

Дейниченко Г. В.

*Харківський державний
університет
харчування та торгівлі*

Самойчук К. О.

Левченко Л. В.

*Таврійський державний
агротехнологічний
університет*

Deinychenko G. V.

*Kharkiv State University
of Food Technology and
Trade*

Samoichuk K. O.

Levchenko L. V.

*Tavria State
Agrotechnological
University*

УДК 637.134

ЕФЕКТИВНІСТЬ ГОМОГЕНІЗАЦІЇ МОЛОКА У ПУЛЬСАЦІЙНОМУ ГОМОГЕНІЗАТОРІ

Для знаходження оптимальних параметрів пульсаційного гомогенізатора молока введено показник ефективності гомогенізації, який враховує дисперсність емульсії після обробки та питомі енерговитрати процесу. На основі аналітичних залежностей, отриманих для визначення середніх розмірів дисперсної фази молочної емульсії та потужності пульсаційного гомогенізатора проведені теоретичні дослідження показника ефективності гомогенізації. Вони дали змогу визначити раціональні конструктивно-кінематичні та технологічні фактори пульсаційного апарата: частоту та амплітуду коливань поршня, його масо-розмірні показники і коефіцієнт живого перетину отворів поршня та продуктивність гомогенізатора для підвищення ступеня диспергування та зниження витрат енергії. Побудовані графіки залежності показника ефективності гомогенізації від коефіцієнта живого перетину поршня, частоти та амплітуди коливань поршня. Надані рекомендації для ефективного підвищення ступеня дисперсності молочної емульсії при мінімальному зростанні витрат енергії на процес пульсаційної гомогенізації.

Ключові слова: гомогенізація, пульсаційний апарат, вібрація, диспергування, молочна емульсія, ефективність, показники, режими.

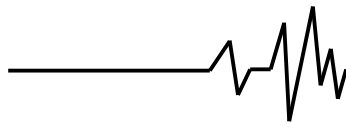
Постановка проблеми. Однією з найбільш енерговитратних операцій молочної промисловості є приготування гомогенних емульсій з високим ступенем дисперсності (менше 1 мкм) [1]. Проблема зниження енергоємності машин і апаратів для гомогенізації до теперішнього часу не набула комплексного вирішення, про що свідчить значне розповсюдження найбільш енергоємних – клапанних гомогенізаторів в технологічних лініях переробки молока та виробництва молочних продуктів [2].

Одним з методів інтенсифікації диспергування молочної емульсії є застосування коливальних рухів гетерогенного середовища. Основна перевага цього методу – в рівномірній дисипації потужності на межі розділу фаз: між жировими кульками та оточуючою плазмою молока. Якщо розглянути дисипацію потужності в клапанному або роторно-пульсаційних гомогенізаторах, 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, що призводить до неефективності використання енергії. Оскільки увесь об'єм молочної емульсії в апараті піддається дії вібрації, то дисипація буде відбуватися 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 [3].

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Переваги застосування вібрації та коливальних рухів емульсії для підвищення ефективності гомогенізації з успіхом використовуються у пульсаційних гомогенізаторах. В таких апаратах поєднується висока енергоефективність (менше 4 кДж/т) та дисперсні показники, що перевищують показники клапанних машин (середній розмір часток 0,5–0,8 мкм) [4; 5].

Пульсаційний гомогенізатор являє собою поршень 1 (рис. 1) із наскрізними отворами 3, який здійснює коливальні рухи в камері вздовж її осі за рахунок кривошипного механізму. Молоко подається в патрубок 2 і під час проходження крізь отвори поршня 3, за рахунок



прискорення і появи швидкості ковзання, жирові кульки молока подрібнюються відповідно до

критерію Вебера. Відводиться емульсія після гомогенізації через патрубок 5.

