

УДК 637.134

МЕХАНІЗМИ ДИСПЕРГУВАННЯ ЖИРОВОЇ ФАЗИ В ПУЛЬСАЦІЙНОМУ АПАРАТІ З ВІБРУЮЧИМ РОТОРОМ

Самойчук К.О., к.т.н.,

Івженко А.О., інженер

Таврійський державний агротехнологічний університет

Тел.(06192) 42-13-06

Анотація – у статті проведено аналіз механізмів диспергування жирової фази в пульсаційному апараті з вібруючим ротором та обґрунтовано оптимальний критерій руйнування жирових кульок молока.

Ключові слова – диспергування, механізм диспергування, жирова кулька, гомогенізатор, роторно-пульсаційний апарат.

Постановка проблеми. Диспергування широко застосовується у виробництві вершкового масла, маргарину, майонезу, кремів, продуктів з біологічно активними добавками та ін. Особливо енерговитратним процесом є диспергування жирової фази молока, або гомогенізація молока. Зважаючи на очевидну актуальність проблеми зниження енерговитрат процесу гомогенізації у молочній промисловості, розроблений широкий ряд апаратів для гомогенізації, такі як клапанні, пульсаційні, вакуумні, струминні, ультразвукові, роторні та ін. Однак жоден з них не суміщає у собі високий ступінь подрібнення жирових кульок молока (як, наприклад, у клапанних) з невисокими енерговитратами [1, 2]. Наближуються до таких "ідеальних" апаратів роторно-пульсаційні гомогенізатори (РПА), ротор яких поряд з обертальним рухом здійснює коливальні рухи вздовж вісі обертання – так звані пульсаційні апарати з вібруючим ротором (ПА з ВР) [3]. Якість гомогенізації при обробці молока в таких машинах не менше, ніж в клапанних, а енерговитрати у 4-5 разів менші.

Аналіз останніх досліджень. На заводі створенню високоефективного гомогенізатора стоїть проблема визначення механізму руйнування жирової кульки молока. Дослідниками процесу диспергування жирової фази виділені щонайменше 5 гіпотез гомогенізації: руйнування під впливом дії повздовжнього градієнта швидкості потоку при вході у клапанну щілину (М.В. Барановського); руйнування під впливом поперечного градієнту швидкості потоку у клапанній щілині (Ребіндера і Віттінга); руйнування за рахунок

відцентрової сили при обертальному русі жирової кульки у градієнтному полі швидкостей (В.Д. Суркова); руйнування здруванням мікрочасток з поверхні жирової кульки (М.М. Орешіної); гіпотеза субкавітаційної гомогенізації (Є.А. Фіалкової). Поява такої кількості теорій викликана неможливістю безпосереднього спостереження за руйнуванням жирової кульки молока, адже швидкості до 200 м/с, та розміри 1-3 мкм ставали для цього нездоланною перешкодою. Лише останніми роками вдалося вперше спостерігати цей процес у клапанному гомогенізаторі. Необхідно відмітити, що автори при створенні тієї чи іншої гіпотези пристосовують її до апарату, який є об'єктом їх досліджень і не намагаються пояснити процеси диспергування жиру в інших, вже існуючих гомогенізаторах. В основі теорії гомогенізації лежить механізм руйнування жирової частки. Дослідниками виділено 10 механізмів подрібнення крапель у рідині.

1) Нестійкість Кельвіна-Гельмгольца [4], виникаюча в результаті достатньої різниці швидкостей між дисперсною та дисперсійною фазами.

2) Нестійкість Релея-Тейлора [4], що виникає при направленні вектора масових або інших сил від важкої рідини до легкої.

3) Дроблення крапель в турбулентному потоці рідини, обумовлене турбулентними пульсаціями [5].

4) Нестійкість Толміна-Шліхтинга, що виникає при переході від ламінарного режиму до турбулентного, коли паралельно-струйна ламінарна течія стає нестійкою внаслідок домінування інерційних сил над силами в'язкого тертя; може мати місце і в гомогенних системах [6].

