

ПІДВИЩЕННЯ ЕФЕКТИВНОСТІ СТРУМИННОГО ГОМОГЕНІЗАТОРУ МОЛОКА З РОЗДІЛЬНОЮ ПОДАЧЕЮ ВЕРШКІВ

Самойчук К.О., канд.техн.наук., доцент, Ковальов О.О., інженер.
Таврійський державний агротехнологічний університет, м. Мелітополь

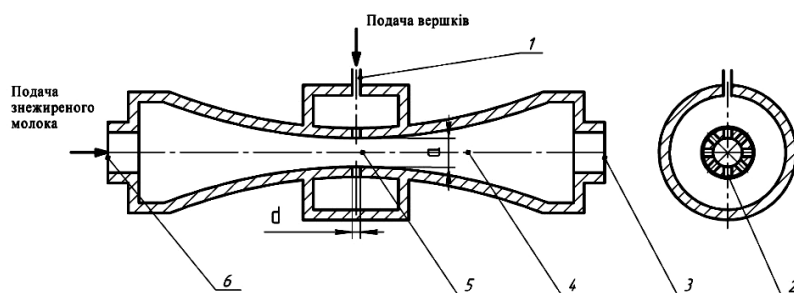
У статті на основі теоретичних досліджень процесу струминної гомогенізації молока з роздільною подачею вершків визначені шляхи підвищення ефективності пристрою. Наведені та проаналізовані математичні залежності процесу струминної гомогенізації молока з метою підвищення ефективності диспергування при зниженні енергетичних витрат процесу.

The ways to increase the device efficiency are defined in the article on the basis of theoretical research of the jet-mixing homogenization of milk with separated feeding of cream. Mathematical dependences of the jet-mixing homogenization of milk are represented and analyzed for the purpose to increase dispersion efficiency while reducing energy expenses of the process.

Ключові слова: ефективність гомогенізації, струминна гомогенізація, роздільна гомогенізація, диспергування, аналіз.

Постановка проблеми в загальному вигляді. В сучасних економічних умовах підприємства з переробки харчової продукції України часто працюють на межі рентабельності. Для забезпечення конкурентної здатності виробникам необхідно вирішувати проблеми забезпечення якості продукції при максимальному зниженні енергетичних витрат. Одним з процесів переробки молока, що має високі енергетичні витрати є гомогенізація. Гомогенізація являє собою операцію з диспергування та рівномірного розподілу жирової фази в плазмі знежиреного молока, яка сприяє підвищенню якісно-смакових властивостей продукту. Незважаючи на більш ніж сторічну практику застосування гомогенізації, в промисловості найчастіше використовують клапанні машини, властивими рисами яких є високий ступінь диспергування при високих енергетичних витратах процесу. Дослідники гомогенізації до теперішнього часу не можуть достовірно пояснити загальні теоретичні основи процесу, враховуючи високі швидкості процесу та мікроскопічні розміри жирових кульок. Зараз існують біля 7 гіпотез гомогенізації та близько 12 різних за принципом дії конструкцій гомогенізаторів [1]. Значна частина дослідників процесу вважає, що головною причиною руйнування жирових кульок при гомогенізації є різниця швидкостей дисперсійної (знежирене молоко) та дисперсної (вершки) фаз продукту.

Одним з можливих шляхів підвищення ефективності процесу гомогенізації є використання роздільної гомогенізації молока. Роздільна гомогенізація молочних продуктів дозволяє регулювати вміст жиру в продукті, знижує небажаний вплив на молочний білок уникаючи процесів дестабілізації білкової фази при виробництві питного молока. Продуктивність при цьому зростає до 2 – 3 разів а енергетичні витрати знижуються на 50 – 70 % за рахунок зниження об'єму продукту, що гомогенізується [2]. Враховуючи ці принципи нами було запропоновано схему пристрою для струминної гомогенізації молока з роздільним подаванням вершків [3] (рис. 1).



1 – патрубок подачі вершків; 2 – канал подавання жирової фази; 3 – патрубок для відведення гомогенованого молока; 4 – центральний канал; 5 – зона диспергування жирової фази; 6 – патрубок подачі знежиреного молока.

