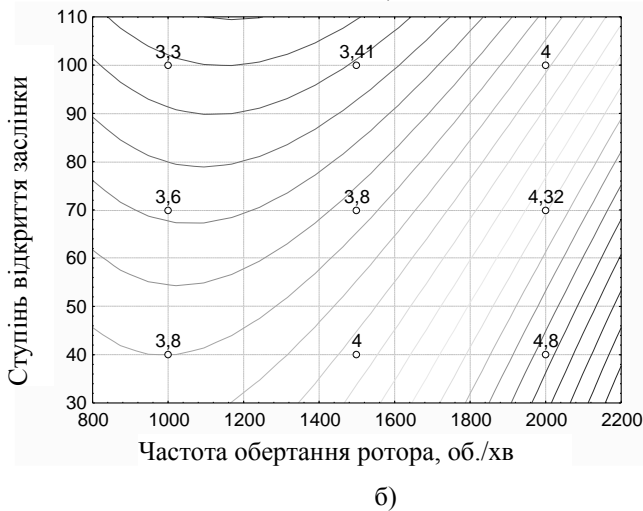
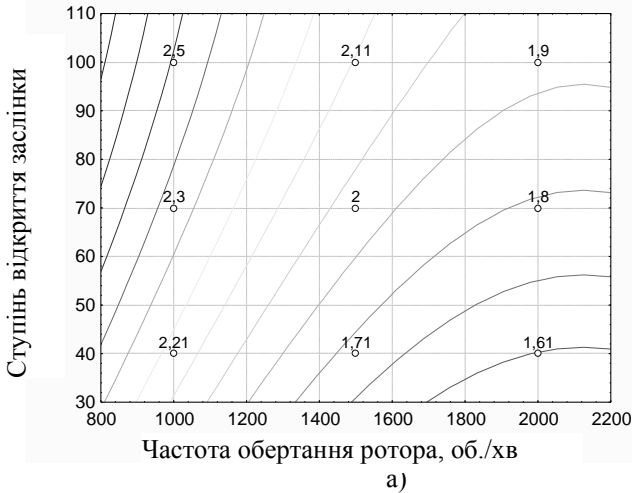


Рис. 10.5. Поверхня і лінії рівнів функції відгуку при двократній обробці: а – розмір часток, б – питомі енерговитрати

Розкодована модель прогнозування розміру жирової частки:

$$y_i = 3,459 - 0,00195x_1 + 0,00547x_2 + 0,00000046x_1^2. \quad (10.3)$$

Розкодована модель енерговитрат:

$$y_i = 4,815 - 0,001599x_1 - 0,00273x_2 - 0,00000527x_1x_2 + 0,000000928x_1^2. \quad (10.4)$$

Розмір часток емульсії після однократної обробки з вібрацією зменшується на 15–20 % порівняно з обробкою без вібрації і сягає 1,3–1,5 мкм при частотах обертання 1500–1800 об./хв і відкритті заслінки 70 % і нижче (рис. 10.6а). Підвищення ступеня диспергування у цьому діапазоні частот узгоджується з теоретичними дослідженнями і пояснюється виникнення резонансу при синхронізації з частотою обертання кривошипа. Енерговитрати у цьому діапазоні факторного простору – 3,2–3,9 кВт·год/т (рис. 10.6б).

Однократна обробка з вібрацією дозволяє одержати емульсію з дисперсністю на 12–15 % вищу і енерговитратами на 10–12 % меншими, ніж двократна обробка без вібрації, що свідчить про істотний позитивний ефект використання віброуючого ротора.

Для підвищення енергоефективності необхідно обирати режими зі зниженою частотою вібрації ротора та збільшеним ступенем відкриття заслінки.

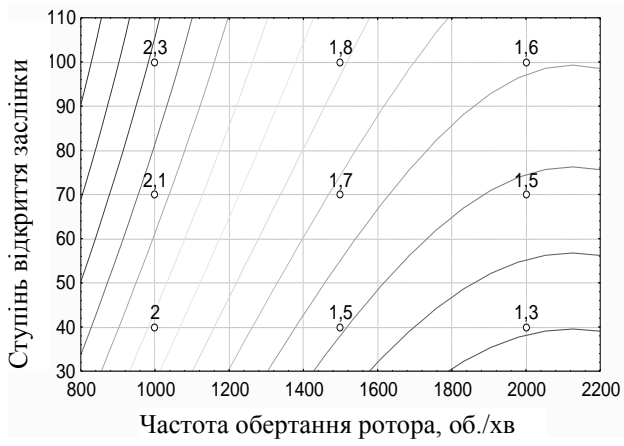
Розкодована модель прогнозування розміру жирової частки:

$$y_i = 3,52 - 0,002252x_1 + 0,005x_2 + 0,000000528x_1^2. \quad (10.5)$$

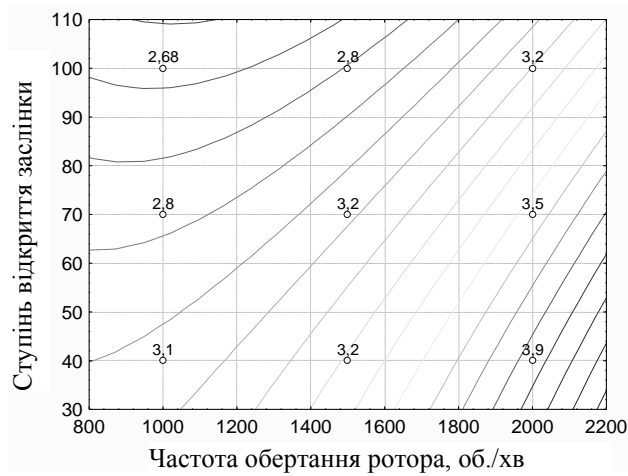
Розкодована модель прогнозування енерговитрат при однократній обробці з вібрацією:

$$y_i = 3,826 + 0,000876x_1 - 0,00847x_2 + 0,000000516x_1^2. \quad (10.6)$$

При двократній обробці з вібрацією досягається найвищий ступінь диспергування жирової фази з розміром часток 1,1–1,3 мкм, що на 15–20 % менше, ніж при однократній обробці з вібрацією (рис. 10.7а). При цьому частота обертання складає 1400–1600 об./хв, відкриття заслінки – 40–80 %, і енерговитрати – 6,2–7,6 кВт·год/т (рис. 10.7б), що в 2 рази вище, ніж максимальні енерговитрати при однократній обробці з вібрацією.



а)



б)

Рис. 10.6. Поверхня і лінії рівнів функції відгуку при однократній обробці з вібрацією: а – розмір часток, б – величина питомих енерговитрат

Якщо при рівному ступені диспергування емульсії (розмір часток 1,3–1,5 мкм) порівняти вібраційну однократну та вібраційну двократну обробку, то енерговитрати останньої в 1,8–2,0 рази більші.

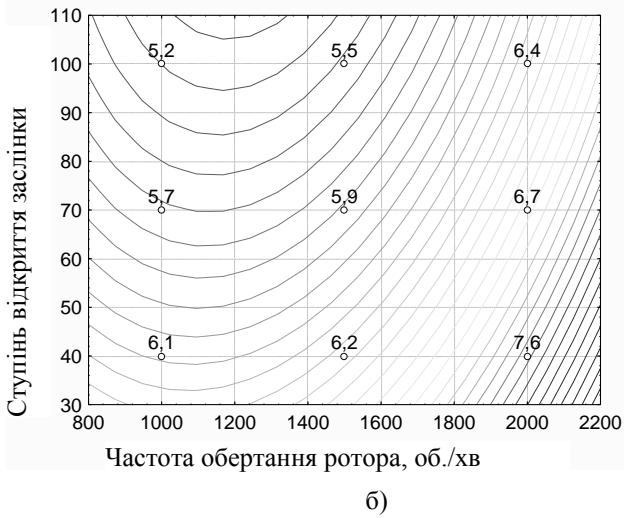
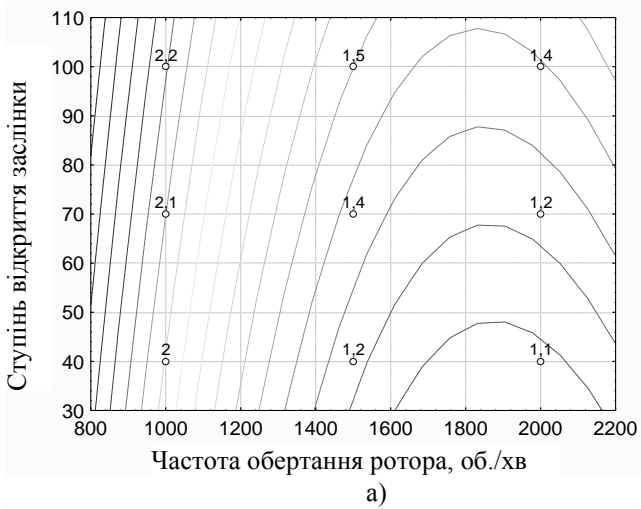


Рис. 10.7. Поверхня і лінії рівнів функції відгуку при двократній обробці з вібрацією: а – розмір часток, б – величина питомих енерговитрат