5) Нестійкість Бенардо, що виникає завдяки флуктуаціям щільності (коли важкі шари рідини опиняються над легкими), викликаним, у свою чергу, градієнтами температур і концентрацій; також може мати місце в гомогенних системах [6].

6) Кавітаційний механізм: при схлопуванні кавітаційної бульбашки внаслідок локального падіння тиску з'являється цівка на поверхні розділу рідин з подальшим відривом від неї однієї чи декількох крапель [6].

7) Динамічний - виникнення внутрішнього динамічного тиску у краплі, обумовленого тороїдальною течією або навіть турбулентним рухом в ній, здатного подолати зовнішній тиск і капілярні сили [7].

8) Дроблення крапель поблизу твердих стінок і інших елементів апарату [7].

9) Наявність зсувних і розтягуючих напружень в суцільному середовищі, здатних значно деформувати краплю – течія Куетта, різні

види гіперболічних течій [6].

10) При нестационарному русі рідин можливий ще один механізм дроблення крапель - інерційний, експериментально та чисельно досліджений Стоуном [8].

Постановка завдання. Спробуємо провести аналіз вищеперелічених механізмів подрібнення жирових кульок у плазмі молока при обробці у пульсаційному апараті з вібруючим ротором і оцінити ступінь їх впливу на кінцевий розмір жирової фази. При цьому будемо розглядати системи без поверхнево-активних речовин. На основі попередніх досліджень приймаємо властивості середовищ (при температурі 65 °С): густина та динамічний коефіцієнти в'язкості плазми молока $\rho_1 = 1030 \text{ кг/м}^3$, $\mu_1 = 1,8 \cdot 10^{-3} \text{ Па}\cdot\text{с}$, густина та динамічний коефіцієнти в'язкості молочного жиру $\rho_2 = 923 \text{ кг/м}^3$, $\mu_2 = 5 \cdot 10^{-3} \text{ Па}\cdot\text{с}$, поверхневий натяг $\sigma = 0,05 \text{ Н/м}$. Властивості апарата: частота повздовжніх пульсацій рідини в апараті 50 с^{-1} , амплітуда коливань ротора $0,005 \text{ м}$, радіальна швидкість в отворах апарата $32\text{-}65 \text{ м/с}$.

Основна частина.

1. Нестійкість Кельвіна-Гельмгольца. Слідуючи Нігматуліну [4], при даному виді нестійкості характерний розмір крапель може бути оцінений як

$$d_1 = \frac{2\pi\sigma(\rho_1 + \rho_2)}{\rho_1\rho_2V^2}, \quad (1)$$

де σ – коефіцієнт міжфазного натягу, Н/м;

ρ_1, ρ_2 – густина рідин, кг/м³;

V – швидкість руху жирової фази рідини відносно поверхні розділу, м/с.

2. Нестійкість Релея-Тейлора. Згідно Нігматуліну [4], оцінка розміру крапель при такому механізмі дроблення може бути проведена за формулою

$$d_a = 2\pi \sqrt{\frac{\sigma}{|\rho_1 - \rho_2| a}}, \quad (2)$$

де a – прискорення, спрямоване нормально до поверхні розділу рідин, м/с².

3. Дроблення крапель у турбулентному потоці рідини. Згідно теорії однорідної та ізотропної турбулентності, розвиненої А.Н. Колмогоровим [5], і критично інтерпретованої В.Г. Левичем [7], дроблення краплі в турбулентному потоці відбувається завдяки пульсаціям, масштаб яких великий у порівнянні з внутрішнім масштабом турбулентності λ_0 . У той же час занадто великомасштабні пульсації порівняно мало змінюються на відстанях порядку розміру

краплі, не чинять впливу на неї, тому деформація і дроблення краплі проводиться порівняно дрібномасштабними пульсаціями. Згідно Колмогорову, радіус краплі який утвориться у турбулентному потоці, приблизно дорівнює

$$R_T = L^{2/5} \left(\frac{\sigma}{k_f \rho} \right)^{3/5} \frac{\sqrt{2}}{U^{6/5}} \quad (3)$$

де L – характерний розмір апарата, м;

k_f – коефіцієнт опору при обтіканні краплі;

