

УДК 637.134

МЕТОДИКА РОЗРАХУНКУ ПУЛЬСАЦІЙНОГО ГОМОГЕНІЗАТОРА З ВІБРУЮЧИМ РОТОРОМ

Самойчук Кирило Олегович к.т.н., доцент

Івженко Андрій Олександрович асистент

Таврійський державний агротехнологічний університет

Samoychuk K.

Ivzhenko A.

Tavria state agrotechnological university

Анотація: у статті описана конструкція і принцип гомогенізації молока у пульсаційному апараті з вібруючим ротором. На основі проведених авторами теоретичних і експериментальних досліджень, розроблена методика розрахунку і проектування пульсаційного гомогенізатора з вібруючим ротором для забезпечення необхідної продуктивності та ступеня диспергування. Наведені рекомендації для вибору оптимальних конструктивно-технологічних параметрів апарата для мінімізації енерговитрат процесу при забезпеченні роботи у резонансному режимі.

Ключові слова: гомогенізація, роторно-пульсаційний апарат, вібруючий ротор, проектування, методика розрахунку.

Постановка проблеми

У сучасних технологічних схемах виробництва молочних продуктів і молока важливою операцією є гомогенізація. Цей процес необхідний для покращення смакових та сенсорних якостей, зменшення розшаровування жирової фази і інших цілей. В даний час актуальність процесу підвищується у зв'язку зі створенням широкого асортименту комбінованих молочних продуктів на основі жирів рослинного походження, в яких необхідно створювати високодисперсні стабільні емульсії.

Аналіз останніх досліджень та публікацій і виділення невирішених завдань

На ринку гомогенізаторів перспективною розробкою, яка здатна вирішити проблему високих енерговитрат процесу гомогенізації є роторно-пульсаційні апарати. В Україні ґрунтовне дослідження таких апаратів проводиться в Інституті технічної теплофізики НАН України під керівництвом А.А. Долинського [1]. Проблемою заміни найбільш розповсюджених – клапанних гомогенізаторів на роторно-пульсаційні апарати є нерівномірність складу молочної емульсії [2]. Для усунення цього недоліку пропонується апарат, в якому ротор здійснює коливання вздовж вісі обертання – пульсаційний апарат з вібруючим ротором (ПА з ВР) [3].

Формулюванні мети дослідження

Авторами статті розроблена теорія, схема і лабораторна установка ПА з ВР, проведені експериментальні дослідження по гомогенізації молока [3 - 5]. Для впровадження у виробництво таких апаратів необхідно розробити методику розрахунку і рекомендації щодо проектування і доцільності заміни наявних на підприємствах клапанних гомогенізаторів на ПА з ВР.

Результати досліджень

ПА з ВР складається з ротора 2 (рис. 1), який обертається з частотою n_p і статора 1. Ротор і статор має отвори d_p і d_c . Для осьових коливань ротора, з частотою n_k застосовується кривошипний механізм 4, а для обертання ротора використаний електродвигун з клинопасовою передачею, що припускає при роботі відхилення на величину коливань, що дорівнює подвійному радіусу кривошипу

r . В середині ротора розміщені радіальні лопаті, призначення яких – створювати відцентровий напір рідини при обертанні ротора.

Молоко подається в центральну частину ротора, що обертається і коливається вздовж вісі з амплітудою до 2-3 мм, де під дією відцентрових сил спрямовується до периферії. Відчини статора і ротора формують переривник пульсаційного апарату. Періодичне відкривання переривника (у момент суміщення отворів ротора і статора) і його закриття формує пульсуючий потік рідини. Осьових рух ротора також створює пульсації емульсії, що обробляється. Доладна взаємодія цих пульсуючих потоків, накладання пульсацій і можливі резонансні ефекти при збігу їх частот, спричиняють ковання жирових кульок молока відносно молочної плазми, і як наслідок, до гомогенізації молока.