Рис. 1 – Схема струминного гомогенізатора молока з роздільною подачею вершків

Принцип дії пристрою полягає в створенні високої швидкості молочного жиру відносно знежиреного молока при подачі вершків тонким струменем в швидкісний потік знежиреного молока. При цьому створюються умови для високоефективного диспергування молочного жиру. В запропонованій конструкції знежирене молоко через патрубок подачі знежиреного молока 6 подається до центрального каналу гомогенізатору 4, де в центральній частині виконане звуження діаметром a , призначене для підвищення швидкості. Вершки (жирова фаза) через патрубок 1 крізь тонкий канал (або декілька каналів) 2 діаметром d подається в центральну зону де, за рахунок високого градієнту швидкостей, відбувається подрібнення часток жиру. Гомогенізоване молоко відводиться через патрубок 3.

Недоліком конструкції є необхідність попередньої сепарації молока, однак на практиці у молокозаводах більшість об'єму молока після приймання сепаруються для виділення вершків.

Постановка завдання. Для впровадження струминного гомогенізатора з роздільною подачею жирової фази у виробництво необхідна розробка математичної моделі гомогенізації, що дозволить розробити максимально ефективну його конструкцію. Внаслідок достатності ступеня гомогенізації, що досягається в клапанних машинах будь-якій сучасній технологічній схемі виробництва молочних продуктів, під ефективністю будемо розуміти головним чином зниження енерговитрат процесу гомогенізації.

Виклад основного матеріалу дослідження. Згідно проведених раніше аналітичних досліджень, процес гомогенізації у апараті що розглядається, відбувається наступним чином. При досягненні числа Рейнольдса більше 2300 встановлюється режим розвиненої турбулентності, в нашому випадку $Re=11500 - 25700$. Турбулентні пульсації емульсії викликають виникнення в ній дотичних напружень, які пов'язані з критерієм руйнування Вебера та при досягненні певної величини відбувається руйнування краплі жиру (жирової кульки) [4]. Механізм диспергування полягає в тому, що лобові сили сплющують краплю, інші витягують її з боків та в передній частині та утворюють дископодібне тіло, що згодом руйнується [5].

Згідно аналізу сил, що діють в процесі гомогенізації на жирову кульку визначними силами є сили приєднаної маси, турбофорезу, сили інерції та сили опору [6]. Сили в'язкості, що перешкоджають подрібненню часток жиру частково нівелюються силами інерції, що збільшуються при зростанні числа Рейнольдса та поширенні збудження. Однак, для більш ефективного подрібнення треба зменшити сили в'язкості до мінімально можливих значень, що досягається правильно вибраним температурним режимом – максимальному підвищенні температури процесу, яку лімітують небажані органолептичні зміни молока.

При подачі вершків в зону локалізації максимальної швидкості, жирова кулька проходить три етапи: рух біля стінки центрального каналу, рух до вісі центрального каналу і подальший рух в оточенні плазми молока. Максимальна швидкість ковзання (різниця між швидкістю жирової кульки та оточуючою фазою молока), яка необхідна для руйнування за критерієм Вебера, виникає на перших двох етапах. На третьому етапі подрібненні жирові частки поступово вирівнюють свою швидкість зі швидкістю оточуючого потоку. Отже, для досягнення ефективного подрібнення жирових кульок треба прагнути до максимальних значень швидкості на другому етапі, для забезпечення максимальної різниці швидкостей фаз продукту.

Ньютон стверджував, що при русі шарів рідини між ними виникають дотичні напруження, які є пропорційними до градієнту зміни швидкості du/dy та зростають від стінки каналу до місця локалізації максимальної різниці швидкостей фаз [7]. Великі значення цих напружень, згідно теорії гідродинаміки можуть виникати або у стінки де створюються великі градієнти швидкостей, але проходить незначна кількість продукту або поблизу зони контакту двох потоків рідини, що мають істотну різницю швидкостей.

Величину дотичних напружень можна приблизно розрахувати за формулами

$$\tau = \mu \frac{du}{dy}, \quad (1)$$

$$\tau \approx \mu_{пл} v_{пл} \sqrt{\frac{\rho_{пл} v}{\mu_{пл} l}}, \quad (2)$$

де $\mu_{пл}$ – динамічна в'язкість плазми молока Па·с;

$v_{пл}$ – кінематична в'язкість плазми молока, Стокс;

$\rho_{пл}$ – густина плазми молока кг/м³;

v – середня швидкість знежиреного молока, м/с;

l – відстань від стінки каналу, м.