Розкодована модель прогнозування розміру жирової частки:

$$y_i = 5,045 - 0,004454x_1 + 0,00447x_2 + 0,0000012x_1^2 \quad (10.7)$$

Розкодована модель енерговитрат:

$$y_i = 8,27 - 0,00396x_1 - 0,00803x_2 - 0,000005x_1 \cdot x_2 + 0,00000166x_1^2. (10.8)$$

Таким чином, в результаті проведення експериментального дослідження ПА з ВР одержані рівняння залежностей енерговитрат і середнього розміру жирових кульок жирової емульсії у діапазоні частот обертання ротора 1000–2000 об./хв і ступеня відкриття заслонки на виході з апарата 40–100 % при температурі емульсії 60...65 °С.

Встановлено, що:

- збільшення кратності обробки у пульсаційному апараті неефективно і не призводить до підвищення ступеня диспергування, як це спостерігається, наприклад, у клапанних гомогенізаторах;

- однократна обробка з вібрацією дозволяє одержати емульсію з дисперсністю на 12–15 % вище і енерговитратами на 10–12 % менше, ніж двократна обробка без вібрації, що свідчить про істотний позитивний ефект використання вібруючого ротора;

- для підвищення енергоефективності необхідно обирати режими зі зниженою частотою вібрації ротора та збільшеним ступенем відкриття заслінки;

- для досягненні розмірів часток жиру в емульсії 1,3–1,5 мкм найбільш доцільно використовувати вібраційну однократну обробку, енерговитрати якої у 1,8–2,0 рази менші, ніж у двократної обробки з вібрацією.

В результаті проведення аналітичних досліджень визначено, що для досягнення виникнення резонансу і максимального ступеня диспергування молочного жиру в ПА з ВР оптимальна частота обертання ротора повинна бути синхронізована з частотою обертання кривошипа: $n_p = n_k / z$. Крім того, кут зсуву фаз між обертанням кривошипа та ротора повинен складати 270°. Для перевірки дійсності теоретичних розрахунків проведено дослідження впливу на середній діаметр жирових кульок частоти обертання кривошипа для 3 випадків: $n_p = n_k / z$, $n_p = 0,5n_k / z$ і $n_p = 2n_k / z$ (рис. 10.8). Результати свідчать про значне збільшення ефективності гомогенізації при $n_p = n_k / z$ [19]. Пояснити збільшення d_k при підвищенні частоти обертання ротора можна лише виникненням резонансних явищ – збільшенням амплітуди пульсації емульсії в переривнику ПА з ВР.

Внаслідок збільшення прискорення емульсії в переривнику при збільшенні частоти обертання кривошипа та ротора діаметр жирових

часток зменшується [3; 23]. При n_k більше 2400 об./хв темпи зменшення жирових часток уповільнюються і можна прогнозувати, що досягти $d_k=0,8$ мкм можливо тільки при підвищенні значень n_p значно більше, ніж $n_p = 2n_k / z$.

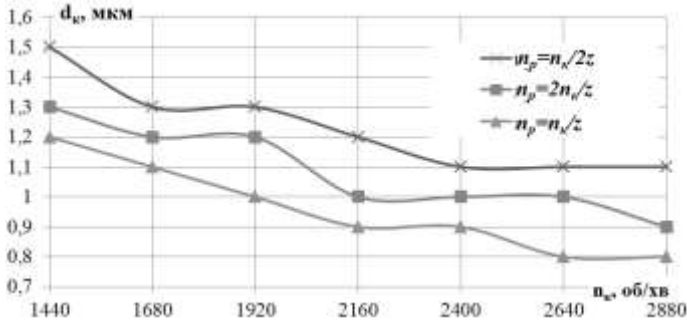


Рис. 10.8. Графік зміни діаметра жирових кульок d_k залежно від частоти обертання кривошипа n_k для $n_p = n_k / z$, $n_p = 0,5n_k / z$ і $n_p = 2n_k / z$

На рис. 10.9 показано залежність між кутом зсуву фаз обертового та коливального рухів ротора та розмірами жирових кульок, яка свідчить про збільшення ефективності диспергування при оптимальному, за теоретичними розрахунками, куті зсуву $\beta=3\pi/2$.