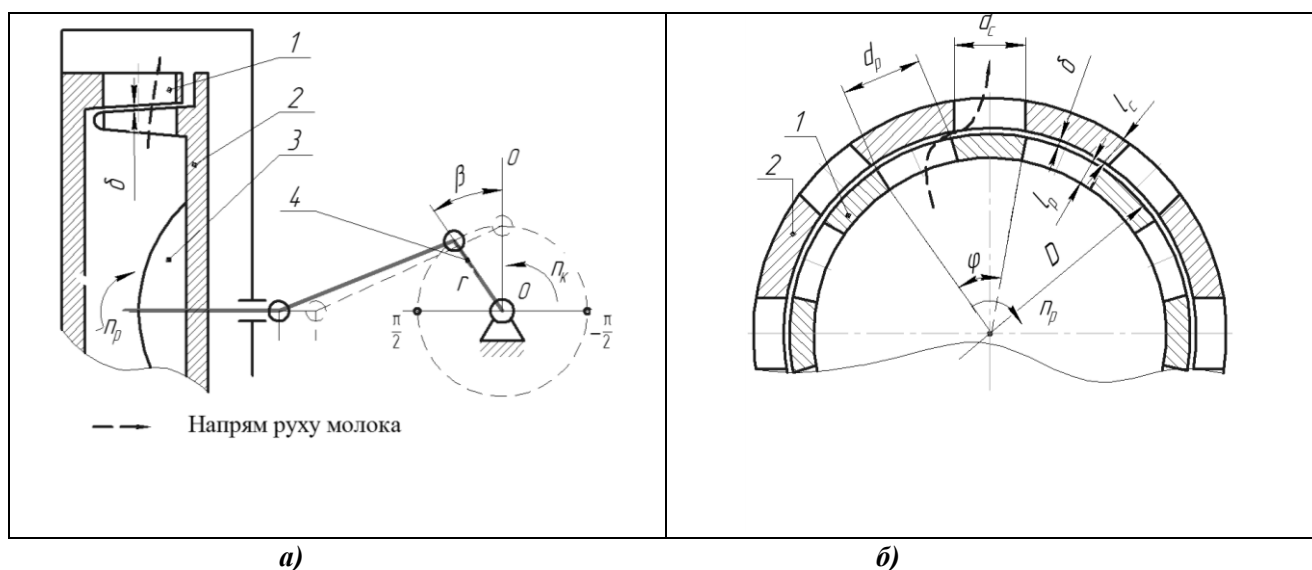


Рис. 1. Схема пульсаційного гомогенізатора з вібруючим ротором: а – вертикальний переріз ротора, б – радіальний переріз. δ – зазор між ротором і статором, l_p – довжина ротора, l_c – довжина статора, D – діаметр ротора, β , φ – кут обертання відповідно кривошипу та ротора

У попередніх дослідженнях визначено, що в ПА з ВР руйнування жирових кульок переважним чином відбувається за механізмом нестійкості Релея-Тейлора, де діаметр дисперсійної частки залежить від прискорення потоку рідини при русі молочної емульсії крізь канали переривника ПА (отвори ротора та статора). Прискорення потоку молока викликає різницю швидкості (ковання) жирової кульки відносно молочної плазми. Інерція жирових кульок відмінна від дисперсійної фази, внаслідок різниці густини. При русі жирової частки відносно молочної плазми виникає сила опору, яка руйнує жирову кульку.

Вихідними даними для розрахунку ПА з ВР для гомогенізації молока є необхідний середній діаметр жирових кульок молока d_k та продуктивність апарату Q_0 . Основним технологічним вихідним параметром є необхідний ступінь диспергування молочного жиру. Максимальну ступінь диспергування мають клапанні гомогенізатори, середній діаметр жирових кульок після обробки в яких складає 0,8 мкм. Такого значення виявляється достатньо для технологічних процесів виробництва молочних продуктів з використанням гомогенізації молока. Тому це значення приймаємо за розрахункове.

Для розробки методики розрахунку ПА з ВР для гомогенізації молока використовували розроблені аналітичні залежності та експериментальні дані, отримані з дослідження

експериментальної установки гомогенізатора [3 - 5].

Частоту обертання кривошипу n_k приймаємо максимально можливою. Зручно приймати n_k рівною максимальній стандартній частоті обертання електродвигунів змінного струму, тобто $n_k = 2880$ об/хв.