Дотичні напруження при діаметрі звуження центрального каналу $a=1...3$ мм та середній швидкості у каналі подачі 40 м/с складають відповідно $(0,8...2,6) \cdot 10^{-4}$ Па, тобто при збільшенні діаметру звуження центрального каналу дотичні напруження, що спричиняють руйнування жирових кульок, зменшуються.

Цей висновок підтверджує результати комп'ютерного моделювання руху рідини в камері струминного гомогенізатора молока з роздільною подачею вершків, згідно якої при $a=3\text{ мм}$ відбувається зменшення площі зони локалізації максимальної різниці швидкостей фаз, тому ефективність подрібнення знижується.

Розглядаючи рух частки жиру в потоці знежиреного молока необхідно зупинитись на шляху змішування, терміні, що позначає відстань яку проходить частка в потоці до тієї миті коли її швидкість зрівняється зі швидкістю оточуючого середовища. Довжина шляху змішування визначається згідно емпіричної залежності запропонованої Прандтлем [8].

$$l_m = ky, \quad (3)$$

де k – універсальний коефіцієнт пропорційності, що не залежить від числа Рейнольдса $k \approx 0,39$;

y – відстань від стінки каналу, м.

Отже, для відстані $a=1\dots 3\text{ мм}$ шлях змішування складатиме $0,39 - 1,17\text{ мм}$, що складає при $a=1\text{ мм}$ весь шлях до місця подрібнення, а при збільшенні відстані до 3 мм – лише третину, що ще раз свідчить про необхідність забезпечення мінімальної відстані в центрі звуження центрального каналу. При зменшенні діаметру звуження центрального каналу, враховуючи умову нерозривності потоку, швидкість у точці введення жирової фази збільшується, що закономірно збільшує критерій Вебера та ступінь гомогенізації.

Діапазон критичних значень критерію Вебера (We) має істотні відмінності, так як для руйнування у потоці рідини його значення буде більшим внаслідок включення в потік сусідніх шарів рідини. Дані щодо цього критерію різняться за дослідженнями різних вчених на два порядки. Найближчим за механізмом гомогенізації до дослідної є протитечіно-струминна гомогенізація, для якої експериментально підтверджені значення We знаходяться в межах $40 - 120$. Ці значення критерію Вебера достатні для досягнення режиму за критичних деформацій з витяганням у купол, потім в тонкі стрічки [9, 10].

$$We = \frac{\rho_{пл} u^2 d_{max}}{\sigma_{ж-п}}, \quad (4)$$

де $\rho_{пл}$ – густина плазми молока, кг/м^3 ;

u – швидкість жирової кульки відносно швидкості потоку молока (швидкість ковзання) м/с ;

d_{max} – максимальний діаметр жирової кульки стабільної в даних гідродинамічних умовах, м;

$\sigma_{ж-п}$ – поверхневий натяг жирової кульки в оточенні плазми.

Відносна швидкість жирової кульки визначається з умови нерозривності потоку з урахуванням того, що при подаванні жирової фази перпендикулярно потоку знежиреного молока різниці швидкостей знежиреного молока в місці найбільшого звуження v_2 та жирової кульки $v_{ж}$ остання складова перетворюється на нуль. Отже, можна записати відносну швидкість як $u = v_2$.

Тоді швидкість в місці найбільшого звуження центрального каналу визначається як

$$v_2 = \frac{S_1 v_1}{S_2}. \quad (5)$$

Швидкість знежиреного молока в соплі подавання молока обчислюється за формулою [5]

$$v_1 = \varphi \sqrt{\frac{2}{\rho_m} \Delta p_1}. \quad (6)$$

Відносна швидкість з урахуванням (5) та (6) визначається як

$$u = \frac{d_1}{a} \varphi \sqrt{\frac{2}{\rho_m} \Delta p_1}, \quad (7)$$

де d_1 – діаметр сопла подавання знежиреного молока, м;

Δp_1 – надлишковий тиск подачі знежиреного молока, МПа;

φ – коефіцієнт швидкості, що залежить від конструкції сопла подавання знежиреного молока.

З виразу (4), враховуючи, що середній діаметр жирової кульки після гомогенізації пов'язаний з d_{max} [11], отримаємо

$$d_k = 0,75 \frac{We \cdot \sigma_{ж-п}}{\rho_{пл} u^2}. \quad (8)$$

Зменшення діаметру жирових кульок можливе шляхом зниження поверхневого натягу рідин, що суттєво впливатиме на якість процесу.