ρ – густина рідини (передбачається, що щільності обох рідин близькі), кг/м^3 ;

U – характерна середня швидкість рідини в апараті, м/с;

4. Нестійкість Толміна-Шліхтинга. Очевидно, що при коливальних рухах рідини зазвичай має місце турбулентний несталий режим течії, для якого характерна постійна перебудова потоку, причому в пристінній області поле швидкостей змінюється у часі повільніше, ніж у ядрі. Якщо розглядати сталий процес коливань у пульсаційному апараті, то можна припустити, що енергія, яка вводиться в апарат, витрачається на утворення великомасштабних турбулентних вихорів, які не встигають за один період коливань повністю диспергуватись, розбитися на більш дрібні, так що в середньому за період у пульсаційному апараті зберігається певний спектр турбулентних вихорів. У цьому випадку нестійкість Толміна-Шліхтинга може бути зведена до турбулентності, розглянутої у попередньому пункті.

5. Нестійкість Бенардо в розглянутих умовах виникати не буде, адже при можливому виникненні концентраційних градієнтів навряд чи їх величина буде досить істотною для виникнення значних градієнтів щільності.

6. Кавітаційний механізм. Деякі автори [9, 10, 11] вважають, що при емульгуванні в РПА домінуючими механізмами є кавітація.

У даний час численні дані про кавітаційний механізм дроблення крапель пояснюються кількома гіпотезами. Так, за даними Кардашева [12], при кумулятивному дробленні рідини захоплюється кавітаційна бульбашка, найбільш імовірний діаметр крапель визначається як

$$d_k = \left(\frac{D}{u} \right)^{2/3} \left(\frac{4.5 \pi \sigma}{\rho_1 + \rho_2} \right)^{1/3}, \quad (4)$$

де D – діаметр кумулятивної струї, м;

u – її швидкість, м/с.

Враховуючи складність кавітаційних явищ, величезні значення локальних тисків при схлопуванні бульбашок, а також нерівномірність їх розподілу за об'ємом апарату, на даний момент важко дати навіть якісну оцінку спектру розмірів крапель, що виникають завдяки кавітації.

При перекритті отворів переривника РПА рідина, що рухається в статорі створює розрідження – від'ємний тиск. Глибина від'ємного тиску є одним з найважливіших параметрів РПА, який формує величину кавітації. Саме кавітацію більшість авторів вважають основною причиною диспергування. Тому розрахунок РПА, призначених для диспергування та емульгування, ведуть для досягнення максимальної глибини імпульсу від'ємного тиску. Однак застосування РПА для гомогенізації молока призводить до появи у дисперсійному складі обробленого продукту значної долі часток великої фракції [2]. На нашу думку це пов'язане з тим, що частина молока, що проходить в момент початку відкриття отворів через статор РПА, не піддається дії кавітації. Дійсно, розрідження в каналах статора РПА виникає при перекритті отворів, коли радіальна швидкість емульсії близька до максимуму [9, 10, 11]. При цьому, в момент початку відкриття отворів, частина молока проходить крізь статор РПА практично не піддаючись впливу кавітації. На нашу думку, саме в цих об'ємах молока присутні жирові кульки великої фракції. Звісно, кавітація призводить до подрібнення часток дисперсійної фази, що доведено багатьма дослідниками. Але роль кавітації у диспергуванні молочного жиру в РПА скоріше другорядна. Ерозія сідла та клапана клапанних гомогенізаторів доводить, що кавітація у них присутня, але її міра невелика. За лабораторними дослідженнями Іннігса, якому вдалося спостерігати подрібнення жирових кульок молока в клапанному гомогенізаторі, жирові кульки значно деформуються у клапанній щілині, і руйнуються вже на виході з клапанної щілини. Частина дослідників вважають що кавітація може грати істотну роль лише на цьому – останньому етапі руйнування.

