

# ДОСЛІДЖЕННЯ ГОМОГЕНІЗАЦІЇ МОЛОКА В ПУЛЬСАЦІЙНОМУ АПАРАТІ З РОТОРОМ, ЩО ВІБРУЄ

**К. О. Самойчук**

Кандидат технічних наук, доцент\*

E-mail: samanya\_kir@mail.ru

**С. В. Кюрчев**

Кандидат технічних наук, професор

Кафедра технології конструкційних матеріалів\*\*

E-mail: dec.tgatu@mail.ru

**В. О. Олексієнко**

Кандидат технічних наук, доцент\*

E-mail: aleks.vadi65@yandex.ua

**Н. О. Паляничка**

Кандидат технічних наук, старший викладач\*

E-mail: palyanichkan@gmail.com

**В. О. Верхоланцева**

Кандидат технічних наук, старший викладач\*

E-mail: milaeva.v@mail.ru

\*Кафедра обладнання переробних і харчових виробництв\*\*

\*\*Таврійський державний агротехнологічний університет  
пр. Богдана Хмельницького, 18, м. Мелітополь, Україна, 72312

*Обґрунтовано вплив основних кінематичних і конструктивних параметрів пульсаційного гомогенізатора з ротором, що вібрує, на середнє прискорення емульсії в отворах переривника. Встановлено залежність середніх розмірів жирових кульок молока від прискорення емульсії в переривнику апарата та частоти обертання й амплітуди вібрації ротора. Визначені дисперсні характеристики молока після гомогенізації*

*Ключові слова: гомогенізація молока, гомогенізатор, пульсаційний апарат з ротором, що вібрує*

*Обосновано влияние основных кинематических и конструктивных параметров пульсационного гомогенизатора с вибрирующим ротором на среднее ускорение эмульсии в отверстиях прерывателя. Установлена зависимость средних размеров жировых шариков молока от ускорения эмульсии в прерывателе аппарата и частоты вращения и амплитуды вибрации ротора. Определенные дисперсные характеристики молока после гомогенизации*

*Ключевые слова: гомогенизация молока, гомогенизатор, пульсационный аппарат с вибрирующим ротором*

## 1. Вступ

Сьогодні важко знайти технологічну схему виробництва молочного продукту, де б не використовувалась гомогенізація [1]. Для молока гомогенізація призводить до покращення смакових та сенсорних властивостей, підвищення в'язкості та стабільності, сприяє кращій засвоюваності більш дрібних часток молочного жиру і іншим перевагам [2]. Сучасні апарати, які використовуються для гомогенізації молока, часто не відповідають сучасним вимогам якості та енергозбереження [3]. Найбільш розповсюдженими є клапанні гомогенізатори, які відрізняються найвищими якісними показниками дисперсності молочної емульсії, але мають енерговитрати більш 7 кВт/т [4, 5]. Вакуумні, ультразвукові та роторні, незважаючи на низькі енерговитрати, не забезпечують високого ступеня диспергування [6–8]. Гомогенізатори надвисокого тиску і микрофлюїдизатори, навпаки, при високому ступені дисперсності отриманої емульсії, мають надвисокі енерговитрати [9, 10]. Зважаючи на це і враховуючи сучасні тенденції до впровадження енергозберігаючих технологій, актуальною проблемою молочної промисловості є розробка апаратів для гомогенізації молока з якісними показниками дисперсності молочної емульсії, порівнянних з обробкою в клапанних машинах, але зі знизеними енерговитратами.

## 2. Аналіз літературних даних та постановка проблеми

Однією з основних проблем при дослідженні гомогенізаторів є відсутність єдиної теорії гомогенізації для молока [1, 3, 4]. На сьогоднішній день налічується більше 6 теорій гомогенізації та більше 10 механізмів руйнування крапель, які лежать в основі цих теорій [10]. Основна причина невизначеності у теоріях диспергування жирової фази молока – брак експериментальних даних по спостереженню за руйнуванням жирових кульок молока [6, 8]. Мікроскопічні розміри та високі швидкості їх руху в робочих органах гомогенізаторів (до 200 м/с в клапанних машинах [5]) значно утруднюють можливості візуального спостереження за дробленням жирових часток.

Спостереження за процесом дроблення мікроскопічної жирової кульки молока в щілині клапанного гомогенізатора вперше було здійснене у 2005 році [12]. Автором використані сапфірові вікна в сидлі клапана і пульсуючі лазери вздовж робочої щілини. Встановлено, що жирові кульки в робочій щілині витягуються в нитки, які розпадаються на дрібні краплі. Цей процес узгоджується з теорією гомогенізації [13], яка була запропонована ще в середині минулого століття. Крім того, ці візуальні дані відповідають ґрунтовним дослідом по руйнуванню крапель в'язких рідин [14].