У попередніх дослідженнях [5] визначено, що для досягнення виникнення резонансу і максимального ступеня диспергування молочного жиру оптимальна частота обертання ротору повинна бути синхронізована з частотою обертання кривошипу

$$n_p = \frac{n_k}{z}, \quad (1)$$

Крім того кут зсуву фаз між обертанням кривошипу β та ротору φ повинен складати 270° а кількість отворів статора повинна бути рівна кількості отворів ротора z . Діаметри статора і ротора теж повинні бути рівні $d_p = d_c = d$.

Для визначення оптимальних параметрів ПА з ВР введемо фактор, який характеризує збільшення прискорення емульсії (a) на 1 кВт/т питомих енерговитрат процесу гомогенізації (E_{num}) – ефективність гомогенізації E_ϕ

$$E_\phi = \frac{a}{E_{num}}. \quad (2)$$

Прискорення емульсії в отворах переривника апарата пропорційно ступеню гомогенізації. При збільшенні E_ϕ збільшується енергоефективність ПА з ВР. Дослідження показнику E_ϕ показало, що для підвищення ефективності роботи ПА з ВР необхідно збільшувати діаметр ротора, зменшувати радіус кривошипу та кількість отворів переривника. Тому кількість отворів приймаємо рівним $z = 4$, адже при такій кількості отворів ефективність ПА з ВР значно зростає.

Для проектування типових РПА радіальний зазор приймають мінімально можливим для підвищення кавітаційних ефектів і його величина залежить від технічних можливостей виготовлювача. Звичайне значення $\delta = 0,1$ мм [6]. Для ПА з ВР ця умова не обов'язкова, але величина зазору впливає на характер залежності швидкості, викликані відцентровими силами в переривнику ПА, від часу. При зазорах більше 0,5 мм характер зміни цієї швидкості стане істотно відмінним [6], що вплине на умови створення резонансу руху рідини в Па з ВР. Оптимальні умови виникнення резонансу зміняться від зазначених вище, що знизить ефективність роботи апарату, що проектується. Тому величину зазору приймаємо $\delta \leq 0,5$ мм.

Довжину каналів статора та ротора для підвищення ефективності необхідно зменшувати. Граничними умовами для їх величини є міцності характеристики ротора та статора ПА. В існуючих конструкціях типових РПА $l_p \geq 5$ мм, $l_c \geq 8...10$ мм.

Після визначення мінімальних за технологічними та міцносними характеристиками довжини ротора l_p і δ уточнюємо значення довжини статора l_c , виходячи з умови виникнення акустичного резонансу [7]

$$l_c = \frac{60c}{(4k+2)n_k}. \quad (3)$$

$$\delta = \frac{(0,438...0,435)kD}{z}, \quad (4)$$

де c – швидкість звуку в двофазному середовищі, м/с;

$k = 1, 2, 3$ і т.д.

Діаметр ротора визначимо з рівняння [6]

$$D = 0,974 \sqrt[4]{\frac{Q_o z^2 (l_p + \delta + l_c)}{n_p}}, \quad (5)$$

де Q_o – продуктивність ПА з ВР, м³/год.

Радіус кривошипу визначимо з рівняння

$$r = \frac{30z \left(\frac{\pi D}{2z} + 8\delta \right)^2 \left(a - \frac{\pi^3 n_k^2 D^2}{3600z^2 (l_p + \delta + l_c)} \right)}{D^2 n_k^2 \pi^2}. \quad (6)$$

Емпіричним шляхом встановлено, що $d_k = 88 / \sqrt{a}$, тобто при $d_k = 0,8$ мкм $a = 4624 / 0,8 = 1,2 \cdot 10^4$ м/с². З урахуванням цього останнє рівняння набуває вигляду

$$r = \frac{30z \left(\frac{\pi D}{2z} + 8\delta \right)^2 \left(1,2 \cdot 10^4 - \frac{\pi^3 n_k^2 D^2}{3600z^2 (l_p + \delta + l_c)} \right)}{n_k^2 \pi^2 D^2}.$$