Неможливість якісної оцінки спектру подрібнених часток, невпевненість в тому, що саме кавітація є основною причиною диспергування, існування долі продукту, що проходить крізь отвори переривника РПА і не піддається кавітаційній обробці – основні причини проектування ПА з ВР без урахування кавітації.7. Динамічний механізм дроблення крапель. Левичем була висловлена наступна гіпотеза [7]. Рух суцільної рідини за рахунок безперервності дотичних напружень на поверхні краплі обумовлює рух рідини всередині неї, що має обертальний, а можливо, і турбулентний характер, при цьому у середині краплі виникає динамічний напір $\rho_2 U_2^2 / 2$, спрямований зсередини краплі назовні. Якщо цей тиск

перевищує утримуючі краплю капілярні сили, то крапля повинна розірватися.

У цьому випадку умова дроблення краплі, що має форму еліпсоїда, отримана Левичем у вигляді

$$d_d \approx \sqrt[3]{\frac{6}{k_f} \frac{2\sigma}{(\rho_1^2 \rho_2)^{1/3} U^2}}, \quad (5)$$

При цьому наголошується, що поділ не може відбуватися при стоксовському режимі руху рідини, оскільки при цьому динамічний напір всередині краплі буде занадто малий для того, щоб викликати розподіл краплі.

8. Дроблення крапель поблизу твердих стінок. Поблизу стінки, в межах вузького підшару зміна пульсаційних швидкостей досить різка (великі поперечні градієнти швидкості), і середня швидкість має логарифмічний профіль. Левичем показано, що найменший розмір крапель (у пристінковій області біля кордону в'язкого підшару) може бути оцінений як

$$d_{ct} \approx \sqrt{\frac{\sigma \nu}{6\rho \nu_0^3}} \quad (6)$$

де – ν_0 -динамічна швидкість, визначається як $\nu_0 = \sqrt{\tau / \rho}$, м/с;

τ - дотичні напруження употоці, Па.

Для каналів ПА з ВР можна скористатися формулою

$$\nu_0 \approx \frac{0,2}{R_e^{1/8}} U \quad (7)$$

9. Зсувний механізм емульгування. Гопалом [6] наведені різні форми зсувних течій, деформуючих рідку сферу. В апараті, що розглядається, характер рухів аналогічний гіперболічному течінню, в якому виникає як зсув, так і розтягнення. Тангенціальні складові збурень, переданих з боку суцільного середовища на краплю, деформують її, а нормальні обумовлюють тиск, який для малих деформацій має величину

$$\Delta p = 4G\mu_1 \frac{19\mu_2 + 19\mu_1}{16\mu_2 + 16\mu_1} \cos(2\varphi), \quad (8)$$

де – G – швидкість зсуву, c^{-1} ;

φ - кут між головною віссю витягнутого сфероїда і вертикальною віссю.

Розмір краплі, яка при такому тиску почне деформуватися, дорівнює

$$d_G = \frac{4\sigma}{\Delta P} \quad (9)$$

і для розглянутих даних становить $d_G = 94$ мкм. Настільки мала величина внутрішнього тиску у краплі не в останню чергу зумовлена високою в'язкістю дисперсного середовища μ_2 по відношенню до в'язкості суцільного μ_1 .

10. Інерційний механізм дроблення крапель. У роботі [8] наведені фотографії, що ілюструють процес деформації і дроблення крапель, а також результати чисельних експериментів для нестационарного потоку. Сильно розтягнута в розширеному потоці крапля (що має відношення довжини до діаметра до 10-20) після зупинки (або зміни напрямку чи розширення потоку) дробиться на кілька дрібних крапель. Ефект має місце при умові, якщо в'язкість дисперсної фази не більше, ніж на порядок перевищує в'язкість дисперсної (за даними [8]), яка виконується для молока.

Знаходимо діаметр крапель, утворених при інерційному режимі дроблення [13]

$$d_{и} \approx \frac{8\sigma}{\rho_2 U^2}, \quad (10)$$

Деяка схожість цього виразу з формулою (5) свідчить і про схожості відповідних фізичних механізмів.

Крім наведених вище причин деформації і дроблення крапель, у рідині, що коливається, можуть існувати ще й специфічні механізми, пов'язані з коливаннями самої краплі. Релей отримав вираз для розрахунку власних частот малих коливань рідкої краплі "близько її сферичної фігури рівноваги". За розрахунками таких частот дроблення жирових часток молока можливе лише при частотах більше 500 кГц, що не реалізується у роторно-пульсаційному апараті.