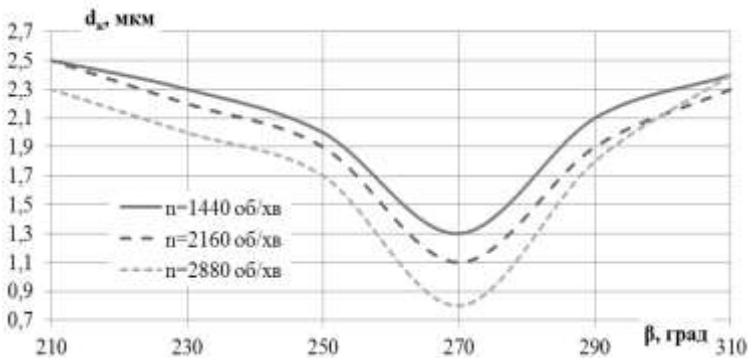


Рис. 10.9. Залежність діаметра жирової кульки d_k від кута зсуву фаз обертового та коливального рухів ротора β та частоти обертання кривошипа n_k

При збільшенні або зменшенні кута зсуву фаз на 20° розміри жирових кульок збільшуються в 1,8–2,2 рази, а при збільшенні (зменшенні) цього кута на $40\text{--}60^\circ$ гомогенізація практично не відбувається. Це свідчить про високий ступінь підвищення амплітуди коливань при резонансі пульсацій та, як наслідок, прискоренні потоку емульсії.

Результати експерименту визначення залежності середнього розміру жирових кульок молока від частоти обертання ротора та радіуса кривошипа (що визначає амплітуду осьових коливань ротора) (рис. 10.10) свідчать про задовільне збігання теоретичних розрахунків та експериментальних даних (відносна похибка не перевищує 10 %) [3].

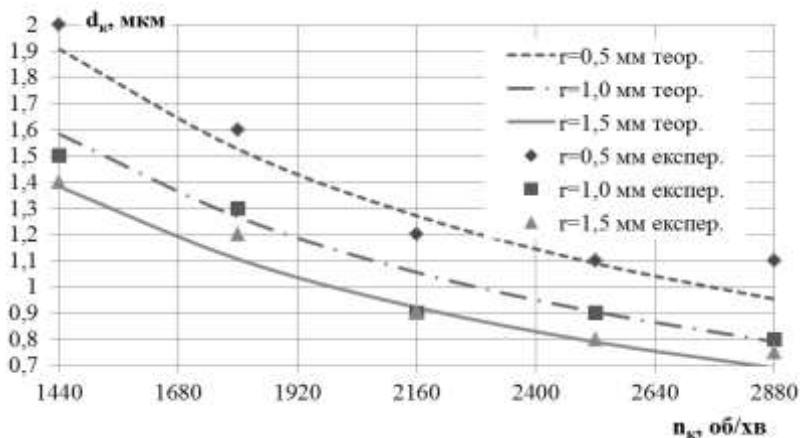


Рис. 10.10. Графік порівняння теоретичних та експериментальних результатів визначення середнього розміру жирових кульок молока d_k від частоти обертання n_k та радіуса кривошипа r

Однакову дисперсність можливо отримати при різних n_k та r . За результатами визначення фактора ефективності гомогенізації оптимальними будуть режими з мінімальним r незалежно від n_k і n_p . Наприклад, $d_k=0,8$ мкм можна отримати при $r=1,5$ мм і $n_k=2520$ об./хв та при $r=1,0$ мм і $n_k=2880$ об./хв. Але при $r=1,0$ мм питомі енерговитрати є меншими.

Отже, при створенні промислових зразків ПА з ВР при виборі раціональних режимів гомогенізації слід обирати режими з мінімальною амплітудою вібрації ротора. Це пояснюється тим, що при

збільшенні амплітуди осьових вібрацій ротора прискорення збільшується менш істотно, ніж при збільшенні частоти обертання.

У попередніх дослідженнях було визначено, що руйнування жирових кульок для ПА з ВР відбувається при збільшенні швидкості ковзання жирової кульки відносно оточуючої плазми пропорційно прискоренню емульсії. Для перевірки цієї гіпотези змінювали частоту обертання валу кривошипа n_k в діапазоні 1440–2880 об./хв і радіус кривошипа r у діапазоні 0,5–1,5 мм. Для кожного дослідження розраховувалось значення середнього прискорення молочної емульсії a_e , і визначався середній розмір жирових кульок (рис. 10.11) [3].