За допомогою швидкісної кінозйомки отримані етапи руйнування крапель олії при ударному впливі на

дисперсійне середовище [15]. Отриманий висновок, що подрібнення відбувається за рахунок зриву поверхневих шарів краплі. Розміри крапель в експерименті становили 1–5 мм, а результати перераховувались відповідно до мікроскопічних розмірів жирових кульок за допомогою критеріїв подібності. Але справедливості таких критеріїв для мікроміра є сумнівним.

Таким чином, результати візуальних експериментів процесу диспергування жирової фази відповідають механізмам руйнування крапель, ретельно дослідженим у роботі [14]. За цими дослідженнями диспергування відбувається за критерієм Вебера. Методика розрахунку клапанних гомогенізаторів також базується на визначенні критерія Вебера [4]. Визначальним для цього критерію є квадрат різниці швидкостей між дисперсною та дисперсійною фазами. Цю різницю швидкостей для молока називають швидкістю ковзання жирової кульки відносно молочної плазми (дисперсійного середовища). Її визначення викликає труднощі, тому її намагалися замінити або швидкістю потоку [4, 16] або градієнтом швидкості потоку [16, 17]. При такій заміні зміст критерію Вебера істотно спотворюється і не може бути універсальним фактором руйнування для гомогенізаторів різних типів.

Всі механізми руйнування, в тому числі за критерієм Вебера, базуються на відмінності густини між дисперсною та дисперсійними фазами. Виділити жирову кульку та примусити її рухатись з відмінною від оточуючої плазми швидкістю – це основна задача створення високоефективних конструкцій гомогенізаторів. Одним з методів вирішення цієї задачі є створення ударних [15], пульсуючих [18] або вібраційних [19] впливів на оброблюване середовище. В результаті дії цих впливів за рахунок відмінності густини жирової кульки та молочної плазми, інерціальні сили спричиняють виникнення швидкості ковзання жирової частки. Моделювання гідравлічних процесів у клапанній щілині гомогенізатора також підтверджують теорію руйнування за рахунок інерційних сил [9, 20, 21]. Мірою інерціальних сил є прискорення потоку рідини. Дійсно, при русі молочної емульсії з прискоренням за рахунок різниці густини між фазами молока, виникає різниця швидкостей між жировою кулькою та плазмою. Саме тому пропонується використати прискорення потоку, як базовий фактор руйнування жирових кульок молока. Прискорення досить легко розрахувати і використовувати як універсальний критерій для диспергування жирової фази у багатьох типах гомогенізаторів.

Серед великої кількості конструкцій апаратів для гомогенізації, завдяки енерговитратам у 4–5 разів менше ніж в клапанних і високій дисперсності молочної емульсії виділяються роторно-пульсаційні апарати (РПА) [22].

Недоліком таких гомогенізаторів є присутність у молоці часток жиру великої фракції, які потрапили у зону недостатнього енергетичного впливу і не були зруйновані. Позбавлені цього недоліку різновид РПА, ротор яких здійснює коливання вздовж вісі обертання [19]. Пульсаційні апарати з вібруючим ротором (ПА з ВР) ефективні завдяки дисипації потужності на межі розділу фаз дисперсного та дисперсійного середовища у всьому об'ємі продукту і роботі у резонансному режимі. Тому енерговитрати гомогенізації в ПА з ВР на

15–30 % нижчі за РПА [23]. В таких апаратах досягаються високі значення прискорення потоку, а отже такі апарати дуже перспективні для отримання високого ступеня диспергування жирової фази молока.

Під час вже проведених аналітичних досліджень висунута гіпотеза, що прискорення потоку є базовий чинник для руйнування жирових кульок в ПА з ВР [11]. Прискорення є визначальним для руйнування крапель у механізмі нестійкості Релея-Тейлора. Діаметр дисперсійної частки залежить від прискорення молока при його русі крізь канали переривника. Прискорення потоку молока викликає різницю швидкості (ковзання) жирової кульки відносно молочної плазми. Ця швидкість і призводить до руйнування жирової частки. Таким чином, для перевірки гіпотези про визначальну роль в процесі диспергування прискорення потоку емульсії та визначення основних показників гомогенізації в ПА з ВР необхідні подальші дослідження.

---

### 3. Мета та задачі дослідження

---

Метою роботи є визначення особливостей процесу гомогенізації молока у ПА з ВР і встановлення впливу прискорення потоку на дисперсні показники молочної емульсії.

Для досягнення поставленої мети вирішувалися наступні задачі:

- аналітичне визначення залежності прискорення молочної емульсії як основного фактору руйнування жирових часток молока від конструктивно-кінематичних параметрів ПА з ВР;
- встановлення залежності діаметра часток молочного жиру (жирових кульок) від прискорення молочної емульсії та конструктивно-кінематичних параметрів ПА з ВР;
- визначення дисперсних показників емульсії молока після обробки в ПА з ВР.