Висновки. Підведемо підсумки аналізу механізмів дроблення крапель, звівши результати розрахунків до таблиці 1.

Таблиця 1 - Результати розрахунку розмірів жирових кульок молока в пульсаційному апараті з вібруючим ротором

Механізм диспергування	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
d, мкм	0,1-10	0,15-6	0,2-2,5	–	–	4,3	3,8	4,3	94	0,12-6,9

Для можливості аналізу застосування наведених механізмів для подрібнення жирової кульки молока, що рухається в оточенні молочної плазми залишимо у формулах 2.1-2.10 лише змінні фактори, вважаючи константами густину, в'язкості, поверхневі натяги та інші постійні. Результати наведено у таблиці 2.

Таблиця 2 - Аналіз істотних факторів дроблення жирової кульки молока

Механізм диспергування	Характер залежності діаметру часток від основних факторів
Нестійкість Кельвіна-Гельмгольца	$d_k \propto \frac{l}{v^2}$
Нестійкість Релея-Тейлора	$d_k \propto \frac{l}{\sqrt{a}}$
Дроблення крапель в турбулентному потоці рідини (по Колмогорову і Левичу)	$d_k \propto \frac{L^{2/5}}{v^{6/5}}$
Динамічний механізм дроблення крапель (по Левичу)	$d_k \propto \frac{l}{v^2}$
Зсувний механізм емульгування (по Гопалу)	$d_k \propto \frac{l}{v}$
Інерційний механізм дроблення крапель	$d_k \propto \frac{l}{v^2}$

З аналізу таблиці стає зрозумілим, чому більшість авторів для оцінки ступеня диспергування молочного жиру використовують критерій Вебера [1, 2]

$$We = \frac{\rho U^2 d_k}{\sigma}, \text{ або } d_k \propto \frac{We}{U^2} \quad (11)$$

За цим критерієм діаметр частки зворотно пропорційний квадрату швидкості, що співпадає з більшістю механізмів диспергування, або близький до них. Також даними таблиці можливо пояснити, чому автори замість швидкості ковзання жирової кульки (різниці швидкостей між жировою кулькою та оточуючою плазмою), використовують швидкість потоку, де рухається жирова кулька [1, 2]. Це простий шлях, але він зовсім не відображає суті явища. Швидкість ковзання розрахувати та оцінити вкрай важко, або неможливо. Дійсно, швидкість потоку може бути наскільки завгодно велика, але якщо жирова кулька рухається разом з дисперсійним середовищем, то її швидкість ковзання дорівнює нулю, та її руйнування не відбувається. Жирова кулька руйнується при різкій зміні потоку, що відбувається у клапанних гомогенізаторах в момент проходження вузької щілини і струминних гомогенізаторах при зіткненні потоків. В такому разі швидкість ковзання жирової частки і буде пропорційною швидкості потоку ($v \propto U$), що експериментально підтверджується дослідями гомогенізації в клапанних та струминних гомогенізаторах [1].

Для ПА з ВР швидкість ковзання стає істотною в моменти прискорення та гальмування рідини. Ці умови створюються під час:

- перекриття отворів та їх незначного відкриття (гомогенізація по типу клапанних гомогенізаторів), коли градієнт швидкості у поперечному напрямку набуває істотної величини;
- швидкої зміни напрямку руху рідини за рахунок сил інерції, що викликає відмінності руху жирової кульки та плазми;
- прискорення потоку рідини при русі крізь канали переривника ПА.

Подрібнення за першою умовою відбувається протягом незначної долі часу пульсацій і енергонеєфективна (високі енерговитрати клапанних гомогенізаторів). Друга та третя умови передбачають створення істотних прискорень емульсії (швидкої зміни швидкості за короткий проміжок часу). Подібний механізм гомогенізації використовується у струминних та пульсаційних гомогенізаторах, енергоефективність яких значно вища (енерговитрати у 3-5 разів менші за клапанні).