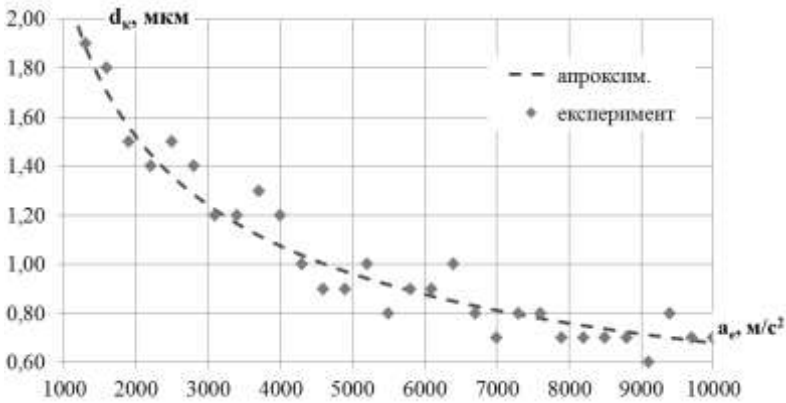


Рис. 10.11. Діаметр жирових кульок d_k в залежності від середнього прискорення емульсії a_e

Результати з достовірністю 92 % апроксимуються виразом [24; 29]

$$d_k = \frac{68 \cdot 10^{-6}}{\sqrt{a}} \quad (10.9)$$

Розрахунки за цією формулою для $n_p = n_k / z$ наведені штриховою лінією на рис 10.11.

Подібність отриманої формули з виразом руйнування краплі Релея – Тейлора свідчить про подібність механізмів руйнування крапель для нестійкості Релея – Тейлора з диспергуванням жирових кульок у ПА з ВР. Причому характер залежності подібний, наприклад,

до залежності середнього діаметра жирових кульок від тиску для клапанної гомогенізації, а також для струминної та пульсаційної гомогенізації [30]. Загалом при підвищенні інтенсивності впливу темпи збільшення дисперсності знижуються.

Різниця у значеннях коефіцієнта гомогенізації для пульсаційної поршньової (ППГ) і ПА з ВР обумовлена істотними відмінностями гідродинамічних умов диспергування молочного жиру в цих гомогенізаторах. В ПА з ВР існують великі градієнти швидкостей в зазорі між ротором і статором та значно більш розвинута кавітація, що знижує значення K_h . Але основною причиною значно меншого значення коефіцієнта гомогенізації для ПА з ВР є резонансні явища, в результаті яких підвищується амплітуда та прискорення руху емульсії [30]. При неоптимальному куті зсуву фаз (рис. 10.9) середнє прискорення a_e змінюється незначно. І в умовах відсутності резонансу таких значень a_e недостатньо для руйнування жирової кульки. Поява резонансу зменшує розміри жирових кульок в 3 рази (з 2,4 до 0,8 мкм), тобто при резонансі значення a_e збільшується як мінімум у 9 разів, а коефіцієнт гомогенізації знижується мінімум у 3 рази та без резонансу для ПА з ВР $K_h > 68 \cdot 3 = 204 \text{ м}^{3/2}/\text{с}$, тобто близький за значенням до ППГ.

10.3. Результати експериментальних досліджень енерговитрат пульсаційного гомогенізатора з ротором, що вібрує

За результатами теоретичних досліджень радіус кривошипа не впливає на продуктивність ПА з ВР внаслідок рівності пульсацій рідини всередину ротора та назовні при кожному циклі перекриття отворів переривника. За результатами експериментальних досліджень при $r = 0,5 \text{ мм}$ продуктивність ПА з ВР на 3–6 % менша за розраховану (рис. 10.12), а при $r = 1,5 \text{ мм}$ – на 2–5 % більша [3].

Це можна пояснити тим, що при розрахунках не була врахована сила Коріоліса. Однак похибка теоретичних розрахунків не перевищує 7 %, тому достовірність аналітичної залежності [21] достатня для інженерних розрахунків ПА з ВР.

Результати визначення енерговитрат ПА з ВР та порівняння їх з теоретичними розрахунками наведені на рис. 10.13 та 10.14.

Як свідчать дані рис. 10.14, потужність обертання не залежить від радіуса кривошипа та резонансних явищ. Відхилення експериментальних даних від теоретичної залежності становить 6 %, тому отримана аналітична залежність адекватна [3; 20].

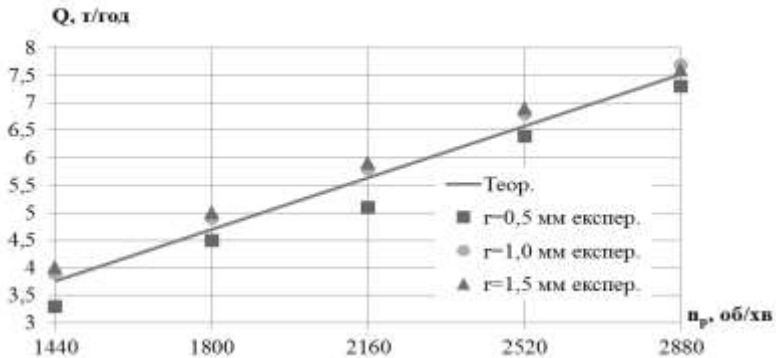


Рис. 10.12. Графік порівняння результатів експериментальних і теоретичних досліджень визначення продуктивності Q залежно від частоти обертання ротора n_p та радіуса кривошипа r ПА з ВР