---

### 4. Обладнання та методи досліджень гомогенізації молока в пульсаційному гомогенізаторі з ротором, що вібрує

---

Для проведення теоретичних досліджень використовували класичні залежності гідравліки та механіки, теорії дискретно-імпульсного введення енергії, коливань консервативних лінійних систем. Експериментальні дослідження проводились на лабораторній установці ПА з ВР (м. Мелітополь, Україна) [24]. Об'єктом експериментальних досліджень є молоко коров'яче жирністю 3,2–4,5 %. Розміри жирових кульок молока після гомогенізації підраховували за допомогою оптичного мікроскопа з приєднаною цифровою камерою. Змінними факторами при проведенні експериментальних досліджень були: частота обертання валу кривошипу  $\omega_k$  та радіус кривошипу  $r$ .

З методами теоретичних досліджень, розрахунковою схемою, принципами дії апарата, методами експериментальних досліджень, об'єктом дослідження, способом визначення дисперсних показників молочної емульсії, конструкцією експериментальної установки для гомогенізації молока в ПА з ВР, а також з вибором факторів для проведення експериментальних досліджень більш детально можна ознайомитись в роботі [24].

**5. Результати досліджень гомогенізації молока в пульсаційному гомогенізатор з ротом, що вібрує**

У результаті аналітичних досліджень визначено рівняння зміни площі переривника ПА з ВР, швидкості осевого руху ротора і величин пульсації швидкості від відцентрових сил. Це дало змогу визначити залежність швидкості руху емульсії  $v_0$  через переривник апарату [25]

$$v_0 = \frac{60 \omega_k r D \cos \beta}{\frac{\pi^2 D}{2z} \left( 1 + \sin \left( \varphi z - \frac{\pi}{2} \right) \right) + 8\pi \delta} + \frac{\pi \omega_p D^2}{4z(l_p + \delta + l_c)} \left\{ \frac{\varphi z}{2\pi} \right\}, \quad (1)$$

де  $\beta, \phi$  – кут повороту відповідно валу кривошипу та ротора, рад.;  $\omega_k, \omega_p$  – частота обертання відповідно валу кривошипу та ротора,  $c^{-1}$ ;  $D$  – діаметр ротора, м;  $r$  – радіус кривошипу, м;  $\left\{ \frac{\varphi z}{2\pi} \right\}$  – дробова частина числа  $\frac{\varphi z}{2\pi}$ .

Перша складова цього рівняння визначає швидкість, спричинену осевими коливаннями ротора, а друга – відцентровим тиском при обертанні ротора.

При створенні резонансу збільшується амплітуда пульсації емульсії в переривнику, що підвищує ефективність гомогенізації. Умовою виникнення резонансу є виконання рівності  $\omega_p = \omega_k / z$  або  $\phi = \beta / z$  [26, 27] і кут зсуву фаз між обертанням ротора та валу кривошипу  $\beta = 3\pi / 2$  [27]. З урахуванням цих умов рівняння (1) перетворюється до вигляду

$$v_0 = \frac{60 \omega_k r D \cos(\beta - 3\pi / 2)}{\frac{\pi^2 D}{2z} \left( 1 + \sin \left( \beta - \frac{\pi}{2} \right) \right) + 8\pi \delta} + \frac{\pi \omega_p D^2}{4z(l_p + \delta + l_c)} \left\{ \frac{\beta}{2\pi} \right\}. \quad (2)$$

Для знаходження прискорення  $a$ , продиференціюємо останнє рівняння, враховуючи, що  $dt = (1/\omega_k) d\beta$ , в результаті чого отримаємо

$$a = \frac{dv_0}{dt} = \frac{\pi \omega_k^2 D^2}{4z^2(l_p + \delta + l_c)} - \frac{30 \omega_k^2 D r \left[ \frac{2K}{\pi} \sin \left( \omega_k t - \frac{3\pi}{2} \right) + \frac{D}{z} \cos \left( \omega_k t - \frac{3\pi}{2} \right) \cos \left( \omega_k t - \frac{\pi}{2} \right) \right]}{K^2}, \quad (3)$$

де  $K = \frac{\pi D}{2z} \left( 1 + \sin \left( \omega_k t - \frac{\pi}{2} \right) \right) + 8\pi \delta$  – коефіцієнт, що характеризує зміну геометрії модулятора ПА з ВР з часом, м.