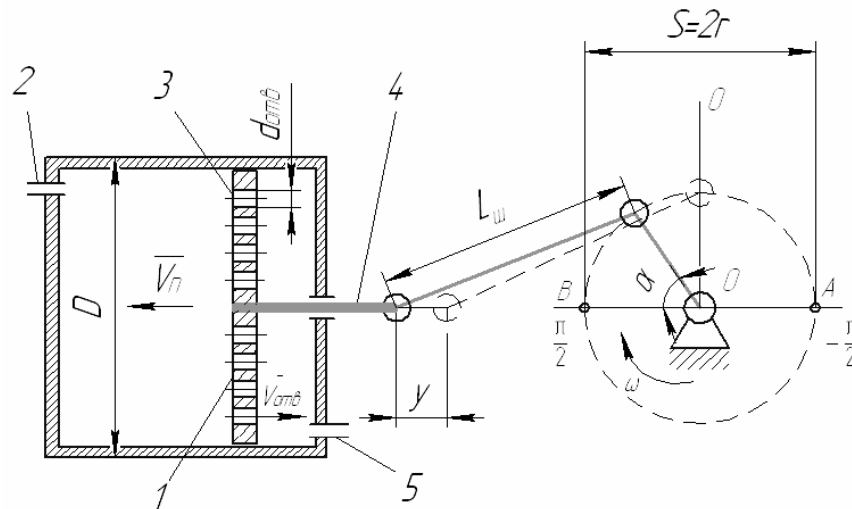


Рис. 1. Схема пульсаційного гомогенізатора: 1 – поршень; 2 – патрубок для відведення емульсії; 3 – отвори поршня; 4 – регульований кривошип; 5 – патрубок подачі емульсії; V_n – швидкість поршня; $V_{отв}$ – швидкість емульсії в отворах поршня; $d_{отв}$ – діаметр отворів; D – діаметр камери; $L_{ш}$ – довжина шатуна; r – радіус кривошипа; α – кут повороту кривошипа

У результаті аналітичних досліджень визначено рівняння для розрахунку миттєвих складових потужності, яка споживається в процесі роботи пульсаційного гомогенізатора молока та визначена сумарна потужність його приводу. Отримані залежності пов'язують основні конструктивні й кінематичні параметри гомогенізатора: частоти та амплітуди руху поршня, діаметр поршня та отворів у ньому, розмірів та маси поршня.

Знайдені аналітичні залежності, що пов'язують швидкість та прискорення емульсії в отворах поршня пульсаційного гомогенізатора з основними його конструктивно-кінематичними параметрами: діаметром поршня, амплітудою та частотою його коливання, кількістю і діаметром отворів у поршні. Ступінь диспергування пропорційне прискоренню емульсії у отворах поршня. Тому для підвищення ступеня диспергування, необхідно зменшувати площу живого перетину отворів поршня і підвищувати частоту та амплітуду його коливання.

За критерієм Вебера ступінь диспергування жирової фази пропорційна швидкості ковзання жирової кульки. Але швидкість руху емульсії не визначає швидкість ковзання жирової кульки. Ковзання підвищується при різких змінах швидкості, тобто при появі прискорення емульсії. Прискорення руху емульсії в отворах поршня дорівнює

$$a_o = \frac{4\pi^2 n^2 r}{K_o} \cos \alpha . \quad (1)$$

де n – частота обертання кривошипу, c^{-1} ;
 K_o – коефіцієнт живого перетину отворів поршня, $K_o \approx 0,3 \dots 0,7$.

$$K_o = \frac{F_o}{F_n} , \quad (2)$$

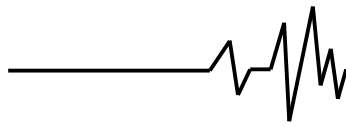
де F_n – площа поршня, m^2 ,
 F_o – площа отворів, m^2 .

Розрахункова потужність для вибору електродвигуна приводу пульсаційного гомогенізатора буде визначатися з такого виразу.

$$P_g = 1,33\pi^4 h_n \rho_n D^2 n^3 r^2 + 0,8\pi^4 C \rho_m D^2 n^3 r^3 + \frac{0,43}{K_o} \rho_m \pi^3 D^2 r^2 n^2 , \quad (3)$$

де h_n – товщина поршня, м;
 ρ_n – щільність матеріалу поршня, kg/m^3 ;
 ρ_m – густина молока, kg/m^3 ;
 C – коефіцієнт лобового опору руху диску в рідині.