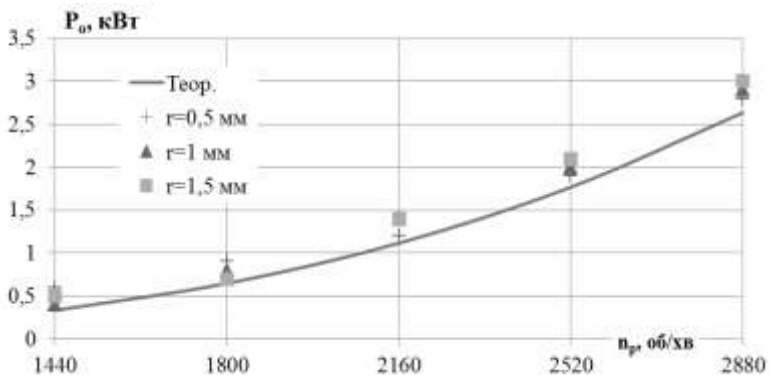


Рис. 10.13. Графік порівняння теоретичних та експериментальних даних споживаної потужності обертання ротора P_0 залежно від радіуса кривошипа r та частоти обертання ротора n_p

Потужність електродвигуна приводу вібрації ротора менше за розраховану на 18–22 %, що викликано резонансними явищами.

Апроксимована залежність для дійсної потужності вібрації $P_{вд}$ має вигляд:

$$P_{вд} = 0,8P_v . \quad (10.10)$$

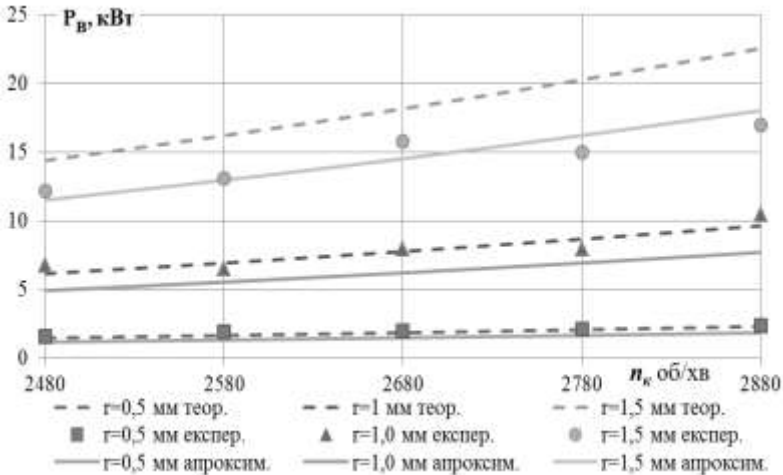


Рис. 10.14. Графік порівняння теоретичних та експериментальних даних і апроксимованих залежностей споживаної потужності вібрації P_v ПА з ВР від радіуса кривошипа r і частоти обертання ротора n_k

Коефіцієнт детермінації експериментальних даних і скоригованої потужності вібрації не перевищує 5 %.

Таким чином, гомогенізація молока в ПА з ВР дозволяє отримати емульсію з дисперсністю жирової фази 0,8 мкм при частоті вібрації 2880 об./хв і амплітуді 1,8–2,2 мм. Необхідна сумарна потужність електродвигунів ПА з ВР складає 10,5 кВт при продуктивності 7,5 т/год і питомих енерговитратах 1,4–1,6 кВт·год/т.

Висновки за розділом

Проведені експериментальні дослідження ПА з ВР показали високу кореляцію ($R^2 > 0,94$) між прискоренням емульсії та середнім діаметром жирових кульок, що доводить аналітичну модель диспергування жирової фази молока в пульсаційних гомогенізаторах. Експериментально визначено значення коефіцієнта гомогенізації: $0,068 \cdot 10^{-3} \text{ м}^3/2\text{с}$ для ПА з ВР, порівняння якого зі значеннями коефіцієнта гомогенізації для машин клапанного типу дозволяє кількісно оцінювати сукупний вплив на процес диспергування молочного жиру в різних конструкціях гомогенізаторів додаткових гідродинамічних факторів.

