

УДК 637.134

АНАЛІЗ СИЛ, ЩО ДІЮТЬ НА ЖИРОВУ КУЛЬКУ ПІД ЧАС ГОМОГЕНІЗАЦІЇ

Самойчук К.О., к.т.н.,

Паляничка Н.О., аспірант*

Таврійський державний агротехнологічний університет

Тел.(06192) 42-13-06

Анотація – проаналізовані сили, що діють на жирову кульку під час гомогенізації в протитечійно-струменевому гомогенізаторі і винайдене рівняння руху жирової кульки.

Ключові слова – гомогенізація, жирова кулька, сили, молоко.

Постановка проблеми. Одним з найбільш енергоємних операцій в лініях виробництва молочних продуктів є гомогенізація. З 60-х р.р. минулого століття конструкція типового клапанного – найбільш ефективного гомогенізатора майже не змінилася. Основною причиною відсутності високоефективного обладнання для гомогенізації з низькими енерговитратами є відсутність єдиної теорії гомогенізації, що пояснюється труднощами безпосереднього спостереження процесу дроблення жирових кульок внаслідок мікроскопічних розмірів жирових часток та високих швидкостей їх руху.

Аналіз останніх досліджень. Узагальнення результатів досліджень гомогенізаторів з найвищим ступенем подрібнення жирової фази – клапанних і пульсаційних, дало підстави стверджувати, що визначальна роль в цьому процесі належить різниці швидкості між жировою кулькою та оточуючою плазмою [1]. З точки зору потенціалу збільшення цих швидкостей проаналізовано існуючі конструктивні рішення апаратів для гомогенізації і найбільш перспективними визнано пристрої для протитечійно-струменевої гомогенізації. Теоретичне і експериментальне обґрунтування параметрів таких пристроїв практично відсутнє. Тому необхідно проаналізувати сили, що діють на жирову кульку під час гомогенізації в протитечійно-струменевому гомогенізаторі для розробки моделі процесу.

Основна частина. При русі молока, яке являє собою дисперсійну фазу (плазма) та дисперсну фазу (жирові кульки), виникають умови, коли швидкість жирової кульки v_k відрізняється від швидкості оточуючої її дисперсійної фази v_l . Між ними виникає різниця швидкостей $\vec{u} = \vec{v}_l - \vec{v}_k$. Розглянемо рух потоку плазми молока і визначимо сили, що діють на жирову кульку, яка знаходиться у цьому потоці для випадку коли швидкість жирової частки v_k більше швидкості потоку v (рис. 1) [2, 3]. Радіус кривизни лінії току несучої фази, на якій розташований центр ваги частки позначимо R . Рівняння руху жирової кульки представимо таким чином [2, 3]