За результатами досліджень пульсаційного гомогенізатора з вібруючим



ротором експериментально встановлено зв'язок між прискоренням емульсії молока та середнім діаметром жирової кульки d [6]

$$d = \frac{68}{\sqrt{a_0}}. \quad (4)$$

Формули (1) і (4) визначають зв'язок між конструктивно-кінематичними параметрами пульсаційного гомогенізатора та основним технологічним показником його роботи – дисперсністю молочної емульсії після обробки.

Виділення невирішених раніше частин загальної проблеми.

При дослідженні нового обладнання однією з основних задач є знаходження таких режимних, конструктивних, кінематичних та технологічних параметрів його роботи, при яких енерговитрати мінімальні, а продуктивність та якість обробки – максимальні. Отримані залежності (1-4) пов'язують основні показники та характеристики роботи пульсаційного гомогенізатора при обробці молочної емульсії, але не визнають оптимальних (раціональних) параметрів його роботи.

Мета дослідження: аналітично визначити найбільш ефективні режимні, конструктивно-кінематичні та технологічні параметри пульсаційного гомогенізатора молока.

Основні результати дослідження.

Для досягнення поставленої мети введемо показник ефективності гомогенізації

$$E_{\Gamma} = \frac{I}{dE_{num}}. \quad (5)$$

де E_{num} – питомі енерговитрати гомогенізатора, Дж/кг.

$$E_{num} = \frac{P_{\epsilon}}{Q}, \quad (6)$$

де Q – продуктивність гомогенізатора, кг/с.

E_{Γ} повинен прямувати до максимуму, але з урахуванням технологічних вимог до дисперсності емульсії після гомогенізації. Для молока найвища ступінь дисперсності – після обробки в клапанних гомогенізаторах, де $d=0,8...1,2$ мкм [2]. Таким чином для максимізації ефективності гомогенізації

необхідно виконання вимог

$$E_{\Gamma} \rightarrow \max (\text{при } d < 1 \text{ мкм}). \quad (7)$$

З урахуванням (6) формула (5) набуває вигляду

$$E_{\Gamma} = \frac{Q}{dP_{\epsilon}}. \quad (8)$$

Продуктивність пульсаційного гомогенізатора практично не залежить від його конструктивно-кінематичних параметрів та визначається подачею в нього продукта насосом або машиною, розташованою в технологічній лінії до пульсаційного гомогенізатора.

Для можливості використання показника E_{Γ} необхідно з формули (1) виключити перемінну α . Усереднене значення прискорення в отворах поршня a_0^c при $\alpha=60^\circ$, тому

$$a_0^c = \frac{2\pi^2}{K_0} n^2 r. \quad (9)$$

При підвищенні подачі емульсії (продуктивності гомогенізатора) знижується кратність обробки K (кількість проходжень емульсії крізь отвори поршня), що призводить до зменшення ступеня диспергування жирової фази.

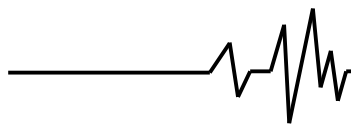
$$Q = \frac{I}{K} \sim d. \quad (10)$$

Досліди впливу кратності проходження емульсії крізь головку клапанного гомогенізатора проводились в роботі [2]. Вплив кратності залежить від тиску клапанної гомогенізації (аналог прискоренню у пульсаційній гомогенізації), і зменшується з його підвищенням. При підвищенні кратності на одиницю розміри жирових кульок зменшуються приблизно на 6%, тобто вираз (8) уточнимо до такого вигляду

$$E_{\Gamma} = \frac{0,94Q}{dP_{\epsilon}}. \quad (11)$$

З урахуванням останнього виразу, та формул (3), (4), (9) і після необхідних перетворень ефективність гомогенізації визначиться як

$$E_{\Gamma} = \frac{0,94Q\pi n \sqrt{\frac{2}{K_0}} r}{68D^2 \left(1,33\pi^4 h_n \rho_n n^3 r^2 + 0,8\pi^4 C \rho_m n^3 r^3 + \frac{0,43}{K_0} \rho_m \pi^3 r^2 n^2 \right)}. \quad (12)$$



При підвищенні продуктивності гомогенізатора ефективність гомогенізації лінійно підвищується. Вплив діаметра поршня, щільності матеріалу та товщини поршня також

очевидний з наведеної вище формули. Графічно залежність ефективності гомогенізації від коефіцієнту живого перетину надана на рис. 2.