В результаті вивчення закономірностей процесу гомогенізації молока в ПА з ВР встановлено, що для забезпечення мінімальної енергоємності (1,4–1,6 кВт·год/т) необхідно застосовувати однократну обробку з вібраційним впливом при частоті осьових вібрації ротора 2880 об./хв і амплітуді 1,8–2,2 мм.

Зазначене підвищення дисперсності гомогенізації у 2–3 рази при збіганні частоти відкриття отворів переривника з частотою вібраційних осьових коливань ротора та кутом зсуву між ними в 270° , що пояснюється виникненням резонансних явищ – збільшенням амплітуди пульсації емульсії в переривнику ПА з ВР.

Список використаних джерел за розділом

1. Huppertz T. Homogenization of Milk | Other Types of Homogenizer (High-Speed Mixing, Ultrasonics, Microfluidizers, Membrane Emulsification) // Encyclopedia of Dairy Sciences (Second Edition). 2011. P. 761–764.

2. Дейниченко Г. В., Самойчук К. О., Івженко А. О., Левченко Л. В. Аналіз конструкцій гомогенізаторів молочної промисловості. *Праці Таврійського державного агротехнологічного університету*. 2016. Вип. 16. Т. 1. С. 9–15.

3. Самойчук К. О. Розвиток наукових основ гідродинамічного диспергування молочних емульсій : автореф. дис. ... д-ра техн. наук : 05.18.12. Харків, 2018. 45 с.

4. Innings F., Trägårdh C. Visualization of the Drop Deformation and Break-Up Process in a High Pressure Homogenizer. *Chemical Engineering & Technology*. 2005. Vol. 28. Issue 8. August. 2005. P. 882–891.

5. Фиалкова Е. А. Гомогенизация. Новый взгляд : монография-справочник. СПб. : ГИОРД, 2006. 392 с.

6. Промтов М. А. Пульсационные аппараты роторного типа: теория и практика : монография. М. : Машиностроение-1, 2001. 260 с.

7. Долинский А. А., Иваницкий Г. К. Тепломассообмен и гидродинамика в парожидкостных дисперсных средах. Теплофизические основы дискретно-импульсного ввода энергии. Киев : Наук. думка, 2008. 381 с.

8. Самойчук К. О., Паляничка Н. О., Верховланцева В. О. Гомогенізація жирової фази молока в пульсаційному апараті з ротором, що вібрує //Фундаментальні та прикладні дослідження у сучасній науці : матеріали ІV наук. конф., 30 жовт. 2016 р. Харків : Технологический центр, 2016. С. 86–87.

9. Дейниченко Г. В., Самойчук К. О. Підвищення ефективності процесу гомогенізації молока в пульсаційному гомогенізаторі з

вібруючим ротором // Інноваційні аспекти розвитку обладнання харчової і готельної індустрії в умовах сучасності : тези доп. Міжнар. наук.-практ. конф., 8–11 верес. 2015 р. Мелітополь–Кирилівка : ХДУХТ, 2015. С. 384–386.

10. Самойчук К. О., Паляничка Н. О. Підвищення ефективності діяльності молокопереробних підприємств за рахунок впровадження нових типів гомогенізаторів // Підвищення ефективності діяльності підприємств харчової та переробної галузей АПК : матеріали V Всеукр. наук.–практ. конф., 17–18 листоп. 2016 р. Київ : НУХТ, 2016. С. 210–211.

11. Самойчук К. О., Івженко А. О. Механізми диспергування жирової фази в пульсаційному апараті з вібруючим ротором. *Праці Таврійського державного агротехнологічного університету*. 2013. Вип. 13. Т. 7. С. 11–20.

12. Дейниченко Г. В., Самойчук К. О. Перспективные конструкции гомогенизаторов молока // Озик-овқат ва кимёсаноатида чиқиндисиз ва екологик самарадор технологияларни қўллаш: мавзусида Республика миқёсидаги илмий-амалий анжуман иштирокчиларининг илмий маъруза материаллари киритилган, 14 марта 2017 г. Наманган шаҳри : НамМПИ, 2017. С. 146–148.

13. Самойчук К. О., Ковальов О. О., Левченко Л. В. Перспективні способи диспергування жирової фази молока // Розвиток харчових виробництв, ресторанного та готельного господарств і торгівлі: проблеми, перспективи, ефективність : тези доп. Міжнар. наук.-практ. конф. (Харків, 18 трав. 2017 р.). Харків : ХДУХТ, 2017. Ч. 1. С. 280–281.

14. Самойчук К. О., Паляничка Н. О., Верхованцева В. О., Левченко Л. В. Перспективи використання вібраційних гомогенізаторів молока // Вібрації в техніці та технологіях : зб. тез доп. XVI Міжнар. наук.-практ. конф. (Вінниця, 26–27 жовт. 2017 р.). Вінниця : ВНАУ, 2017. С. 36–38.