Графічно отримана залежність  $a_c = f(t)$  при  $D = 0,15$  м,  $\omega_k = 300 c^{-1}$ ,  $\omega_p = 50 c^{-1}$ ,  $r = 1$  мм,  $z = 6$ ,  $\delta = 1$  мм,  $l_p = 0,005$  м,  $l_c = 0,01$  м показана на рис. 1.

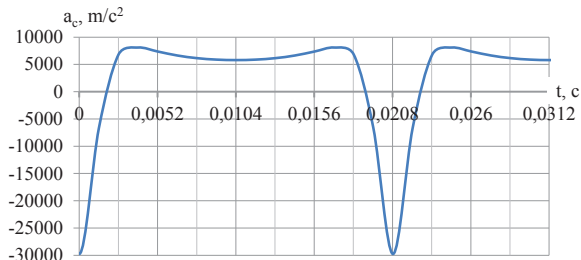


Рис. 1. Залежність прискорення рідини  $a_c$  в отворах модулятора від часу  $t$

Середнє прискорення  $a_c$  визначимо для умов, що відповідають  $t = 0,0026 - 0,0182$  с (рис. 1), де прискорення практично не змінюється

$$a_c = \omega^2 D^2 \left( \frac{\pi}{4z^2(l_p + \delta + l_c)} + \frac{30r}{z \left( \frac{\pi D}{2z} + 8\delta \right)^2} \right) \quad (4)$$

На початку та в кінці циклу закриття та відкриття отворів максимальне прискорення більше ніж в 3 рази перевищує середнє, тому в ці періоди часу ступінь подрібнення жирових кульок значно перевищує розраховані за останньою формулою.

З отриманого виразу (4) легко побачити, що найбільший вплив на прискорення справляє частота обертання кривошипу  $a_c \sim \omega_k^2$ . Збільшення радіусу кривошипу призводить до лінійного збільшення другого доданку (рис. 2).

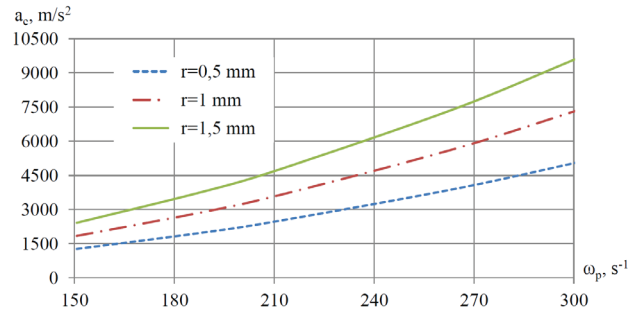


Рис. 2. Вплив частоти обертання  $\omega_p$  та радіусу кривошипу  $r$  на середнє прискорення  $a_c$

Кількість отворів  $z$  визначає частоту обертання ротору ( $\omega_p = \omega_k / z$ ), тому істотно впливає на  $a_c$ . Зв'язок між прискоренням та діаметром ротора приблизно можна виразити як  $a_c$  пропорційне  $D$  (рис. 3).

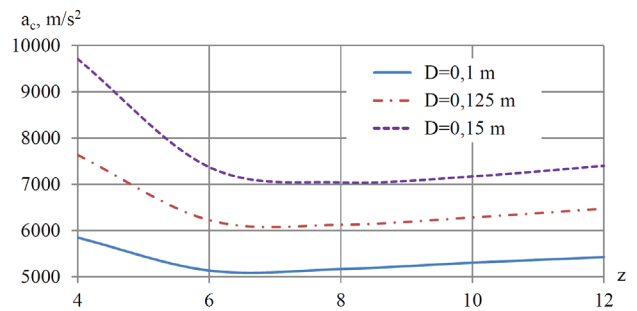


Рис. 3. Вплив кількості отворів  $z$  та діаметру ротора  $D$  на середнє прискорення  $a_c$

Графіки на рис. 3 має мінімум, який приходить на  $z = 6 \dots 8$ . При зменшенні кількості отворів до 4 прискорення зростає, причому темпи зростання тим істотніше, чим більше діаметр ротора. У діапазоні  $z = 7 \dots 12$  можна вважати, що прискорення лінійно зростає при збільшенні діаметру ротора.

Таким чином, максимальні умови для подрібнення жирових кульок молока створюються при  $z = 4$ ,  $(\omega_k, r, D) \rightarrow \max$ , і  $(\delta, l_p, l_c) \rightarrow \min$ . Діапазон коливання параметрів  $\delta, l_p, l_c$  невеликий, тому їх вплив на  $a_c$  незначний.

В експериментальній частині досліджень при комбінації змінних факторів (частоти обертання та радіусу кривошипу) розраховувалось значення середнього прискорення молочної емульсії  $a_c$  (згідно формули (4)) і визначався середній розмір жирових кульок молока (рис. 4).

