

ТАВРІЙСЬКИЙ ДЕРЖАВНИЙ АГРОТЕХНОЛОГІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ
МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ

ХАРКІВСЬКИЙ ДЕРЖАВНИЙ УНІВЕРСИТЕТ ХАРЧУВАННЯ ТА ТОРГІВЛІ
МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ

Кваліфікаційна наукова праця
на правах рукопису

САМОЙЧУК КИРИЛО ОЛЕГОВИЧ

УДК 637.134

ДИСЕРТАЦІЯ

**«РОЗВИТОК НАУКОВИХ ОСНОВ ГІДРОДИНАМІЧНОГО
ДИСПЕРГУВАННЯ МОЛОЧНИХ ЕМУЛЬСІЙ»**

Спеціальність 05.18.12 – процеси та обладнання харчових, мікробіологічних
та фармацевтичних виробництв

Технічні науки

Подається на здобуття наукового
ступеня доктора технічних наук

Дисертація містить результати власних досліджень. Використання ідей,
результатів і текстів інших авторів мають посилання на відповідне джерело



К.О. Самойчук

Науковий консультант:

Дейниченко Григорій Вікторович,
доктор технічних наук, професор,
заслужений діяч науки і техніки України



Мелітополь – Харків – 2018

АНОТАЦІЯ

Самойчук К.О. Розвиток наукових основ гідродинамічного диспергування молочних емульсій. – Кваліфікаційна наукова праця на правах рукопису.

Дисертація на здобуття наукового ступеня доктора технічних наук за спеціальністю 05.18.12 – процеси та обладнання харчових, мікробіологічних та фармацевтичних виробництв. – Таврійський державний агротехнологічний університет Міністерства освіти і науки України. Харківський державний університет харчування та торгівлі Міністерства освіти і науки України, Харків, 2018 р.

Дисертація присвячена вирішенню важливої науково-прикладної проблеми харчової промисловості України, яка полягає в недостатній техніко-технологічній ефективності виробництва питного молока та молочних продуктів, що в значній мірі обумовлена низькою ефективністю технологічних процесів їх промислового виробництва, а також вирішенню науково-технічної проблеми, яка полягає в недостатньому розвитку науково-теоретичних основ гідродинамічного диспергування жирової фази молока. Наукова гіпотеза роботи міститься у розвитку теорії гідродинамічного диспергування молочної емульсії, що ґрунтується на створенні відносної швидкості дисперсної та дисперсійної фаз та зв'язку цього чинника з прискоренням руху потоку емульсії. Оптимізація процесу диспергування з метою підвищення прискорення потоку та (або) відносної швидкості фаз емульсії дозволить підвищити енергоефективність гомогенізаторів молока.

У вступі обґрунтована актуальність теми дисертаційної роботи, показаний її зв'язок з науковими темами ТДАТУ, сформульовано наукову гіпотезу, мету, задачі, об'єкт і предмет дослідження, визначено наукову новизну та практичне значення одержаних результатів, наведено відомості про їх практичне впровадження, публікації і особистий внесок здобувача, а також заходи щодо апробації матеріалів дисертаційної роботи.

У першому розділі здійснено аналіз гіпотез, механізмів, переважних гідродинамічних факторів диспергування жирової фази молочної емульсії, гідродинамічних умов руйнування жирових кульок молока в сучасних конструкціях диспергаторів і методів розрахунку обладнання для гомогенізації мікроемульсій. Відмічена висока варіативність конструкцій гомогенізаторів і існування значної кількості гіпотез диспергування молочної емульсії, які суперечать одна одній. З'ясовано, що, незважаючи на суттєві відмінності, спільними для конструкцій, які дозволяють отримати високий ступінь диспергування, є створення гідродинамічних умов, які сприяють підвищенню відносної швидкості руху жирової кульки та прискоренню потоку емульсії. Шляхом аналізу способів інтенсифікації процесу диспергування молочних емульсій виділено перспективні напрями для підвищення енергоефективності гомогенізаторів та конструкцій з найбільшим потенціалом зниження енерговитрат: пульсаційний апарат з ротором, що вібрує (ПА з ВР), струминний гомогенізатор з роздільною подачею жирової фази (СГРЖФ) і пульсаційний поршньовий гомогенізатор (ППГ), дослідження яких раніше не проводились.

У другому розділі розроблено структуру, програму, методику планування та проведення досліджень і обробки їх результатів. Обґрунтована структурно-логічна схема етапів досліджень для досягнення поставленої мети дисертаційної роботи, яка включає аналітичні дослідження впливу гідродинамічних умов диспергування молочної емульсії на її дисперсні показники, розробку аналітичних моделей диспергування, експериментальну перевірку адекватності та уточнення отриманих моделей диспергування, створення промислових зразків гомогенізаторів і їх виробничу перевірку. Наведений опис розроблених експериментальних установок для дослідження ПА з ВР, СГРЖФ і ППГ. Дисперсні показники молочної емульсії визначали комп'ютерним аналізом мікрофотографій проб молока, отриманих за допомогою оптичного мікроскопа та цифрової камери. Обробляли результати у програмному забезпеченні Microsoft Visual Studio із застосуванням бібліотек OpenCV Sharp. При вирішенні оптимізаційних задач критеріями оптимізації

обрано отримання необхідної дисперсності молочної емульсії при мінімальних енерговитратах.