15. Дейниченко Г. В., Самойчук К. О., Левченко Л. В. Перспективи використання пульсаційного гомогенізатора-диспергатора емульсій // Проблеми конструювання, виробництва та експлуатації сільськогосподарської техніки : матеріали XI Міжнар. наук.-практ. конф. (Кропивницький, 1–3 листоп. 2017 р.). Кропивницький : ЦНТУ, 2017. С. 17–19.

16. Самойчук К. О., Івженко А. О. Рівняння зміни площі прохідного перетину модулятора в пульсаційному апараті з вібруючим ротором. *Наукові праці Національного університету харчових технологій*. 2015. Т. 21. № 4. С. 164–170.

17. Самойчук К. О., Івженко А. О. Определение скорости в модуляторе пульсационного гомогенизатора с вибрирующим ротором.

Вестник Могилёвского государственного университета продовольствия. 2014. № 1 (16). С. 87–99.

18. Самойчук К. О., Івженко А. О. Визначення резонансних режимів роботи пульсаційного апарата з вібруючим ротором. *Обладнання та технології харчових виробництв.* 2013. Вип. 31. С. 74–82.

19. Дейніченко Г. В., Самойчук К. О., Івженко А. О. Синхронізація коливальних і обертальних рухів ротора у пульсаційному гомогенізаторі з вібруючим ротором. *Вібрації в техніці та технологіях.* 2016. № 1 (81). С. 122–131.

20. Самойчук К. О., Івженко А. О. Розрахунок енерговитрат пульсаційного апарата з вібруючим ротором. *Наукові праці ОНАХТ.* 2013. Вип. 43. Т. 2. С. 133–137.

21. Самойчук К. О., Івженко А. О. Визначення продуктивності пульсаційного апарату з вібруючим ротором. *Наукові праці ОНАХТ.* 2014. Вип. 45. Т. 3. С. 25–30.

22. Самойчук К. О., Івженко А. О. Ефективність гомогенізації молока в пульсаційному апараті з вібруючим ротором *Вісник Харківського національного технічного університету сільського господарства ім. Петра Василенка «Сучасні напрямки технології та механізації процесів переробних і харчових виробництв».* 2015. Вип. 166. С. 98–104.

23. Самойчук К. О. Розвиток наукових основ гідродинамічного диспергування молочних емульсій : дис. ... д-ра техн. наук : 05.18.12. Харків, 2018. 544 с.

24. Samoichuk K., Kiurchev S., Oleksienko V., Palyanichka N., Verholantseva V. Investigation of homogenization of milk in a pulsation machine with a vibrating rotor. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies.* 2016. № 6/11 (84). P. 16–21.

25. Samoichuk K., Kiurchev S., Oleksienko V., Palyanichka N., Verholantseva V. Research into usage efficiency of the pulsation machine with a vibrating rotor for milk homogenization. *EUREKA: Life Sciences.* 2016. Vol. 6. P. 3–10.

26. Самойчук К. О., Ковальов О. О., Івженко А. О. Аналіз методів оцінювання якості гомогенізації молока. *Праці Таврійського державного агротехнологічного університету.* 2012. Вип. 12. Т. 4. С. 222–229.

27. Самойчук К. О., Паляничка Н. О. Методи аналізу зображень при визначенні дисперсійних характеристик мікроемульсій методом оптичного мікроскопування // *Фундаментальна підготовка фахівців у природничо-математичній, технічній, агротехнологічній та економічній галузях : матеріали Всеукраїнської наук.-практ. конф. з міжнародною участю (Мелітополь, 11–13 верес. 2017 р.).* Мелітополь : ТДАТУ, 2017. С. 140–142.

28. Самойчук К. О., Івженко А. О. Експериментальні дослідження диспергування жирової емульсії в пульсаційному апараті з вібруючим ротором. *Обладнання та технології харчових виробництв*. 2013. Вип. 30. С. 155–161.

29. Самойчук К. О. Прискорення емульсії як основний фактор гідродинамічного диспергування жирової фази молока. *Прогресивні техніка та технології харчових виробництв ресторанного господарства і торгівлі*. 2017. Вип. 2 (26). С. 210–220.

30. Самойчук К. О. Визначення універсального фактора диспергування жирової фази молока // Інноваційні аспекти розвитку обладнання харчової і готельної індустрії в умовах сучасності : матеріали II Міжнар. наук.-практ. конф. (Харків, 5–7 верес. 2017 р.). Харків : ХДУХТ, 2017. С. 17–19.