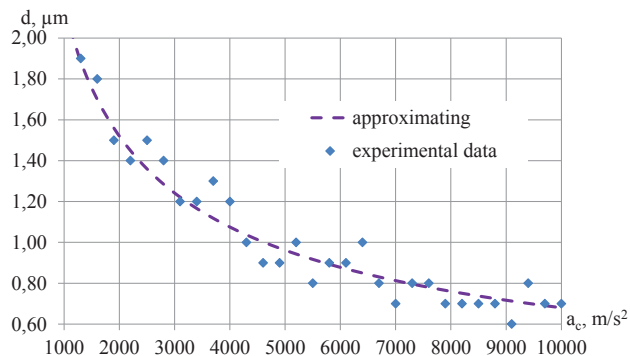


Рис. 4. Залежність між середнім діаметром жирових кульок  $d$  після гомогенізації та прискоренням молочної емульсії  $a_c$

Результати з достовірністю 92 % апроксимуються виразом (на рис. 4 показано штриховою лінією)

$$d = \frac{68}{\sqrt{a}} \tag{5}$$

Слід зауважити про подібність отриманої залежності з формулою нестійкості Релея-Тейлора для руйнування крапель рідини [11, 28]. Це свідчить про подібність механізмів руйнування за нестійкістю Релея-Тейлора з диспергуванням жирових кульок у ПА з ВР.

Представимо результати експерименту у іншому вигляді (рис. 5).

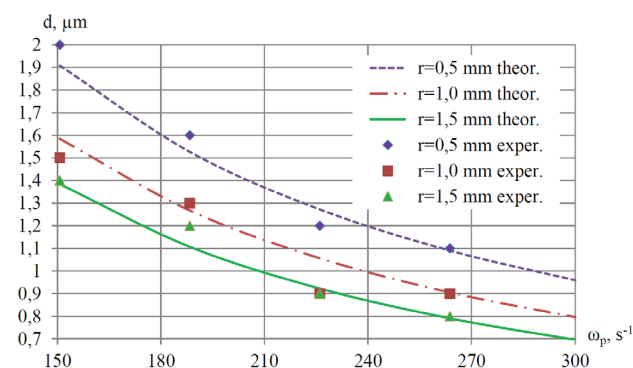


Рис. 5. Залежність середнього розміру жирових кульок молока  $d$  від частоти обертання ротора  $\omega_p$  та радіусу кривошипу  $r$

Згідно залежностей, показаних на рис. 5, однакову дисперсність можливо отримати при різних  $\omega_k$  та  $r$ . Наприклад  $d=0,8$  мкм можливо отримати при  $r=1,5$  мм і  $\omega_k=260$  с<sup>-1</sup> та при  $r=1,0$  мм і  $\omega_k=300$  с<sup>-1</sup>.

Проведено порівняння фракційного складу жирових кульок після гомогенізації в ПА з ВР (при  $n_k=2880$  об/хв,  $r=1$  мм) до клапанною гомогенізацією (при тиску 16 МПа). Молоко до гомогенізації характеризується такими параметрами: середній діаметр жирових кульок  $D=2,6$  мм,

дисперсія  $\sigma=1,7$ , коефіцієнт варіації (частка розсіювання признаку відносно середнього)  $V=68$  %. Відповідно для молока після гомогенізації у ПА з ВР та клапанною гомогенізаторі А1-ОГ2М:  $D=0,8$  мм та  $0,9$  мм,  $\sigma=0,38$  і  $0,44$ ,  $V=46$  і  $49$  % відповідно.

Середній діаметр жирових кульок при обробці у ПА з ВР зменшився на 11 % у порівнянні з клапанною, зменшилося значення дисперсії, що свідчить про підвищення якості гомогенізованої емульсії.

## 6. Обговорення результатів дослідження гомогенізації молока в пульсаційному апараті з ротором, що вібрує

Результати проведених досліджень є продовженням циклу робіт, присвячених розробці математичної моделі, конструкції, визначенню ефективності та особливостей роботи та використання ПА з ВР для гомогенізації молока.

Залежність прискорення рідини в отворах модулятора (рис. 1) демонструє сплески прискорення, які відбуваються в моменти відкриття та закриття модулятора ПА з ВР. Згідно існуючої теорії гомогенізації у РПА саме у моменти закривання отворів ротора у статорі апарата створюється розрідження, яке викликає руйнування жирових кульок молока за рахунок кавітації [18, 22]. Час, протягом якого істотний вплив справляють кавітаційні ефекти ( $t=0,0182-0,0234$  с) складає лише 25 % від тривалості всього циклу закриття – відкриття переривника ( $t=0,0208$  с) для ПА з ВР. Для роторно-пульсаційного апарату доля тривалості кавітаційних ефектів буде подібною до ПА з ВР. Можливо це одна з основних причин існування істотного відсотку великих жирових часток у молоці після обробки в РПА. Частина жирових кульок, проходячи крізь отвори переривника у моменти його повного відкриття не піддається впливу кавітації, тому залишається неподрібненою.