Кількість отворів ротора пов'язане з діаметром ротора та діаметром отворів

$$d_p = \frac{\pi D}{2z}. \quad (7)$$

Ширина ротора збільшує енерговитрати ПА з ВР, тому приймаємо якомога менше, використовуючи співвідношення

$$H > d_p. \quad (8)$$

Або, враховуючи (7)

$$H > \frac{\pi D}{2z}. \quad (9)$$

Електродвигуни приводу обертання P_o та вібрації ротора P_g підбираємо за необхідними потужностями, які знаходимо з залежностей [4]

$$P_o = \frac{D^3 n_p^2}{24z} \left(\frac{\rho_m D^3 n_p}{348z(l_p + \delta + l_c)} + \frac{\mu}{\delta} \right). \quad (10)$$

де ρ_m – густина молока, кг/м³

μ – динамічний коефіцієнт в'язкості молока, Па·с.

$$P_{\text{вд}} = 7,2 \cdot 10^{-2} n_k^3 r^2 (m + 0,43 \rho_m z^2 D^2 r). \quad (11)$$

m – маса рухомих частин апарату (ротора і валу), кг.

Для зменшення енерговитрат вібрації ротора масу ротора та рухомих частин приводу необхідно мінімізувати, використовуючи харчові корозійностійкі метали та сплави з якомога меншою щільністю. Для типового діапазону продуктивностей гомогенізаторів розрахуємо основні параметри ПА з ВР і визначимо питомі енерговитрати процесу (таблиця 1).

Аналізуючи значення питомого енергоспоживання бачимо, що з підвищенням продуктивності ця величина значно знижується. Питоме енергоспоживання для клапанних гомогенізаторів становить 7-10 кВт/т, тому заміна таких машин на ПА з ВР з точки зору енергоефективності має сенс при продуктивності більше 2 – 2,5 т/год.

Таблиця 1

Орієнтовні розрахункові дані типорозмірів пульсаційного гомогенізатора з вібруючим ротором

Продуктивність, Q_0 , т/год	Діаметр ротора, м	Радіус кривошипу, мм	Потужність вібрації, Вт	Потужність обертання ротора, Вт	Сумарна потужність, Вт	Питоме енерго- споживання, кВт/т
1	0,13	2,1	1027	11306	12333	12
2,5	0,17	1,8	4015	12523	16538	6,6
5	0,20	1,2	11303	7453	18757	3,7
10	0,24	0,8	31883	4510	36393	3,6

Висновки

Проведені теоретичні та експериментальні дослідження дозволили розробити математичний апарат для розрахунку пульсаційного гомогенізатора з вібруючим ротором. Розроблена методика розрахунку ПА з ВР на задану продуктивність з визначенням основних конструктивних та енергетичних параметрів апарату. Розрахунок для діапазону продуктивностей 1 – 10 т/год показав, що енерговитрати нижче за клапанні у 1,2-2 рази можливо отримати при продуктивності ПА з ВР більше 2 – 2,5 т/год.

Список літератури

1. Долинский А.А. Теплообмен и гидродинамика в паро-жидкостных дисперсных средах. Теплофизические основы дискретно-импульсного ввода энергии / А.А.Долинский, Г.К.Иваницкий – К.: Наук. думка, 2008. — 381 с.
2. Фиалкова Е.А. Гомогенизация. Новый взгляд: монография–справочник / Е. А.Фиалкова. – СПб: ГИОРД, 2006. – 392 с.
3. Самойчук К.О. Визначення резонансних режимів роботи пульсаційного апарату з вібруючим ротором / К.О. Самойчук, А.О. Івженко // Обладнання та технології харчових виробництв : Донецьк – 2013.– Вип. 31. – С. 74-82.
4. Самойчук К.О. Розрахунок енерговитрат пульсаційного апарату з вібруючим ротором / К.О. Самойчук, А.О. Івженко // Наукові праці Одеської національної академії харчових виробництв: Одеса – 2013.– Вип. 43. – Том 2 С. 133-137.
5. Самойчук К.О. Визначення продуктивності пульсаційного апарату з вібруючим ротором / К.О. Самойчук, А.О. Івженко // Наукові праці ОНАХТ: Одеса – 2014. – Вип. 45, Т.3 – С. 25 – 30.
6. Балабышко А.М. Гидромеханическое диспергирование/ А.М. Балабышко, А.И. Зимин, В.П. Ружижский. М: Наука, 1998. - 331 с.
7. Червяков В.М. Теоретические основы методов расчета роторных аппаратов с учетом нестационарных гидродинамических течений: автореф. дис. на здобуття наук. ступеня д-ра техн. наук.: 05.02.13 "Машины, агрегаты и процессы" / Червяков Виктор Михайлович; Тамбовский государственный технический университет. – Тамбов, 2007. – 35с. – Библиогр.: с. 32-35.