У третьому розділі на основі критеріальної умови руйнування жирової кульки Вебера обґрунтовані математичні залежності для визначення середнього діаметра часток дисперсної фази молочної емульсії. Розроблена математична модель гідродинамічного диспергування молочного жиру за рахунок відносних швидкостей руху дисперсної та дисперсійної фаз молочної емульсії в струминному гомогенізаторі молока з роздільною подачею жирової фази, яка пов'язує конструктивно-технологічні та гідравлічні показники гомогенізатора з критерієм Вебера і дисперсністю жирової емульсії. Введено показник струминної гомогенізації, який визначає дисперсність молочної емульсії в залежності від швидкості струменя, діаметра каналу і жирності вершків. Здійснено аналіз процесу СГРЖФ в програмному комплексі кінцево-елементного аналізу ANSYS, який дозволив визначити гідродинамічні показники та розрахувати координати зони подачі вершків, що дозволяють підвищити ефективність диспергування.

У четвертому розділі представлені етапи розробки математичної моделі гідродинамічного диспергування молочного жиру під впливом прискорення руху молочної емульсії в умовах багатократної обробки і резонансних явищ. Теоретичним шляхом отримано залежності, що пов'язують прискорення руху молочної емульсії, швидкість ковзання жирової кульки (її швидкість відносно оточуючої плазми), середній діаметр жирової кульки після гідродинамічного диспергування та критерій Вебера. Відмічено, що прискорення руху емульсії – це параметр, який здатен стати універсальним – об'єднуючим фактором руйнування жирових часток емульсій для більшості типів гомогенізаторів. Введено показник – "коефіцієнт гомогенізації", що пов'язує прискорення руху емульсії з середнім діаметром жирової частки молочної емульсії, який характеризує фізико-механічні властивості дисперсної фази емульсії та дозволяє прогнозувати ефективність гомогенізаторів молока. Побудована математична модель диспергування жирової фази коров'ячого молока у

пульсаційному гомогенізаторі з одним поршнем та пульсаційному апараті з ротором, що вібрує. Одержано аналітичний взаємозв'язок між кратністю обробки та конструктивно-кінематичними показниками ППГ і зпрогнозовано їх вплив на енерговитрати та ступінь диспергування молочного жиру. Наведені етапи розробки безперервної математичної функції процесу зміни площі прохідного перерізу переривника роторно-пульсаційного апарата, що дозволяє значно спростити подальший математичний опис процесу руху рідини у переривнику ПА з ВР. На цій основі розроблена математична модель гідродинамічного диспергування жирової фази молочної емульсії в ПА з ВР для енергоефективних – резонансних режимів роботи.

У п'ятому розділі отримані математичні залежності для розрахунку споживаної потужності та питомих енерговитрат і проведена оптимізація конструктивно-технологічних показників дослідних гомогенізаторів. У результаті аналітичних досліджень знайдені математичні залежності для визначення потужності, продуктивності та питомих енерговитрат струминного гомогенізатора з роздільною подачею жирової фази, поршньового пульсаційного апарата та пульсаційного апарата з ротором, що вібрує. Аналітично визначені раціональні конструктивно-технологічні та гідравлічні показники ПА з ВР, СГРЖФ і ППГ для досягнення високого ступеня дисперсності молочної емульсії за мінімальних питомих енерговитрат.

У шостому розділі проведена експериментальна перевірка та уточнення отриманих аналітично математичних моделей диспергування молочної емульсії в дослідних гомогенізаторах. Проведені експериментальні дослідження, які свідчать про визначальну роль швидкості обтікання жирової кульки плазмою молока в процесі диспергування молочного жиру в СГРЖФ за критерієм Вебера. Отримані експериментальні дані коефіцієнта струминної гомогенізації, які дали змогу встановити раціональні параметри процесу СГРЖФ і визначити значення критерія Вебера для гомогенізації молока. Проведені дослідження ППГ та ПА з ВР довели аналітичну модель диспергування жирової фази молока в пульсаційних гомогенізаторах. Експериментально визначені значення

коефіцієнтів гомогенізації для СГРЖФ, ППГ і ПА з ВР. Відмічене значне підвищення ефективності гомогенізації при створенні умов для резонансних явищ в ПА з ВР. Наведені результати досліджень з визначення необхідної кратності проходження емульсії крізь отвори поршня ППГ. Представлено порівняння аналітичних і експериментальних даних визначення потужності СГРЖФ, ППГ і ПА з ВР і внесено необхідні уточнення у математичні залежності. Проведено оптимізацію конструктивно-кінематичних і технологічних показників СГРЖФ, ППГ і ПА з ВР з метою зниження енерговитрат при досягненні необхідного ступеня диспергування молочної емульсії.

У цьому розділі наведені методики розрахунку конструкційно-технологічних і енергетичних параметрів роботи СГРЖФ, ППГ і ПА з ВР. Представлено синтез перспективних конструктивних рішень гідродинамічних диспергаторів. Розроблені промислові зразки СГРЖФ, ППГ і ПА з ВР, які дозволяють отримати молочну емульсію з середнім діаметром жирових кульок 0,8 мкм і мають в 4,9–6,7 рази менші питомі енерговитрати, ніж промислово освоєні гомогенізатори молока.

Наукова новизна одержаних результатів.