Для ПА з ВР синхронізація коливальних і обертальних рухів ротора здійснена таким чином, щоб підтримувати значення прискорення на максимальному рівні [27]. В середині циклу при повному відкритті отворів ( $t=0,0104$  с) прискорення зменшується лише на 26 %, що свідчить про набагато більш високу рівномірність впливу на жирову фазу молока ніж в РПА та дозволяє прогнозувати високі показники дисперсності емульсії після обробки.

Аналізуючи рівняння середнього прискорення (4) та графічні залежності впливу  $\omega_p$ ,  $r$ ,  $D$  та  $z$  (рис. 2, 3) найбільший інтерес представляють мінімуми на графіку при зміні  $z$  (рис. 3). Результати показують, що існують значення кількості отворів (6...10), при яких прискорення, а отже і ефективність гомогенізації Па з ВР мінімальна. Найбільше прискорення можливо отримати при кількості отворів 4 і менше. При кількості отворів менше 4 на визначення прискорення починає суттєво впливати викривлення площини розташування отворів ротора. При великій кількості отворів, при виводі формули (4) вважали, що отвори переривника ПА з ВР є плоскими [25]. Але таке припущення вже не можна вважати дійсним при  $z=4$  та менше.

Конструктивні параметри ротора ПА з ВР знаходяться у тісному взаємозв'язку. Зменшення кількості отворів, для забезпечення оптимальної синхронізації



фаз, спричиняє збільшення їх діаметра та ширини ротора (при незмінному діаметрі ротора). Це призводить до витрати емульсії крізь переривник. Водночас при незмінній частоті обертання це викликає зменшення частоти пульсацій та підвищення часу циклу закриття – відкриття переривника. Накладання цих факторів призводить до результатів, показаних на рис. 3.

Взаємозв'язок середнього прискорення та середнього розміру часток емульсії після гомогенізації в ПА з ВР – найважливіший етап дослідження, який дозволяє довести або спростувати теорію про визначальний вплив прискорення емульсії в процесі гомогенізації молока. Як бачимо (рис. 4), достовірність апроксимації залежності діаметра жирових кульок від прискорення емульсії досить висока (92 %). Причому характер залежності подібний, наприклад, до залежності середнього діаметру жирових кульок від тиску для клапанної [10, 21], струминної та пульсаційної гомогенізації [7, 17]. Загалом, при підвищенні інтенсивності впливу, темпи збільшення дисперсності знижуються.

У більшості механізмів диспергування крапель основним фактором руйнування є швидкість потоку. Швидкість є ключовим фактором для клапанної, струминної та пульсаційної гомогенізації. Швидкість легко розрахувати і визначити для кожного конкретного типу гомогенізатора. Але однакові значення швидкості, наприклад, для струминної та клапанної гомогенізації, дають зовсім різний ступінь гомогенізації. Прискорення в цьому сенсі обіцяє бути більш універсальним показником для багатьох типів гомогенізаторів. Механізм руйнування крапель Релея-Тейлора виділяється тим, що оснований на розрахунку прискорення потоку. Грунтовно подібність диспергування за механізмом Релея-Тейлора та під час гомогенізації у ПА з ВР ще маємо з'ясувати у подальших дослідженнях.

За результатами досліджень енерговитрат ПА з ВР оптимальними будуть режими з мінімальним  $\tau$  [23]. В цих режимах енерговитрати мінімальні. Отже при  $\tau=1,0$  мм (що дорівнює амплітуді коливання 2 мм) питомі енерговитрати процесу 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 [23].

Експериментальні результати дослідження дисперсного складу молока після обробки в ПА з ВР і порівняння їх клапанною (якість якої є повністю задовільною для будь-яких процесів молочної промисловості [1, 4]) свідчать про перевагу обробки в ПА з ВР [29]. Причому ці показники досягаються при питомих енерговитратах значно менших за обробку в клапанних гомогенізаторах [23]. Отримані результати доводять, що ПА з ВР може замінити за показниками якості та енерговитрат існуючі на виробництві клапанні гомогенізатори при обробці молока. В майбутніх дослідженнях планується визначення ефективності ПА з ВР для обробки в'язких продуктів (вершків, сумішей для виробництва морозива, майонезів).

Слід зауважити, що при вищезазначених перевагах, конструкція ПА з ВР, яка містить віброуючий робочий орган, досить складна і за цим показником наближується до клапанних гомогенізаторів, які є одними з найскладніших і коштовних апаратів для гомогенізації. Тому зниження негативного впливу вібрації – це проблема, яку необхідно буде вирішити при створенні промислових зразків ПА з ВР.