References

1. Dolinskiy A.A. Teplomassoobmen i gidrodinamika v paro-zhidkostnykh dispersnykh sredakh. Teplofizicheskie osnovy diskretno-impulsnogo vvoda energii/ A.A.Dolinskiy, G.K.Ivanitskiy – K.: Nauk. dumka, 2008. — 381 s.
2. Fialkova E.A. Gomogenizatsiya. Novyy vzglyad: monografiya–spravochnik / E. A.Fialkova. – SPb: GIORД, 2006. – 392 s.
3. Samoychuk K.O. Vyznachennya rezonansnykh rezhymiv roboty pul'satsiynoho aparata z vibruyuchym rotorom / K.O. Samoychuk, A.O. Ivzhenko // Obladnannya ta tekhnolohiyi kharchovykh vyrobnytstv : Donets'k – 2013.– Vyp. 31. – S. 74-82.
4. Samoychuk K.O. Rozrakhunok enerhovytrat pul'satsiynoho aparata z vibruyuchym rotorom / K.O.

Samoychuk, A.O. Ivzhenko // *Naukovi pratsi Odes'koyi natsional'noyi akademiyi kharchovykh vyrobnytstv: Odesa – 2013.* – Вип. 43. – Том 2 S. 133-137.

5. Samoychuk K.O. *Vyznachennya produktyvnosti pul'satsiynoho aparatu z vibruyuchym rotorom / K.O. Samoychuk, A.O. Ivzhenko // Naukovi pratsi ONAKhT: Odesa – 2014.* – Вип. 45, Т.3 – S. 25 – 30.

6. Balabyishko A.M. *Gidromehanicheskoe dispergirovanie/ A.M. Balabyishko, A.I. Zimin, V.P. Ruzhitskiy. M: Nauka, 1998.* - 331 s.

7. Chervyakov V.M. *Teoreticheskie osnovy metodov rascheta rotornykh apparatov s uchetom nestatsionarnykh gidrodinamicheskikh techeniy: avtoref. dis. na zdobuttya nauk. stupenya d–ra tehn. nauk.: 05.02.13 "Mashiny, agregaty i protsessy "/ Chervyakov Viktor Mihaylovich; Tambovskiy gosudarstvenniy tehnicheskiy universitet .– Tambov, 2007.* – 35s. – Bibliogr.: s. 32-35.

МЕТОДИКА РАСЧЕТА ПУЛЬСАЦИОННОГО ГОМОГЕНИЗАТОРА С ВИБРИРУЮЩИМ РОТОРОМ

Аннотация: в статье описана конструкция и принцип гомогенизации молока в пульсационном аппарате с вибрирующим ротором. На основе проведенных авторами теоретических и экспериментальных исследований, разработана методика расчета и проектирования пульсационного гомогенизатора с вибрирующим ротором для обеспечения необходимой производительности и степени диспергирования. Приведены рекомендации для выбора оптимальных конструктивно-технологических параметров аппарата для минимизации энергозатрат процесса при обеспечении работы в резонансном режиме.

Ключевые слова: гомогенизация, роторно-пульсационный аппарат, вибрирующий ротор, проектирование, методика расчета.

DESIGN PROCEDURE OF THE PULSATION HOMOGENIZER WITH A VIBRATING ROTOR

Summari: the article gives the construction and principle of milk homogenization in a pulsation device with a vibrating rotor. On the basis of theoretical and experimental investigations made by the authors, design procedure and planning of pulsation homogenizer with a vibrating rotor to provide necessary productivity and degree of dispersion has been worked out. Recommendations how to choose optimal design process-dependent parameters of the device to minimize energy consumption of the process in the resonant mode are given.

Keywords: homogenization, rotor-pulsation device, vibrating rotor, planning, design procedure.