Вперше:

– розроблено теорію гідродинамічного диспергування молочної емульсії, яка ґрунтується на кореляції прискорення руху потоку емульсії з її відносною швидкістю дисперсної та дисперсійної фаз і критерієм Вебера;

– науково обґрунтовано та запропоновано використання показника «коефіцієнт гомогенізації», який пов'язує прискорення руху емульсії з середнім діаметром жирової частки молочної емульсії і характеризує додаткові гідродинамічні умови процесу диспергування жирової фази молочної емульсії;

– розроблено безперервну математичну функцію для опису процесу зміни площі прохідного перерізу модулятора роторно-пульсаційного апарата (РПА) для умов застосування отворів круглої форми та рівності кількості отворів

ротора і статора, що дозволило розробити математичну модель руху рідини у модуляторі пульсаційного апарата з ротором, що вібрує (ПА з ВР);

– визначені умови виникнення бажаних резонансних явищ пульсацій емульсії в модуляторі ПА з ВР, викликаних відцентровим тиском при обертанні та осьовими коливаннями ротора, які призводять до підвищення ефективності диспергування молочної емульсії;

– розроблено математичну модель гомогенізації молока в ПА з ВР, яка пов'язує основні технологічні, конструктивні, кінематичні та енергетичні показники ПА з ВР з дисперсністю жирової емульсії при забезпеченні умов резонансних явищ;

– науково обґрунтовано та запропоновано використання показника «коефіцієнт диспергування» для умов подачі жирової фази молочної емульсії у потік знежиреного молока, визначення якого дозволило встановити критичне значення критерія Вебера для руйнування жирової кульки молока в потоці молочної плазми;

– розроблено математичну модель диспергування жирової фази молока в струминному гомогенізаторі з роздільним подаванням жирової фази (СГРЖФ) з одночасною нормалізацією молока за жирністю.

Удосконалено:

– математичну модель диспергування молочної емульсії в ППГ шляхом врахування кратності проходження емульсії крізь отвори поршня та впливу цього параметру на дисперсні та енергетичні показники диспергування;

– теорію гідродинамічного диспергування струминних гомогенізаторів при подачі струменя вершків у потік знежиреного молока врахуванням впливу жирності вершків, діаметра каналу подачі та швидкості струменя вершків.

Набули подальшого розвитку:

– уявлення про закономірності диспергування жирової фази молока в умовах руху молочної емульсії з прискоренням;

– математична модель диспергування жирової фази молока при пульсаційній гомогенізації за рахунок аналітично визначеного та

експериментально перевіреного на адекватність зв'язку між технологічними, конструктивними, кінематичними та енергетичними показниками пульсаційного поршньового гомогенізатора (ППГ) з дисперсністю жирової емульсії.

Ключові слова: диспергування емульсії, гомогенізація, молочна емульсія, руйнування жирових кульок, прискорення емульсії, гомогенізатор, теорія гомогенізації.

ANNOTATION

Samoichuk K.O. Development of Scientific Bases of the Hydrodynamic Dispergating of Milk Emulsions. – Manuscript.

Dissertation for the Doctor's Degree of Technical Sciences on Speciality 05.18.12 – Processes and Equipment of Food, Microbiological and Pharmaceutical Industries. – Tavria State Agrotechnological university of the Ministry of Education and Science of Ukraine. Kharkiv State University of Food Technology and Trade of the Ministry of Education and Science of Ukraine, Kharkiv, 2018.

Dissertation is devoted to solving important theoretical and applied issue of food industry of Ukraine. Its problem is insufficient technical and manufacturing efficiency of drinkable milk and dairies production. It is largely conditioned by low efficiency of technological processes of their industrial production. The work is also devoted to solving scientific and technical issue which lies in insufficient development of scientific and theoretical bases of the hydrodynamic dispergating of the milk fat phase. The scientific hypothesis of the work is contained in developing of theory of hydrodynamic dispergating of milk emulsion which is grounded on creation of relative velocity of dispersed and continuous phases and connection of this factor with the acceleration of emulsion stream movement. Process optimization of dispergating is aimed at increasing acceleration of the stream and (or) relative velocity of the emulsion phases. It allows increasing energy efficiency of milk homogenizers.

The introduction conveys grounding of the topic urgency of the dissertation work, its connection with the scientific topics of TSATU. The scientific hypothesis, aim, tasks, subject of inquiry and subject of investigation were formulated. The scientific novelty and practical value of the received results were determined. It contains information about their practical introduction, publications and personal contribution of the seeker, and also the measures in relation to approbating materials of the dissertation work.

The first part contains the analysis of hypotheses, mechanisms, prevailing hydrodynamic factors of dispergating of the fat phase of milk emulsion, hydrodynamic conditions of disruption of fat globules of milk in the modern designs of dispergators and methods of analysis of the equipment for homogenization of micro emulsions. It points out a wide range of designs of homogenizers and a large number of existing hypotheses of milk emulsion dispergating that contradict each other. Despite substantial differences, the general features of designs which allow receiving a high degree of dispergating is to create hydrodynamic conditions to provide increasing relative velocity of movement of the fat globule and acceleration of the emulsion stream. Analysis of methods of intensifying the process of dispergating of milk emulsions resulted into distinguishing prospective ways to increase energy efficiency of homogenizers and designs with the biggest potential for diminishing energy consumption: pulsation machine with a vibrating rotor (PM with VR), stream homogenizer with a separate supply of the fat phase (SHSSFP) and pulsation reciprocating homogenizer (PRH) that were not researched before.

A structure, program, methodology of planning and realization of researches and processing of their results are worked out in the second part. A reasonable structurally-logical chart of the stages of researches for achieving set aim of dissertation work had been grounded. It includes analytical researches over the influence of hydrodynamic conditions of dispergating of milk emulsion on its dispersible indexes, development of analytical models of dispergating, experimental verification of adequacy and clarification of the received models of dispergating, designing industrial prototypes of homogenizers and their productive verification. It

contains description of the designed experimental devices for researching PM with VR, SHSSFP and PRH. The dispersible indexes of milk emulsion were determined by the computer analysis of photomicrographs of milk samples, got by means of the optical microscope and digital camera. The results had been processed in Microsoft Visual Studio software, using the libraries of OpenCV Sharp. In order to solve optimization tasks the criteria of optimization had been chosen for receiving required dispersion of milk emulsion at minimal energy consumption.