Таким чином з перелічених вище механізмів подрібнення жирових кульок в РПА, для ПА з ВР найбільшою мірою за фізикою процесу відповідає нестійкість Релея-Тейлора, де діаметр дисперсійної частки залежить від прискорення потоку рідини.

Література:

1. *Нужин Е.В.* Гомогенизация и гомогенизаторы /Е.В. Нужин, А.К. Гладушняк. Монография – Одесса: Печатный дом, 2007. – 264 с.
2. *Фиалкова Е.А.* Гомогенизация. Новый взгляд: Монография–справочник/ Е.А. Фиалкова – Спб.: ГИОРД, 2006. – 392с.
3. *Самойчук К.О.* Експериментальні дослідження диспергування жирової емульсії в пульсаційному апараті з вібруючим ротором / К.О. Самойчук, А.О. Івженко // Обладнання та технології харчових виробництв : Донецьк – 2013.– Вип. 30. – С. 155-161.
4. *Нигматулин Р.И.* Динамика многофазных сред/Р.И. Нигматулин. Ч. 1. - М.: Наука, 1987. - 464 с.
5. *Колмогоров А.Н.* О дроблении капель в турбулентном потоке/А.Н. Колмогоров // Докл. АН СССР. - 1949. - Т.66, № 5. - С. 825 - 828.
6. *Абрамзон А.А.* Эмульсии / Под ред. Ф. Шермана. Пер. с англ. под ред. А.А. Абрамзона. - Л.: Химия, 1972. - 448 с.
7. *Левич В.Г.* Физико-химическая гидродинамика / В.Г. Левич. - М.: Физматгиз, 1959. - 699 с.
8. *Stone H.A.* Dynamics of drop deformation and breakup in viscous fluids/ H.A. Stone //Annual Review of Fluid Mechanics. -1994. - V.26. - P. 65 -102.

9. Журавлёв В. Высокоэффективные машины роторного типа с развитой кавитацией/ В.Журавлёв, Н.Воронцов, В.Блиничев // *Czasopismo techniczne. Mechanika* :Wydawnictwo politechniki krakowskiej – 2008. - С 422-427.

10. *Промтов М. А.* Машины і апарати з імпульсними енергетичними діями на оброблювані речовини: Навчальний посібник/М.А. Промтов - М.: «Видавництво Машиностроение-1», 2004. - 136 с.

11. *Червяков В.М.* Теоретические основы методов расчета роторных аппаратов с учетом нестационарных гидродинамических течений/В.М. Червяков. автореф. дис. на здобуття наук. ступеня д-ра техн. наук.: 05.02.13 "Машины, агрегаты и процессы "Тамбов, 2007. – 35с.

12. *Кардашев Г.А.* Физические методы интенсификации процессов химической технологии/Г.А. Кардашев. - М.: Химия, 1990. - 206 с.

13. *Абиев Р.* Резонансная аппаратура для процессов в жидкофазных системах: автореф. дис. на здобуття наук. ступеня д-ра техн. наук/Р.Абиев : спец. 05.17.08 “Процессы и аппараты химической технологии” / Абиев Руфат Шовкет оглы ; Санкт-Петербургский государственный технологический институт. – Спб., 2000. – 32 с.

МЕХАНИЗМЫ ДИСПЕРГИРОВАНИЯ ЖИРОВОЙ ФАЗЫ В ПУЛЬСАЦИОННОМ АППАРАТЕ С ВИБРИРУЮЩИМ РОТОРОМ

Самойчук К.О., Ивженко А.А.

Аннотация - в статье проведен анализ механизмов диспергирования жировой фазы в пульсационном аппарате с вибрирующим ротором и обоснован оптимальный критерий разрушения жировых шариков молока.

MECHANISMS OF DISPERGATING OF FATTY PHASE IN PULSATION MACHINE WITH VIBRATING ROTOR

K. Samoichuk, A. Ivzhenko

Summary

The article represents the analysis of phenomena of dispergating of fatty phase in a pulsation machine with a vibrating rotor and the optimal criterion of destruction of fat globules of milk is grounded.