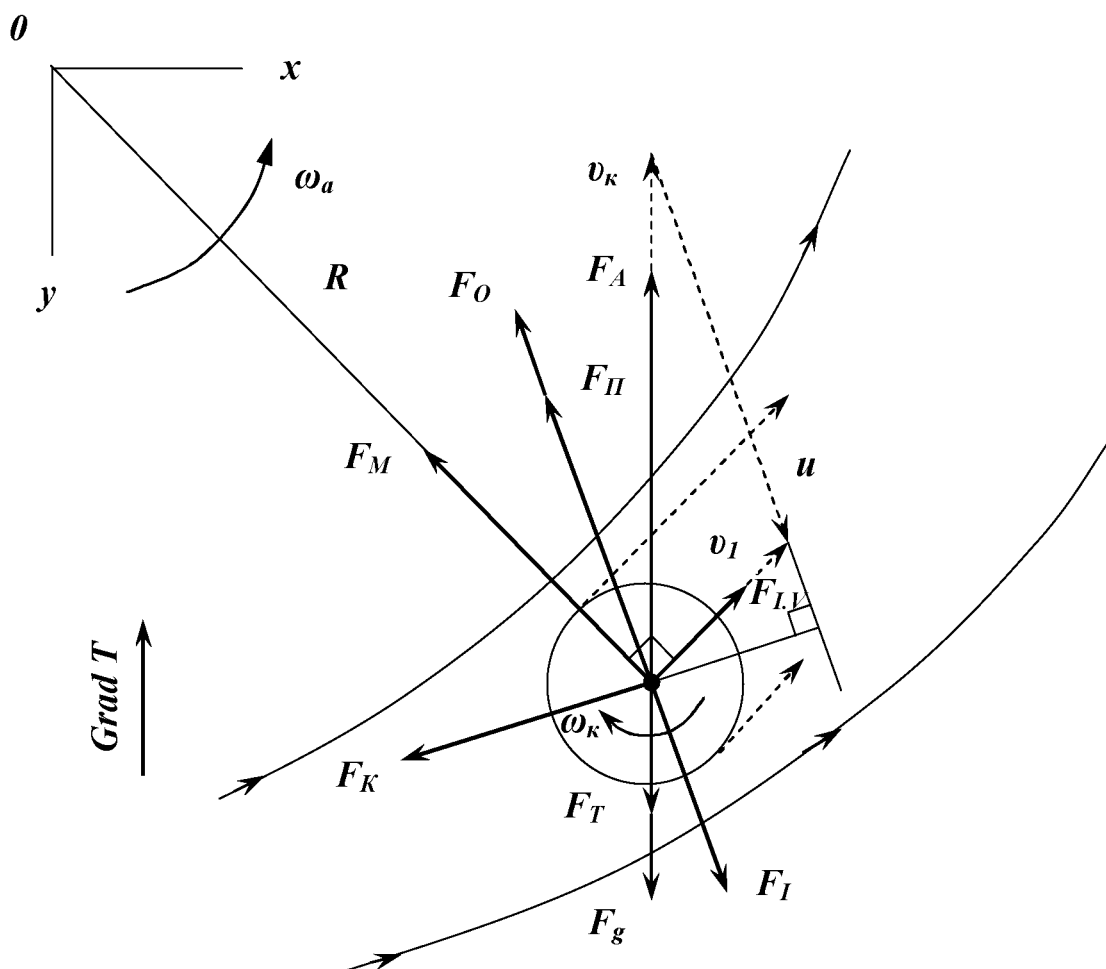


Рис. 1. Схема сил, що діють на жирову кульку

$$m \frac{d\vec{v}}{dt} = \vec{F}_O + \vec{F}_M + \vec{F}_K + \vec{F}_I + \vec{F}_g + \vec{F}_A + \vec{F}_{II} + \vec{F}_T, \quad (1)$$

де m – маса жирової кульки, кг;

\vec{v} – вектор швидкості руху частки, м/с;

\vec{F}_O – сила опору жирової частки, Н;

\vec{F}_M – сила Магнуса, Н;

\vec{F}_K – сила Коріоліса, Н;

\vec{F}_I – сила інерції, Н;

\vec{F}_g – сила ваги жирової частки, Н;

\vec{F}_A – сила Архімеда, Н;

\vec{F}_D – сила, потрібна для розгону приєднаної маси частки, Н;

\vec{F}_T – сила термофореза, Н.

Сила опору руху \vec{F}_O завжди спрямована в сторону, протилежну вектору швидкості відносного руху жирової частки [3]

$$\vec{F}_O = -\frac{1}{2} \rho_{nl} S_m C_x (v - v_K) |v - v_K|, \quad (2)$$

де ρ_{nl} – густина плазми, кг/м³;

S_m – площа міделієвого перерізу частки, м²;

C_x – коефіцієнт опору.

Коефіцієнт опору – величина змінна, що залежить від числа Рейнольдса, Re для частки

$$Re = \frac{\rho_{nl} |v - v_K| d_K}{\mu_{nl}}, \quad (3)$$

де d_K – діаметр частки жиру, м;

μ_{nl} – коефіцієнт динамічної в'язкості плазми, Па·с.

$$C_x = C_x^* C_{x0}, \quad (4)$$

де C_x^* – коефіцієнт, що враховує внутрішньокапельний циркуляційний рух;

C_{x0} – коефіцієнт опору частки – твердого аналога.

Зазвичай використовується емпірична формула

$$C_{x0} = \frac{c_f}{\sqrt{Re}}. \quad (5)$$

де c_f – емпіричний коефіцієнт, що залежить від числа Рейнольдса.

Вплив внутрішньокапельного циркуляційного руху на опір частки характеризується постійною Чао [3]

$$Ch = (2 + 3 \frac{\mu_{жс}}{\mu_{nl}}) / (1 + \sqrt{\frac{\mu_{жс} \rho_{жс}}{\mu_{nl} \rho_{nl}}}), \quad (6)$$

де $\mu_{жк}$ – коефіцієнт динамічної в'язкості жиру, Па·с;

$\rho_{жк}$ – густина молочного жиру, кг/м³.

В реальному потоці (з нерівномірним розподілом полів швидкості плинину) частка може здійснювати обертальний рух відносно власного центра мас. В цьому випадку на частку діє сила Магнуса, що спрямована під прямим кутом до напрямку руху частки

$$F_M = \frac{1}{8} \pi^2 d_k^3 \rho_{жк} (v - v_k) \omega_k, \quad (7)$$

де ω_k – кутова швидкість обертання жирової кульки, рад/с.

$$\omega_k = \omega_a \left[1 - \exp\left(\frac{-60 \mu_{жк} t}{d_k^2 \rho_{жк}}\right) \right], \quad (8)$$

де ω_a – кутова швидкість обертання потоку плазми відносно центру кривизни лінії плинину, рад/с.

З аналізу останнього рівняння можна зробити висновок про те, що кутова швидкість обертання частки мало відрізняється від кутової швидкості потоку в тому ж місці при відсутності частки [3].