Mathematical dependences for determining average diameter of the particles of dispersed phase of milk emulsion are grounded on the basis of criterion condition of disruption of the fat globule of Weber in the third part. Mathematical model of the hydrodynamic dispergating of milk fat due to the relative velocities of movement of dispersed and continuous phases of milk emulsion in the stream homogenizer with a separate feed of the fat phase had been worked out. It binds design-technological and hydraulic indexes of the homogenizer to Weber criterion and dispersibility of fat emulsion. The index of stream homogenization had been introduced. It determines dispersion of milk emulsion depending on the stream velocity, diameter of the channel and fat content of creams. The analysis of process in SHSSFP was carried out in the program complex of finite-element analysis ANSYS, which allowed defining hydrodynamic indexes and determining the coordinates of the area of creams supply. It allows increasing efficiency of dispergating.

The fourth part presents the stages of developing mathematical model of the hydrodynamic dispergating of milk fat under the influence of acceleration of movement of milk emulsion under the conditions of multiple processing and resonance phenomena. The dependences are received theoretically that link the acceleration of movement of milk emulsion, slide velocity of the fat globule (its velocity relative to surrounding plasma), average diameter of the fat globule after hydrodynamic dispergating and Weber criterion. It is indicated that acceleration of movement of emulsion is a parameter which can become universal – unifying factor of disruption of fat particles of emulsions for most types of homogenizers. An index had been introduced – "coefficient of homogenization" which binds the acceleration

of movement of emulsion to the average diameter of the fat particle of milk emulsion. It characterizes physical and mechanical properties of the emulsion and allows prognosticating efficiency of homogenizers of milk. The mathematical model of dispergating fat phase of cow milk in the pulsation homogenizer with one piston and the PM with VR had been built. Analytical interrelation had been received between the multiplicity of treatment and design and kinematics indexes of PRH and their influence on energy consumption and degree of dispergating of milk fat had been prognosticated. It describes the stages of developing continuous mathematical function of the process of area variation of the flow area of the interrupter of the rotor pulsation machine. It allows considerable simplifying further mathematical description of the process of movement of liquid in the interrupter of PM with VR. On this basis the mathematical model of the hydrodynamic dispergating of fat phase of milk emulsion in PM with VR had been worked out for energy effective - resonance modes of operation.

Mathematical dependences for estimating power consumption and specific energy consumption are received, and optimization of design and technological features of the researched homogenizers is carried out in the fifth part. As a result of analytical researches the mathematical dependences are found for determining capacity, productivity and specific energy consumption of the stream homogenizer with a separate supply of fat phase, reciprocating pulsation machine and pulsation machine with a vibrating rotor. The rational design and technological and hydraulic values of PM with VR, SHSSFP and PRH had been analytically determined for achieving high degree of dispersion of milk emulsion at minimal specific energy consumption.

The sixth part deals with experimental verification and clarification of the analytically received mathematical models of dispergating of milk emulsion in the researched homogenizers. Conducted experimental researches indicate the determining role of velocity of flowing milk plasma around the fat globule in the process of dispergating of milk fat in SHSSFP on Weber criterion. Experimental data of the coefficient of stream homogenization had been received. They enabled to set

the rational parameters of process of SHSSFP and define the value of Weber criterion for homogenization of milk. The conducted researches of PRH and PM with VR proved the analytical model of dispergating of fat phase of milk in the pulsation homogenizers. The values of homogenization coefficients for SHSSFP, PRH and PM with VR had been experimentally estimated. Considerable increase of homogenization efficiency was observed when conditions were created for the resonance phenomena in PM with VR. The part conveys results of the study on estimating required multiplicity of emulsion passing through the piston holes of PRH. It also contains comparison of analytical and experimental data of estimating capacity of SHSSFP, PRH and PM with VR and necessary clarifications are brought to the mathematical dependences. Optimization of design and kinematics and technological indexes of SHSSFP, PRH and PM with VR is conducted aiming to decrease energy consumption at achieving required degree of dispergating of milk emulsion.

The seventh part contains design procedures of design and technological and power parameters of operation of SHSSFP, PRH and PM with VR. The synthesis of prospective design decisions of hydrodynamic dispergators is presented. The industrial prototypes of SHSSFP, PRH and PM with VR had been developed. They produce the emulsion with the average diameter of fat globules of $0.8 \mu\text{m}$ and have 4.9–6.7 times lesser specific energy consumption than homogenizers of milk in industrial use.

Scientific novelty of the results received.

For the first time:

- the theory had been developed on hydrodynamic dispergating of milk emulsion which is based on correlation of acceleration of emulsion stream with its relative velocity of the continuous and dispersed phases and Weber criterion;
- the index «coefficient of homogenization» was introduced and scientifically grounded, which binds the acceleration of the emulsion movement to the average diameter of fat particle of milk emulsion and characterizes additional hydrodynamic conditions of the dispergating process of milk emulsion fat phase;

- the continuous mathematical function had been developed for describing the process of area variation of the flow area of the modulator of RPM for the conditions of using openings of a round shape and equal number of openings of the rotor and stator, that allowed developing mathematical model of liquid movement in the modulator of PM with VR;

- the conditions are determined for causing desired resonance phenomena of emulsion pulsations in the modulator of PM with VR, which are caused by centrifugal pressure at rotation and axial vibrations of the rotor, that result in increasing dispergating efficiency of milk emulsion;

- the mathematical model of milk homogenization in PM with VR had been developed, which links the basic technological, design, kinematic and power indexes of PM with VR with the dispersibility of fat emulsion under conditions resonance phenomena;

- the usage of the index «coefficient of dispergating» had been suggested and scientifically grounded for the conditions of supply of milk emulsion fat phase into the stream of skim milk, its determining allowed specifying critical value of Weber criterion for disrupting milk fat globule in the milk plasma stream;

- the mathematical model of dispergating of fat phase of milk had been developed for SHSSFP with simultaneous normalization of milk on fat content.