Необхідно дослідити вплив We на середній діаметр часток після гомогенізації d_k . При $d_1/a=2$, коефіцієнту поверхневого натягу $\sigma_{ж-п}=0,024$ Н/м, коефіцієнту швидкості $\psi=0,8$ та надлишковому тиску подавання знежиреного молока 3 – 9 МПа отримуємо наступні залежності (рис.2).

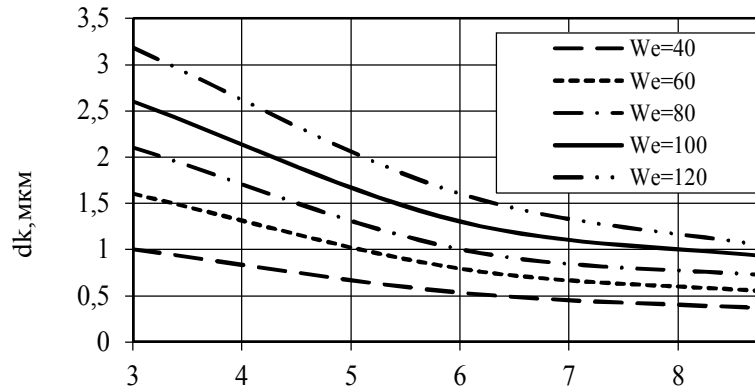


Рис. 2 – Графік залежності діаметру часток жирової фази d_k від надлишкового тиску гомогенізатору Δp_1 та критерію Вебера We

Аналіз рисунку 2 показує, що при невеликих значеннях $We=40$ висока якість гомогенізації (1,0 мкм) досягається при $\Delta p_1=3$ МПа. При 6 МПа та $We=60$ досягається подрібнення до рівня кланних (0,8 мкм), але обумовлюється більшими значеннями енергетичних витрат на створення більшого надлишкового тиску знежиреного молока. При збільшенні числа Вебера до 100 – 120 ступінь дисперсності жирової фази недостатня при значеннях надлишкових тисків до 7 – 8 МПа. З іншого боку при цих значеннях критерію подрібнення, якість диспергування на рівні кланних гомогенізаторів досягається при витратах енергії на одну третину більших, порівняно з $We=40$ та $\Delta p_1=3$ МПа, що видно з подальшого аналізу енергетичних витрат гомогенізації. Отже, раціональними для використання за умови забезпечення високої якості гомогенізації та мінімальних енергетичних витрат слід визнати діапазон чисел Вебера 40 – 80.

З формули (7) видно, що суттєво впливає на процес гомогенізації надлишковий тиск подачі знежиреного молока, тому треба розглянути можливості зниження його величини. Надлишковий тиск в каналі подавання знежиреного молока визначається як [12].

$$\Delta p_1 = \frac{\sigma We}{2\varphi^2 d_0} \quad (9)$$

де d_0 – середній діаметр жирової кульки до гомогенізації, для практичних розрахунків приймаємо $d_0 = 3 \cdot 10^{-6}$ м.

Знизити надлишковий тиск, як бачимо з формули (9) можна також підбором раціональних значень коефіцієнту швидкості ψ та зниженням коефіцієнту поверхневого натягу.

Діаметр каналу подавання вершків розраховують за формулою

$$d_b = \sqrt{\frac{Q_r (J_{н.с} - J_{зн})}{900\pi\mu_2\rho_b (J_b - J_{н.с})}} \sqrt{\frac{\rho_b}{2\Delta p_2}} \quad (10)$$

де ρ_b – густина вершків, кг/м³;

Δp_2 – тиск подавання жирової фази, МПа;

μ_2 – коефіцієнт витрат каналу подачі жирової фази.

З попередніх аналітичних досліджень процесу струминної гомогенізації молока відомо [9], що для забезпечення якісних характеристик продукту необхідно використовувати мінімально можливі діаметри каналу подавання вершків при збільшенні тиску подавання жирової фази. При збільшенні діаметру каналу подавання вершків за однакової продуктивності буде необхідний більший тиск гомогенізації та зростати енергетичні витрати. Тому, єдиною можливістю впливати на зниження енерговитрат при подачі вершків є збільшення коефіцієнту витрат каналу подавання.

Суттєво впливає на енергетичні витрати процесу діаметр звуження центрального каналу, який обчислюється за формулою

$$a = \sqrt{\frac{Q_r (J_b - J_{n,c})}{900 \mu_1 \pi \rho_{пл} (J_b - J_{zn})}} \sqrt{\frac{\rho_{пл}}{2 \Delta p_1}} \quad (11)$$

де μ_1 – коефіцієнт витрат каналу подавання знежиреного молока.