Сила Коріоліса діє перпендикулярно вектору відносної швидкості потоку і її напрямок залежить від співвідношення швидкостей частки та плазми

$$F_K = -2m\omega_a(v - v_k). \quad (9)$$

Сила інерції \vec{F}_I складається з сил інерції, що обумовлені реакцією частки на зміну швидкості плазми: $\vec{F}_{I,V}$ і тангенціальної сили інерції $\vec{F}_{I,T}$

$$F_{I,V} = m \frac{d(v - v_k)}{dt}. \quad (10)$$

$$F_{I,T} = -2m\omega_a v. \quad (11)$$

$$F_I = m \frac{d(v - v_k)}{dt} - 2m\omega_a v. \quad (12)$$

$$F_g = -mg. \quad (13)$$

Викривлення течії при обтіканні частки приводить до появи сили, необхідної для прискорення приєднаної маси

$$F_{II} = \zeta m \frac{d(v - v_k)}{dt}, \quad (14)$$

де ζ – коефіцієнт приєднаної маси.

Для часток, розмірами менше 2...10 мкм помітного впливу набувають сили термофорезу, що переміщують частку в бік менших

значень температури в нерівномірно нагрітому потоці

$$F_T = -\frac{4,5\pi\mu_{nl}^2 d_k}{\rho_{nl} T} \left(\frac{\lambda}{2\lambda + \lambda_T} \right) grad T, \quad (15)$$

де T – температура частки;

λ – довжина вільного пробігу часток плазми, м;

λ_T – відношення вільного пробігу часток плазми до радіусу жирової частки.

Внутрішньокапельний циркуляційний рух істотно впливає на краплю малов'язкої рідини [3] і для жирової кульки є малою величиною внаслідок великого значення в'язкості молочного жиру.

Для випадку зіткнення струменів отримані поля швидкостей потоків у зоні їх співударяння [4]. Визначено, що безпосередньо перед лінією розділу потоків величина швидкості знижується в центрі струменя і на краях, причому величина зниження становить до 15%. Тому окружна швидкість потоку і жирової кульки є малою величиною. Відповідно до цього нехтуємо силами Коріоліса, Магнуса і тангенціальною силою інерції.

Сила ваги повністю скомпенсована Архімедовою силою.

Сила термофореzu внаслідок невеликого градієнту температур по перерізу потоку струменів [4, 3] також є малою величиною.

Таким чином істотний впливу на жирову кульку мають сили опору, інерції, ваги і приєднаної маси

$$m \frac{d\vec{v}}{dt} = -\frac{1}{2} \rho_{nl} S_m C_x (v - v_K) |v - v_K| + m \frac{d(v - v_K)}{dt} + \zeta m \frac{d(v - v_K)}{dt}. \quad (16)$$

Висновки. Основна відмінність отриманого рівняння від відомих раніше полягає в істотному впливі сили прискорення приєднаної маси. Коефіцієнт ζ набуває значення від 0,5 для недеформованої частки до 10 для диску, що рухається перпендикулярно до своєї площини. Отже загальна сила, що діє на частку жиру, буде істотно більше за ті, що розраховані базуючись лише на силі опору.

Література

1. *Самойчук К.О.* Обґрунтування параметрів та режимів роботи протитечійно-струменевого гомогенізатора молока: автореф. дис. на получ. науч. звання канд. техн. наук : спец. 05.18.12 "Процеси та обладнання харчових, мікробіологічних і фармацевтичних

- виробництв " / К.О. Самойчук. – Донецьк, 2008. – 20 с.
2. *Дейч М.Е.* Газодинамика двухфазных сред/ М.Е. Дейч, Г.А. Филиппов. – 2-е изд., перераб. и доп. – М.: Энергоиздат, 1981. – 472 с.
3. Теверовский Е.Н. Перенос аэрозольных частиц турбулентными потоками/ Е.Н. Теверовский. Е.С. Дмитриев – М.: Энергоатомиздат, 1988. – 160 с.
4. Процессы переноса во встречных струях / Эльперин И.Т., Мельцер В.Л., Павловский Л.Л., Енякин Ю.П. – Минск: Наука и техника, 1972. – 216 с.

АНАЛІЗ СИЛ, ВОЗДЕЙСТВУЮЩИХ НА ЖИРОВОЙ ШАРИК ПРИ ГОМОГЕНИЗАЦИИ МОЛОКА

Самойчук К.О.

Аннотация – проанализированы силы, которые действуют на жировой шарик в процессе гомогенизации молока в противоточно-струйном гомогенизаторе и выведено уравнение движения жирового шарика.

ANALYSIS OF FORCES THAT INFLUENCE FAT GLOBULE DURING THE OPPOSITE-FLOW STREAM HOMOGENIZATION OF MILK

K. Samoichuk

Summary

The forces that influence fat globule during homogenization of milk in the opposite-flow stream homogenizator are analyzed and the equation of motion of the fat globule is grounded