The following was improved:

- the mathematical model of milk emulsion dispergating in PRH via taking into consideration multiplicity of passing of emulsion through the piston holes and influence of this parameter on the dispersible and power indexes of dispergating;

- the theory of hydrodynamic dispergating of stream homogenizers at the supply of stream of creams into the stream of skim milk due to influence of fat content of the creams, diameter of the supply channel and velocity of the stream of creams.

The stated bellow gained further development:

- the concept of behavior of milk fat phase dispergating under conditions of movement of milk emulsion with acceleration;

– the mathematical model of dispersing of fat phase of milk during pulsation homogenization due to analytically determined and experimentally verified for adequate connection between the technological, design, kinematic and power indexes of PRH with the dispersibility of fat emulsion.

The practical value of the got results consists in determining optimal technological, design and kinematic parameters of SHSSFP, PRH and PM with VR and development of industrial prototypes of SHSSFP, PRH and PM with VR in order to get milk emulsion with the average size of fat globules of 0.8 μm and specific energy consumption 4.9–6.7 times lesser than specific energy consumption of valve homogenizers. Technical documentation had been worked out on manufacturing and implementation into practice had been carried out for SHSSFP, PRH and PM with VR, an economic gain from which represents 265740-362945 hrn/year.

Keywords: Emulsion Dispersing, Homogenization, Milk Emulsion, Fat Globules Disruption, Emulsion Acceleration, Homogenizer, Homogenization Theory.

СПИСОК ПУБЛІКАЦІЙ ЗДОБУВАЧА

1. Дейниченко Г.В., Самойчук К.О., Кюрчев С.В., Олексієнко В.О., Паляничка Н.О., Верхованцева В.О. Протитечійно-струминна гомогенізація молока: монографія. Мелітополь: Видавничий будинок ММД, 2017. 188 с. *Внесок здобувача: постановка завдань дослідження, розробка аналітичних моделей диспергування, обґрунтування напрямів конструктивного вдосконалення гомогенізаторів.*

2. Самойчук К.О., Паляничка Н.О. Аналіз сил, що діють на жирову кульку під час гомогенізації // Праці Таврійського державного агротехнологічного університету: зб. наук. праць. Мелітополь: ТДАТУ, 2010. Вип. 10. Т. 3. С. 87–92. *Внесок здобувача: дослідження впливу сил на руйнування жирової кульки та формулювання висновків.*

3. Самойчук К.О., Серков П.О., Ковальов О.О. Диспергатори заміників цільного молока // Праці Таврійського державного агротехнологічного

університету: зб. наук. праць. Мелітополь: ТДАТУ, 2011. Вип. 11. Т.2. С. 119–125. *Внесок здобувача: визначення ефективних конструкцій диспергаторів заміників молока та формулювання висновків статті.*

4. Самойчук К.О., Ковальов О.О. Розробка лабораторного зразка струминного гомогенізатору з роздільною подачею вершків // Праці Таврійського державного агротехнологічного університету: зб. наук. праць. Мелітополь: ТДАТУ, 2011. Вип. 11. Т.6. С. 77–83. *Внесок здобувача: ідея конструктивного рішення лабораторного зразка струминного гомогенізатора.*

5. Самойчук К.О., Ковальов О.О. Експериментальні дослідження струминного гомогенізатора з роздільним подаванням жирової фази // Обладнання та технології харчових виробництв: зб. наук. праць / Донецький національний університет економіки і торгівлі імені Михайла Туган-Барановського. Донецьк: ДонНУЕТ ім. М. Туган-Барановського, 2012. Вип. 28. С. 42–46. *Внесок здобувача: участь у проведенні експериментальних досліджень визначення оптимальної відстані між направляючими та швидкості потоку знежиреного молока.*

6. Гвоздєв О.В., Самойчук К.О., Паляничка Н.О. Комп'ютерне моделювання імпульсного гомогенізатора молока з використанням програмного забезпечення Ansys Workbench // Обладнання та технології харчових виробництв: зб. наук. праць / Донецький національний університет економіки і торгівлі імені Михайла Туган-Барановського. Донецьк: ДонНУЕТ ім. М. Туган-Барановського, 2012. Вип. 28. С. 294–299. *Внесок здобувача: планування комп'ютерного моделювання й встановлення закономірностей змін швидкості потоку емульсії в імпульсному гомогенізаторі.*

7. Самойчук К.О., Ковальов О.О., Івженко А.О. Аналіз методів оцінювання якості гомогенізації молока // Праці Таврійського державного агротехнологічного університету: зб. наук. праць. Мелітополь: ТДАТУ, 2012. Вип.12, Т.4. С. 222–229. *Внесок здобувача: аналіз придатності методів оцінки якості гомогенізації для сучасних умов.*

8. Самойчук К.О., Івженко А.О. Експериментальні дослідження диспергування жирової емульсії в пульсаційному апараті з вібруючим ротором // Обладнання та технології харчових виробництв: зб. наук. праць / Донецький національний університет економіки і торгівлі імені Михайла Туган–Барановського. Донецьк: ДонНУЕТ ім. М. Туган–Барановського, 2013. Вип. 30. С. 155–161. *Внесок здобувача: планування та проведення експериментальних досліджень і аналіз отриманих результатів.*