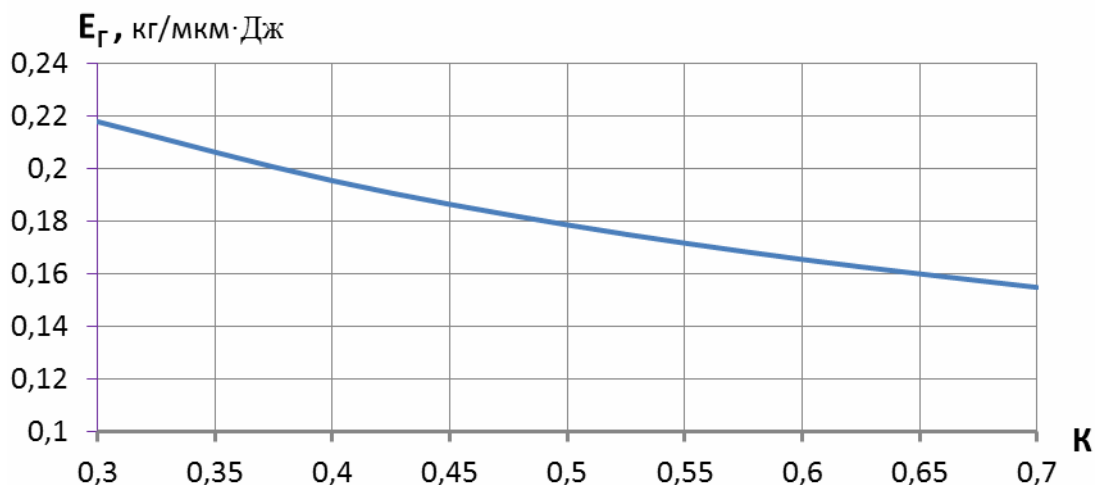


Рис. 2. Залежність ефективності гомогенізації від коефіцієнту живого перерізу поршня

При збільшенні коефіцієнту живого перетину K ефективність гомогенізації зменшується. Це відбувається завдяки підвищенню швидкості в отворах поршня, внаслідок зменшення загальної площі отворів. Тому при проектуванні пульсаційного гомогенізатора необхідно зменшувати коефіцієнт живого перетину площі поршня. Слід зауважити, що при зменшенні K буде зростати коефіцієнт лобового опору руху поршня і, як наслідок, зменшуватись коефіцієнт ефективності, що не враховано у формулах (3) і

(12), тому експериментальна залежність $E_r=f(K)$ буде зменшуватись не так інтенсивно, яка це показує теоретична залежність на рис. 2.

При збільшенні частоти та амплітуди пульсації поршня відбувається збільшення прискорення емульсії (9), що призводить до зростання ефективності гомогенізації (4) та підвищення потужності, необхідної для роботи гомогенізатора (3). Але потужність зростає більш інтенсивно, що призводить до зменшення ефективності гомогенізації (рис. 3).

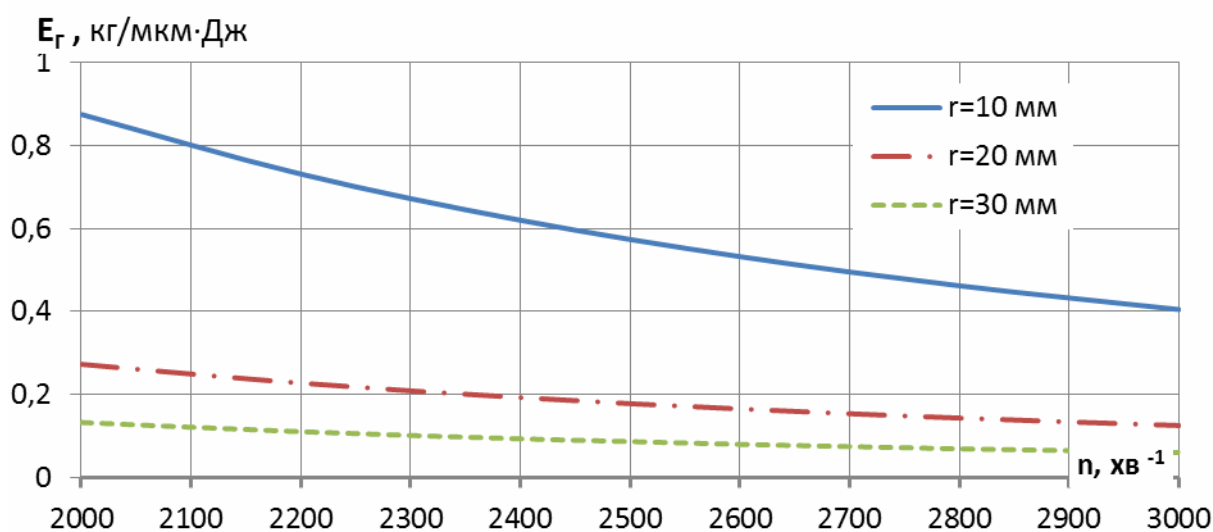
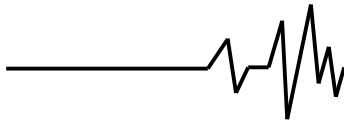