## 7. Висновки

В результаті проведених аналітичних та експериментальних досліджень:

- визначений вплив основних параметрів ПА з ВР на показник середнього прискорення обробленої емульсії, що полягає в зростанні прискорення при збільшенні діаметра, амплітуди коливання і частоти обертання ротора, зменшенні довжини каналів ротора, статора та зазору між ними і кількості отворів у роторі,  $z \leq 4$ ;

- встановлена емпірична залежність між середнім діаметром жирової кульки (0,7–1,9 мкм) та середнім прискоренням емульсії  $((1-10) \cdot 10^3 \text{ м/с}^2)$  в переривнику ПА з ВР, яка, з достовірністю 92 %, доводить, що прискорення потоку емульсії є основним чинником гомогенізації в ПА з ВР;

- визначено, що при частотах обертання валу кривошину до 2880 об/хв і амплітуді коливання ротора 1 мм можливе отримання молочної емульсії з середнім розміром близько 0,8 мкм, що порівняно з обробкою в клапанних гомогенізаторах (при тиску 16 МПа), що свідчить про перспективність використання ПА з ВР у виробничих умовах для гомогенізації молока.

## Література

1. Wilbey, R. A. Homogenization of milk [Text] / R. A. Wilbey. – Encyclopedia of Dairy Sciences, 2002. – P. 1346–1349. doi: 10.1016/b0-12-227235-8/00202-9
2. Michalski, M.-C. Does homogenization affect the human health properties of cow's milk? [Text] / M.-C. Michalski, C. Januel // Trends in Food Science & Technology. – 2006. – Vol. 17, Issue 8. – P. 423–437. doi: 10.1016/j.tifs.2006.02.004
3. Фиалкова, Е. А. Гомогенизация. Новый взгляд [Текст]: монография – справочник / Е. А. Фиалкова. – Спб.: ГИОРД, 2006. – 392 с.
4. Нужин, Е. В. Гомогенизация и гомогенизаторы [Текст]: монография / Е. В. Нужин, А. К. Гладушняк. – Одесса: Печатный дом, 2007. – 264 с.
5. Wilbey, R. A. Homogenization of Milk: Principles and Mechanism of Homogenization, Effects and Assessment of Efficiency: Valve Homogenizers [Text] / R. A. Wilbey. – Encyclopedia of Dairy Sciences, 2011. – P. 750–754. doi: 10.1016/b978-0-12-374407-4.00223-5
6. Delmas, H. Ultrasonic mixing, homogenization, and emulsification in food processing and other applications [Text] / H. Delmas, L. Barthe. – Power Ultrasonics, 2015. – P. 757–791. doi: 10.1016/b978-1-78242-028-6.00025-9