9. Самойчук К.О., Ковальов О.О. Механізм руйнування жирових кульок у струминному гомогенізаторі з роздільним подаванням вершків // Обладнання та технології харчових виробництв: зб. наук. праць / Донецький національний університет економіки і торгівлі імені Михайла Туган–Барановського. Донецьк: ДонНУЕТ ім. М. Туган–Барановського, 2013. Вип. 30. С.148–155. *Внесок здобувача: розробка аналітичної моделі руйнування жирових кульок в струминному гомогенізаторі.*

10. Самойчук К.О., Івженко А.О. Визначення резонансних режимів роботи пульсаційного апарата з вібруючим ротором // Обладнання та технології харчових виробництв: зб. наук. праць / Донецький національний університет економіки і торгівлі імені Михайла Туган–Барановського. Донецьк: ДонНУЕТ ім. М. Туган–Барановського, 2013. Вип. 31. С. 74–82. *Внесок здобувача: проведення аналітичних досліджень та визначення енергоефективних резонансних режимів пульсаційного апарата з вібруючим ротором.*

11. Самойчук К.О., Івженко А.О. Розрахунок енерговитрат пульсаційного апарата з вібруючим ротором // Наукові праці Одеської національної академії харчових технологій: зб. наук. праць. Одеса: ОНАХТ, 2013. Вип. 43. Т. 2. С. 133–137. *Внесок здобувача: розробка аналітичної моделі енерговитрат пульсаційного апарата.*

12. Самойчук К.О., Ковальов О.О. Аналітичні параметри процесу струминної гомогенізації молока з роздільною подачею вершків // Наукові праці Одеської національної академії харчових технологій: зб. наук. праць. Одеса: ОНАХТ, 2013. Вип. 43. Т. 2. С. 77–81. *Внесок здобувача: розробка*

аналітичної моделі процесу струминної гомогенізації молока з роздільною подачею вершків на основі критерія Вебера.

13. Самойчук К.О., Ковальов О.О. Аналіз сил дроблення жирових кульок в струминному гомогенізаторі // Наукові праці Південного філіалу Національного університету біоресурсів і природокористування України «Кримський агротехнологічний університет»: зб. наук. праць. Сімферополь: НУБіП, 2013. Вип. 153. С. 26–34. *Внесок здобувача: визначення основних сил та факторів руйнування жирових кульок в струминному гомогенізаторі.*

14. Самойчук К.О. Івженко А.О. Механізми диспергування жирової фази в пульсаційному апараті з вібруючим ротором // Праці Таврійського державного агротехнологічного університету: зб. наук. праць. Мелітополь: ТДАТУ, 2013. Вип. 13. Т.7. С. 11–20. *Внесок здобувача: аналіз механізмів диспергування, визначення переважних з них для диспергування жирової фази в пульсаційному апараті з вібруючим ротором.*

15. Самойчук К.О., Ковальов О.О. Використання нормалізації у струминному гомогенізаторі молока з роздільною подачею вершків // Праці Таврійського державного агротехнологічного університету: зб. наук. праць. Мелітополь: ТДАТУ, 2014. Вип.14. Т.1. С. 37–45. *Внесок здобувача: визначення можливості, проблем і перспектив використання нормалізації в струминному гомогенізаторі молока з роздільною подачею вершків.*

16. Самойчук К.О., Івженко А.О. Визначення продуктивності пульсаційного апарату з вібруючим ротором // Наукові праці Одеської національної академії харчових технологій: зб. наук. праць. Одеса: ОНАХТ, 2014. Вип. 45. Т. 3. С. 25–30. *Внесок здобувача: розробка математичних залежностей для визначення продуктивності апарата.*

17. Самойчук К.О., Івженко А.О. Определение скорости в модуляторе пульсационного гомогенизатора с вибрирующим ротором // Вестник Могилёвского государственного университета продовольствия. 2014. №1 (16). С. 87–99. **Стаття у виданні Республіки Білорусь.** *Внесок здобувача: розробка математичної моделі швидкості руху емульсії в пульсаційному гомогенізаторі з ротором, що вібрує.*

18. Самойчук К.О., Ковальов О.О. Обґрунтування гідродинамічних параметрів процесу струминної гомогенізації молока з роздільною подачею вершків // Наукові праці Одеської національної академії харчових технологій: зб. наук. праць. Одеса: ОНАХТ, 2014. Вип. 46. Т.2. С. 314–319. *Внесок здобувача: узагальнення та аналіз гідродинамічних параметрів процесу струминної гомогенізації молока з роздільною подачею вершків.*

19. Самойчук К.О., Івженко А.О. Методика розрахунку пульсаційного гомогенізатора з вібруючим ротором // Збірник наукових праць Вінницького національного аграрного університету: зб. наук. праць. Вінниця: ВНАУ, 2015. Вип. 1 (89). Т. 2. №1. С. 133–138. *Внесок здобувача: узагальнення досліджень пульсаційного гомогенізатора та створення методики розрахунку апарата.*

20. Самойчук К.О., Ковальов О.О., Султанова В.О. Якість та енергетична ефективність процесу струминної гомогенізації молока з роздільною подачею вершків // Праці Таврійського державного агротехнологічного університету: зб. наук. праць. Мелітополь: ТДАТУ, 2015. Вип.15. Т.1. С. 240–248. *Внесок здобувача: постановка завдань досліджень та аналіз енергетичної ефективності процесу струминної гомогенізації.*