Значення надлишкового тиску знежиреного молока регламентується умовою створення критичного значення числа Вебера. Отже, зменшення діаметру звуження центрального каналу досягається збільшенням коефіцієнту витрат насадку каналу подавання знежиреного молока. Вплив діаметру звуження центрального каналу на показники якості гомогенізації планується дослідити в подальших експериментальних дослідженнях.

Питомі енергетичні витрати процесу гомогенізації визначаються як

$$E_{\text{пит}} = \frac{\sigma We}{2 \varphi^2 d_{\kappa p_m}} + \frac{8}{\rho_b} \left(\frac{Q_r (J_{n,c} - J_{zn})}{(J_b - J_{n,c}) 3600 \mu_2 \pi d_b^2} \right)^2 \quad (12)$$

де ρ_m – густина молока, кг/м³.

Питомі витрати гомогенізатора молока залежать від значення надлишкового тиску подавання знежиреного молока, але при зниженні цього показнику буде зменшуватись і ступінь диспергування. Зниження питомих витрат енергії процесу при незмінній якості процесу можна досягти зниженням коефіцієнту поверхневого натягу на границі розділу вершки-плазма, або вибрати оптимальний температурний режим операції. Згідно досліджень процесу зазвичай температурний режим гомогенізації знаходиться у межах 55 – 63°C. Підвищення температури до 60 – 65°C суттєво знижує поверхневий натяг, що добре впливає на покращення подрібнення жирових кульок. Зниження питомих витрат енергії гомогенізації можна також досягти підвищенням коефіцієнту швидкості ц шляхом зміни форми патрубку подавання знежиреного молока. Наступним фактором, який буде впливатиме на $E_{\text{пит}}$ є збільшення коефіцієнту витрат каналу подавання жирової фази m_2 . Останнім шляхом зниження витрат енергії процесу є збільшення діаметру каналу подавання вершків d_b , однак для забезпечення якісного подрібнення цей показник має прагнути до мінімальних технологічно можливих значень [9]. Вплив діаметру каналу подавання вершків на показники якості гомогенізації планується дослідити в подальшому.

В гідравліці насадками звуть отвори, розміри яких дорівнює їх діаметру або перевищують його, або форма каналу суттєво впливає на форму струменю, що протікає по ньому. До найбільш відомих типів насадків відносять такі: зовнішні циліндричні ($\mu=0,82$; $m=0,82$), внутрішні циліндричні ($\mu=0,71$; $m=0,71$), конічні, що розходяться з кутом конусності (12 – 15) ($\mu=0,96$; $m=0,94$), та коноїдальні насадки з ($\mu=0,97$; $m=0,97$) [5]. Найбільш високі значення коефіцієнтів швидкості та витрат забезпечують останні два види насадків, які використовуються де необхідно отримувати великі швидкості витікання та високе значення імпульсу струменю.

Дані щодо енергетичних витрат процесу гомогенізації для продуктивності 1000 кг/год для критерію Вебера, що відповідає тиску подавання знежиреного молока при змінних діаметрах каналу подачі вершків та різних типах насадків наведені в табл.1.

Таблиця 1 – Енергетичні витрати гомогенізації

Критерій Вебера, We	Тиск подачі знежиреного молока, Δp_1 , МПа	Питомі енерговитрати, $E_{\text{пит}}$, кВт/т			
		Діаметр каналу подачі вершків, d_b , мм		Тип насадку подачі знежиреного молока	
		0,5	0,8	конічний, що розходиться	коноїдальний
50	3	1,34	1,31	0,92	0,9
80	6	2,08	2,04	1,43	1,4
130	9	3,38	3,34	2,33	2,27

З табл.1 видно, що при збільшенні діаметру отвору подавання вершків d_b з 0,5 до 0,8мм енергетичні витрати процесу згідно проведених теоретичних досліджень будуть майже дорівнювати одне одному, з чого можна зробити висновок, що цей показник не має суттєвого впливу на показники енерговитрат гомогенізації. Але при більших значеннях d_b жирові частки будуть зазнавати меншого впливу потоку та мати менший ступінь дисперсності. Отже, головним показником при виборі значень діаметру каналу подавання вершків необхідно виходити з забезпечення якісного подрібнення продукту.