Рис. 3. Залежність ефективності гомогенізації від частоти пульсації та радіусу кривошипу



При збільшенні радіусу кривошипу E_T зменшується більш інтенсивно, ніж при підвищення частоти пульсацій поршня. Тому збільшення ступеня дисперсності пульсаційного гомогенізатора більш ефективно здійснювати підвищенням частоти коливання поршня.

Висновки. Для визначення оптимальних режимних, конструктивно-кінематичні та технологічних параметрів пульсаційного гомогенізатора молока введено показник ефективності гомогенізації, який враховує дисперсність отриманої в результаті гомогенізації емульсії та питомі енерговитрати на процес. Дослідження цього показника дало змогу визначити, що:

– для підвищення ефективності роботи пульсаційного гомогенізатора необхідно збільшувати його продуктивність та зменшувати коефіцієнт живого перетину поршня а також діаметр, щільність матеріалу, товщину поршня та частоту й амплітуду пульсації;

– збільшення ступеня дисперсності пульсаційного гомогенізатора більш ефективно здійснювати підвищенням частоти коливання поршня ніж збільшенням амплітуди його коливання.

Отримані в результаті дослідження дані необхідні для проектування лабораторного та експериментальних зразків установки пульсаційного гомогенізатора молока та вибору діапазону варіювання факторів для проведення експериментальних досліджень гомогенізації.

Список використаних джерел

1. Фиалкова Е.А. Гомогенизация. Новый взгляд: Монография–справочник/ Е.А. Фиалкова – Спб.: ГИОРД, 2006. – 392с.
2. Нужин Е.В. Гомогенизация и гомогенизаторы /Е.В. Нужин, А.К. Гладушняк. Монография – Одесса: Печатный дом, 2007. – 264 с.
3. Абиев Р. Резонансная аппаратура для процессов в жидкофазных системах: автореф. дис. на здобуття наук. ступеня д-ра техн. наук : спец. 05.17.08 “Процессы и аппараты химической технологии” / Абиев Руфат Шовкет оглы ; Санкт-Петербургский государственный технологический институт. – Спб., 2000. – 32 с.
4. Орешина М. Н. Импульсное диспергирование многокомпонентных пищевых систем и его аппаратная реализация: автореф. дис... д-ра техн. наук: 05.18.12 / Н. М. Орешина. – М., 2010. – 50 с.
5. Паляничка Н.О. Вдосконалення процесу імпульсної гомогенізації молока:

автореф. канд... техн. наук: 05.18.12 / Н.О. Паляничка. – Мелітополь, 2013. – 20 с.

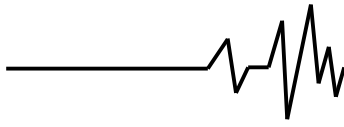
6. Самойчук К.О. Ефективність гомогенізації молока в пульсаційному апараті з вібруючим ротором/К.О. Самойчук, А.О. Івженко// Вісник Харківського національного технічного університету сільського господарства імені Петра Василенка: Харків – 2015. – Вип. 166.– С. 98 – 104.