21. Самойчук К.О., Івженко А.О. Рівняння зміни площі прохідного перетину модулятора в пульсаційному апараті з вібруючим ротором // Наукові праці Національного університету харчових технологій: зб. наук. праць. Київ: НУХТ, 2015. Т. 21. №4. С. 164–170. *Внесок здобувача: розробка безперервної функції для опису зміни рівняння площі прохідного перетину модулятора роторно-пульсаційного апарата.*

22. Самойчук К.О., Ковальов О.О. Підвищення ефективності струминного гомогенізатору молока з роздільною подачею вершків // Наукові праці Одеської національної академії харчових технологій: зб. наук. праць. Одеса: ОНАХТ, 2015. Вип. 47. Т. 1. С. 67–72. *Внесок здобувача: узагальнення способів підвищення ефективності струминного гомогенізатора, формулювання висновків*

23. Самойчук К.О., Івженко А.О. Ефективність гомогенізації молока в пульсаційному апараті з вібруючим ротором // Вісник Харківського національного технічного університету сільського господарства імені Петра Василенка: зб. наук. праць. Харків: ХНТУСГ ім. П. Василенка, 2015. Вип. 166. С. 98–104. *Внесок здобувача: ідея використання показника ефективності гомогенізації та аналіз отриманих даних.*

24. Самойчук К.О., Ковалёв, А.А., Бездитный А.А. Моделирование процесса струйной гомогенизации молока с отдельной подачей сливок // Вестник Могилёвского государственного университета продовольствия. 2015. №2 (19).С. 69–76. **Стаття у виданні Республіки Білорусь** *Внесок здобувача: визначення впливу гідродинамічних показників в камері струминного гомогенізатора на процес гомогенізації.*

25. Дейниченко Г.В., Самойчук К.О., Івженко А.О. Синхронізація коливальних і обертальних рухів ротора у пульсаційному гомогенізаторі з вібруючим ротором // Вібрації в техніці та технологіях. 2016. №1 (81). С. 122–131. **Стаття у фаховому виданні України, яке включено до міжнародних наукометричних баз.** *Внесок здобувача: обґрунтування умов синхронізації фаз для підвищення ефективності процесу диспергування емульсій в пульсаційному гомогенізаторі з вібруючим ротором.*

26. Дейниченко Г.В., Самойчук К.О., Івженко А.О., Левченко Л.В. Аналіз конструкцій гомогенізаторів молочної промисловості // Праці Таврійського державного агротехнологічного університету: зб. наук. праць. Мелітополь: ТДАТУ, 2016. Вип.16. Т.1. С. 9–15. *Внесок здобувача: участь в узагальненні конструкцій і обґрунтування методів підвищення ефективності сучасних гомогенізаторів.*

27. Дейниченко Г.В., Самойчук К.О., Ковальов О.О. Конструкції струминних диспергаторів жирової фази молока // Праці Таврійського державного агротехнологічного університету: зб. наук. праць. Мелітополь: ТДАТУ, 2016. Вип.16. Т.1. С. 219–226. *Внесок здобувача: аналіз конструкцій струминних диспергаторів і визначення найбільш перспективних з них.*

28. Самойчук К.О., Левченко Л.В. Аналітичні дослідження умов диспергування жирової фази молока в пульсаційному гомогенізаторі // Вісник Дніпропетровського державного аграрно-економічного університету. 2016. №1 (39). С. 64–67. *Внесок здобувача: розробка математичних залежностей швидкості та прискорення потоку емульсії з конструктивно-технологічними параметрами пульсаційного гомогенізатора.*

29. Самойчук К.О. Методика расчёта степени дисперсности эмульсий // MOTROL. Commission of Motorization and Energetics in Agriculture. 2016. Vol.18. №. 2. P. 97–102. **Стаття у виданні Республіки Польща, яке включено до міжнародних наукометричних баз.**

30. Дейниченко Г.В., Самойчук К.О., Левченко Л.В. Аналітичні дослідження енерговитрат пульсаційного гомогенізатора молока // Прогресивні техніка та технології харчових виробництв ресторанного господарства і торгівлі: зб. наук. праць / Харківський державний університет харчування та торгівлі. Харків: ХДУХТ, 2016. Вип. 1 (23). С. 170–181. *Внесок здобувача: створення аналітично моделі для розрахунку енерговитрат пульсаційного гомогенізатора молока.*

31. Самойчук К.О., Ковальов О.О. Механізми диспергування жирових кульок в струминному гомогенізаторі молока // Наукові праці Одеської національної академії харчових технологій: зб. наук. праць. Одеса: ОНАХТ, 2016. Т.80. Вип.1. С. 103–107. *Внесок здобувача: участь у аналізі механізмів диспергування жирових кульок і встановлення переважних з них, формулювання висновків статті.*

32. Дейниченко Г.В., Самойчук, К.О., Левченко Л.В. Вплив кратності обробки молочної емульсії в пульсаційному гомогенізаторі // Прогресивні техніка та технології харчових виробництв ресторанного господарства і торгівлі: зб. наук. праць / Харківський державний університет харчування та торгівлі. Харків: ХДУХТ, 2016. Вип. 2 (24). С. 226–233. *Внесок здобувача: створення математичної моделі визначення кратності обробки в пульсаційному гомогенізаторі.*

33. Samoichuk K., Kiurchev S., Oleksienko V., Palyanichka N., Verholantseva V. Investigation of homogenization of milk in a pulsation machine with a vibrating rotor // Eastern-European Journal of Enterprise Technologies. 2016. №6/11 (84). P. 16–21. **Стаття у фаховому виданні України, яке включено до міжнародних наукометричних баз (SCOPUS та інших).** *Внесок здобувача: участь у проведенні експериментальних досліджень та визначення коефіцієнта диспергування для пульсаційного гомогенізатора з ротором, що вібрує.*