7. Huppertz, T. Homogenization of Milk | Other Types of Homogenizer (High-Speed Mixing, Ultrasonics, Microfluidizers, Membrane Emulsification) [Text] / T. Huppertz. – Encyclopedia of Dairy Sciences, 2011. – P. 761–764. doi: 10.1016/b978-0-12-374407-4.00226-0
8. Liu, C. Measurement and analysis of bimodal drop size distribution in a rotor-stator homogenizer [Text] / C. Liu, M. Li, C. Liang, W. Wang // Chemical Engineering Science. – 2013. – Vol. 102. – P. 622–631. doi: 10.1016/j.ces.2013.08.030
9. Brivibaa, K. Ultra high pressure homogenization of almond milk: Physico-chemical and physiological effects [Text] / K. Brivibaa, V. Gräfc, E. Walzc, B. Guamisd, P. Butz // Food Chemistry. – 2016. – Vol. 192. – P. 82–89. doi: 10.1016/j.foodchem.2015.06.063
10. Cirona, C. I. E. Comparison of the effects of high-pressure microfluidization and conventional homogenization of milk on particle size, water retention and texture of non-fat and low-fat yoghurts [Text] / C. I. E. Ciron, V. L. Gee, A. L. Kelly, M. A. E. Auty // International Dairy Journal. – 2010. – Vol. 20, Issue 5. – P. 314–320. doi: 10.1016/j.idairyj.2009.11.018
11. Самойчук, К. О. Механізми диспергування жирової фази в пульсаційному апараті з вібруючим ротором [Текст] / К. О. Самойчук, А. О. Івженко // Праці ТДАТУ. – 2013. – Вип. 13, Т. 7. – С. 11–20.
12. Innings, F. Visualization of the Drop Deformation and Break-Up Process in a High Pressure Homogenizer [Text] / F. Innings and C. Trägårdh // Chemical Engineering & Technology. – 2005. – Vol. 28, Issue 8. – P. 882–891. doi: 10.1002/ceat.200500080
13. Wittig, A. B. The quality of homogenized drinking milk in relation to the sequence of modern treating processes [Text] / A. B. Wittig // XVI Int. Dairy Congr. – 1962. – Vol. A. – P. 906–916.
14. Дитякин, Ю. Ф. Распыливание жидкостей [Текст] / Ю. Ф. Дитякин, Л. А. Клячко, Б. В. Новиков, В. И. Ягодкин. – М.: Машиностроение, 1977. – 208 с.
15. Орешина, М. Н. Исследование кинетики дробления частиц в жидких средах при воздействии возмущений давления [Текст] / М. Н. Орешина // Хранение и переработка сельхозсырья. – 2010. – № 5. – С. 11–12.
16. Loncin, M. Food Engineering. Principles and Selected Applications [Text] / M. Loncin, R. Merson. – New York: Academic Press, 1979. – 279 p.
17. Паляничка, Н. О. Визначення ступеня гомогенізації при імпульсній гомогенізації молока [Текст] / Н. О. Паляничка, О. В. Гвоздев // Праці ТДАТУ. – 2013. – Вип. 13, Т. 7. – С. 102–107.
18. Promtov, M. A. Dynamic of cavitation bubbles in rotor impuls apparatus [Text] / M. A. Promtov, M. X. Monastirsky // Journal of Qingdao Just, of Chem. Techn. – 2000. – Vol. 21, Issue 4. – P. 318–321.
19. Самойчук, К. О. Експериментальні дослідження диспергування жирової емульсії в пульсаційному апараті з вібруючим ротором [Текст] / К. О. Самойчук, А. О. Івженко // Обладнання та технології харчових виробництв. – 2013. – Вип. 30. – С. 155–161.
20. Taghinaa, J. CFD modeling of homogenizer valve: A comparative study [Text] / J. Taghina, M. Rahman, T. K. T. Tse, T. Siikonen // Chemical Engineering Research and Design. – 2016. – Vol. 106. – P. 327–336. doi: 10.1016/j.cherd.2015.12.014
21. Håkansson, A. On flow-fields in a high pressure homogenizer and its implication on drop fragmentation [Text] / A. Håkansson, L. Fuchs, F. Innings, J. Revstedt, C. Trägårdh, B. Bergenstähl // Procedia Food Science. – 2011. – Vol. 1. – P. 1353–1358. doi: 10.1016/j.profoo.2011.09.200
22. Промтов, М. А. Машины і апарати з імпульсними енергетичними діями на оброблювані речовини [Текст] / А. М. Промтов. – М.: «Видавництво Машиностроение-1», 2004. – 136 с.
23. Самойчук, К. О. Розрахунок енерговитрат пульсаційного апарату з вібруючим ротором [Текст] / К. О. Самойчук, А. О. Івженко // Наукові праці Одеської національної академії харчових виробництв. – 2013. – Вип. 43, Т. 2. – С. 133–137.
24. Samoichuk, K. Research into usage efficiency of the pulsation machine with a vibrating rotor for milk homogenization [Text] / K. Samoichuk, S. Kiurchev, V. Oleksienko, N. Palyanichka, V. Verholantseva // EUREKA: Life Sciences. – 2016. – Vol. 6. – P. 3–10. doi: 10.21303/2504-5695.2016.00236
25. Самойчук, К. О. Определение скорости в модуляторе пульсационного гомогенизатора с вибрирующим ротором [Текст] / К. О. Самойчук, А. О. Івженко // Вестник Могилёвского государственного университета продовольствия. – 2014. – № 1 (16). – С. 87–99.
26. Городецкий, И. Я. Вибрационные массообменные аппараты [Текст] / И. Я. Городецкий, А. А. Васин, В. М. Олевский, П. А. Лупанов. – М.: Химия, 1980. – 189 с.
27. Дейниченко, Г. В. Синхронізація коливальних і обертальних рухів ротора у пульсаційному гомогенізаторі з вібруючим ротором [Текст] / Г. В. Дейниченко, К. О. Самойчук, А. О. Івженко // Вібрації в техніці та технологіях. – 2016. – № 1 (81). – С. 122–131.
28. Нигматулин, Р. И. Динамика многофазных сред. Ч. 1 [Текст] / Р. И. Нигматулин. – М.: Наука, 1987. – 464 с.
29. Самойчук, К. О. Гомогенізація жирової фази молока в пульсаційному апараті з ротором, що вібрує [Текст]: тези доп. IV наук. конф. / К. О. Самойчук, Н. О. Паляничка, В. О. Верхованцева // Фундаментальні та прикладні дослідження у сучасній науці, 2016. – С. 86–87.