Список джерел в транслітерації

1. Fialkova E.A. Gomogenizatsiya. Novyyi vzglyad: Monografiya–spravochnik/ E.A. Fialkova – Spb.: GIORД, 2006. – 392s.
2. Nuzhin E.V. Gomogenizatsiya i gomogenizatoryi /E.V. Nuzhin, A.K. Gladushnyak. Monografiya – Odessa: Pechatnyiy dom, 2007. – 264 s.
3. Abiev R. Rezonansnaya apparatura dlya processov v zhidkofaznyh sistemah: avtoref. dis. na zdotutya nauk. stupenya d-ra tekhn. nauk : spec. 05.17.08 “Processy i apparaty himicheskoy tekhnologii” / Abiev Rufat SHovket ogly ; Sankt-Peterburgskij gosudarstvennyj tekhnologicheskij institut. – Spb., 2000. – 32 s
4. Oreshina M. N. Impul'snoe dispergирование mnogokomponentnyh pishchevyh sistem i ego apparatnaya realizaciya: avtoref. dis... d-ra tekhn. nauk: 05.18.12 / N. M. Oreshina. – M., 2010. – 50 s.
5. Palyanychka N.O. Vdoskonalennya protsesu impul'snoyi homohenizatsiyi moloka: avtoref. kand... tekhn. nauk: 05.18.12 / N.O. Palyanychka. – Melitopol', 2013. – 20 s.
6. Samoychuk K.O. Efektyvnist' homohenizatsiyi moloka v pul'satsiyynomu aparati z vibruyuchym rotorom/К.О. Samoychuk, А.О. Ivzhenko// Visnyk Kharkivs'koho natsional'noho tekhnichnoho universytetu sil's'koho hospodarstva imeni Petra Vasylenka: Kharkiv – 2015. – Vyp. 166.– S. 98 – 104.

ЭФФЕКТИВНОСТЬ ГОМОГЕНИЗАЦИИ МОЛОКА В ПУЛЬСАЦИОННОМ ГОМОГЕНИЗАТОРЕ

Аннотація. Для определения оптимальных параметров пульсационного гомогенизатора молока введен показатель эффективности гомогенизации, который учитывает дисперсность эмульсии после обработки и удельные энергозатраты процесса. На основе аналитических зависимостей, полученных для определения средних размеров дисперсной фазы молочной эмульсии и мощности пульсационного гомогенизатора проведены теоретические исследования показателя эффективности



гомогенизації. Они дали возможность определить рациональные конструктивно-кинематические и технологические факторы пульсационного аппарата: частоту и амплитуду колебаний поршня, его массоразмерные показатели и коэффициент живого сечения отверстий поршня и производительность гомогенизатора для повышения степени диспергирования и снижения расходов энергии. Построены графики зависимостей показателя эффективности гомогенизации от коэффициента живого сечения и частоты и амплитуды колебаний поршня. Предоставлены рекомендации для эффективного повышения степени дисперсности молочной эмульсии при минимальном росте расходов энергии на процесс пульсационной гомогенизации.

Ключевые слова: гомогенизация, пульсационный аппарат, вибрация, диспергирование, молочная эмульсия, эффективность, показатели, режимы.

HOMOGENIZATION EFFICIENCY OF MILK IN PULSATION HOMOGENIZER

Annotation. To determine the optimal parameters of pulsation homogenizer of milk the

index of efficiency of homogenization was introduced, which takes into account dispersion emulsions after processing and specific energy consumption of the process. Theoretical researches of homogenization efficiency index are conducted on the basis of analytical dependences, got for determination of the average sizes of dispersible phase of milk emulsion and power of pulsation homogenizer. They enabled to define the rational structural-kinematic and technological factors of the pulsation machine: frequency and amplitude of the piston vibrations, its mass-dimensional indexes and coefficient of the flow section of the piston openings and productivity of the homogenizer to increase the degree of dispersion and decrease the energy consumption. The diagrams are made to show the dependences of the homogenization efficiency index on the coefficient of flow section and frequency and amplitude of piston vibrations. We recommend how to increase effectively milk emulsion dispersion degree at the minimum increase of energy consumption on the pulsation homogenization process.

Key words: homogenization, pulsation machine, vibration, dispersion, milk emulsion, efficiency, indexes, modes.