При застосуванні насадків конічного, що розходиться з кутом конусності $12 - 15^\circ$ та коноїдального енергетичні витрати процесу диспергування знижуються майже на третину (див. табл. 1). Отже, застосування насадків обраних конструкцій, за рахунок зміни форми струменю та більш повного використання простору каналу подавання суттєво знижує енергетичні витрати гомогенізації.

Висновки та перспективи подальших досліджень. Основними факторами підвищення ефективності процесу струминної гомогенізації молока з роздільним подаванням вершків є: підбір раціональних параметрів насадків для каналів подавання знежиреного молока та вершків, підтримання оптимального діапазону значень критерію Вебера, забезпечення мінімально можливих значень діаметру центрального каналу та каналу подавання вершків і зниження поверхневого натягу на межі розділу фаз, завдяки оптимізації температурного режиму процесу.

Для мінімізації енерговитрат при якості гомогенізації на рівні класичних аналітично визначений діапазон значень критерію Вебера – $We=40 - 80$. Визначення шляху змішування, який проходять жирові частки в потоці знежиреного молока, приводять до висновку, що діаметр звуження центрального каналу у місці локалізації максимальної різниці швидкостей фаз повинен складати 1мм та менше, виходячи з умови забезпечення високої якості продукту. Застосування коноїдального насадку для каналів подавання вершків та знежиреного молока в конструкції знизить енергетичні витрати до 30%. Збільшення діаметру каналу подавання вершків погіршує якість гомогенізації, тому його оптимальне значення становить 0,5мм та менше в межах технологічно виконуваних значень.

В подальшому, після експериментального уточнення конструктивно-технологічних параметрів струминного гомогенізатора з роздільним подаванням жирової фази, планується впровадження його у виробництво для гомогенізації молока з одночасною нормалізацією по жиру.

Література

1. Фиалкова Е.А. Гомогенизация. Новый взгляд: Монография-справочник / Е.А.Фиалкова – Спб.: ГИОРД, 2006. – 392с
2. Шалыгина А. М. Общая технология молока и молочных продуктов/ А. М. Шалыгина, Л. В. Калинина. - М.: Колос, 2006. - 199 с.
3. Самойчук К.О. Розробка лабораторного зразка струминного гомогенізатору з роздільною подачею вершків/ К.О.Самойчук, О.О.Ковальов. Праці ТДАТУ – Мелітополь: 2011 – 77-84с.
4. Абрамович Г.Н. Теория турбулентных струй/Г.Н. Абрамович. – Эколит - М: 2011 – 728с.
5. Пажи Д.Г Основы техники распыливания жидкости/Д.Г.Пажи. В.С.Галустов. Химия – М: 1984 – 256с.
6. Самойчук К.О. Аналіз сил дроблення жирових кульок в струминному гомогенізаторі /К .О. Самойчук, О.О. Ковальов // Наукові праці Південного філіалу Національного університету біоресурсів і природокористування України "Кримський агротехнологічний університет" (ПФ НУБіП України "КАТУ") : Сімферополь – 2013. – Вип.153. – С. 26-34.
7. Веремеев С.А. Взаимодействие импульсной затопленной струи жидкости с преградой / С.А. Веремеев, А.Н. Семко // Прикладна гідромеханіка. – 2008. – Т. 10, № 1. – С. 3 – 9.
8. Шлихтинг Г. Теория пограничного слоя / Г. Шлихтинг. – М.: Наука, 1974. – 712 с.
9. Самойчук К.О. Якість та енергетична ефективність процесу струминної гомогенізації молока з роздільною подачею вершків /К.О.Самойчук, О.О.Ковальов, В.О.Султанова // Праці ТДАТУ – Мелітополь: 2015. – Вип15. – Том1.С 241 – 249.
10. Бойко В.М.Динамика частиц и капель в потоке за ударной волной /В.М. Бойко//Известия РАН .МЖГ. 2007.- № 3.-С.110-120.
11. Самойчук К.О. Обґрунтування параметрів та режимів роботи протитечіно - струменевого диспергатора молока: автореф дис. ... канд. техн. наук : 05.18.12 // – Донецьк, 2008. – 20с.
12. Самойчук К.О. Обґрунтування гідродинамічних параметрів процесу струминної гомогенізації молока з роздільною подачею вершків / К.О. Самойчук , О.О. Ковальов // Наукові праці ОНАХТ: Одеса – 2014. – Вип. 46, Т.2 – С. 314 – 319.