34. Samoichuk K., Kiurchev S., Oleksienko V., Palyanichka N., Verholantseva V. Research into usage efficiency of the pulsation machine with a vibrating rotor for milk homogenization // EUREKA: Life Sciences. 2016. Vol. 6, P. 3–10. **Стаття у виданні Естонської Республіки, яке включено до міжнародних наукометричних баз.** *Внесок здобувача: планування досліджень і узагальнення їх результатів, встановлення зв'язку між прискоренням руху емульсії та дисперсністю для пульсаційного гомогенізатора з ротором, що вібрує.*

35. Дейниченко Г.В., Самойчук К.О., Левченко Л.В. Аналітичне визначення дисперсності при обробці молока в пульсаційному гомогенізаторі // Вісник Харківського національного технічного університету сільського господарства імені Петра Василенка: зб. наук. праць. Харків: ХНТУСГ ім. П. Василенка. Харків, 2016. Вип. 179. С. 32–39. *Внесок здобувача: створення математичної моделі для визначення середнього розміру жирових кульок при диспергуванні емульсії в пульсаційному поршньовому гомогенізаторі.*

36. Дейниченко Г.В., Самойчук К.О., Ковальов О.О., Пацький І.Ю. Дослідження діаметру каналу подавання вершків струминного гомогенізатора молока // Праці Таврійського державного агротехнологічного університету: зб. наук. праць. Мелітополь: ТДАТУ, 2017. Вип. 17. Т. 1 С. 195–205. *Внесок здобувача: планування досліджень та узагальнення отриманих результатів зі встановлення впливу діаметра каналу в струминному гомогенізатора молока.*

37. Леженкін О. М., Самойчук К.О, Ковальов О.О., Паляничка Н.О., Верхоланцева В.О. Визначення шляху змішування та дотичних напружень в струминному гомогенізаторі молока // Вісник Українського відділення Міжнародної академії аграрної освіти. 2017. Вип. 5. С. 129–142. *Внесок здобувача: визначення впливу пристінного шару на процес гомогенізації молока в струминному диспергаторі.*

38. Дейниченко Г.В., Самойчук К.О., Левченко Л.В. Ефективність гомогенізації молока у пульсаційному гомогенізаторі // Вібрації в техніці та технологіях. 2017. №1 (84). С. 116–121. **Стаття у фаховому виданні України, яке включено до міжнародних наукометричних баз.** *Внесок здобувача: встановлення впливу конструктивно-кінематичних параметрів на процес гомогенізації молока у пульсаційному гомогенізаторі.*

39. Дейниченко Г.В. Самойчук К.О., Паляничка Н.О., Левченко Л.В. Визначення впливу подачі молока в пульсаційному гомогенізаторі // Техніка, енергетика, транспорт АПК. 2017. №3 (98). С. 12–17. *Внесок здобувача: проведення аналітичних досліджень з впливу подачі молока на ефективність пульсаційного гомогенізатора.*

40. Kovalyov A., Samoichuk K., Palyanichka N., Verkholantseva V., Yanakov V. Experimental investigations of the parameters of the jet milk homogenizer with separate cream supply // Technology audit and production reserves. 2017. №2/3 (34). P. 33–38. **Стаття у фаховому виданні України, яке включено до міжнародних наукометричних баз.** *Внесок здобувача: планування теоретичних і експериментальних досліджень та узагальнення результатів з впливу гідродинамічних параметрів на процес диспергування жирової фази молочної емульсії.*

41. Самойчук К.О. Прискорення емульсії як основний фактор гідродинамічного диспергування жирової фази молока // Прогресивні техніка та технології харчових виробництв ресторанного господарства і торгівлі: зб. наук. праць / Харківський державний університет харчування та торгівлі. Харків: ХДУХТ, 2017. Вип. 2 (26). С.210–220. **Стаття у фаховому виданні України, яке включено до міжнародних наукометричних баз.**

42. Самойчук К.О. Багатократна і багатоступінчаста гомогенізація молока // Праці Таврійського державного агротехнологічного університету: зб. наук. праць. Мелітополь: ТДАТУ, 2018. Вип. 18. Т.1 С. 22–28.

43. Самойчук К.О., Левченко Л.В., Циб В.Г. Обґрунтування параметрів отворів поршня пульсаційного гомогенізатора молока // Праці Таврійського державного агротехнологічного університету: зб. наук. праць. Мелітополь: ТДАТУ, 2018. Вип. 18. Т.1. С. 274–280. *Внесок здобувача: участь у визначенні впливу параметрів отворів поршня пульсаційного поршньового гомогенізатора на ефективність його роботи.*

44. Самойчук К.О., Паляничка Н.О., Верхованцева В.О., Янович В.П. Вібраційні гомогенізатори молока // Вібрації в техніці та технологіях. 2018. №1 (88). С. 77–82. **Стаття у фаховому виданні України, яке включено до міжнародних наукометричних баз.** *Внесок здобувача: аналіз конструкцій та можливостей використання вібраційних гомогенізаторів молока.*

45. Самойчук К.О., Ковальов О.О. Струминний гомогенізатор з роздільною подачею вершків // Проблеми харчових технологій і харчування. сучасні виклики і перспективи розвитку: тези доповідей VII міжнар. наук.-практ. конф., 7–9 вер. 2011 р. Донецьк: ДонНУЕТ ім. М. Туган-Барановського, 2011. С 172–175. *Внесок здобувача: обґрунтування конструктивного рішення ефективного струминного гомогенізатора та формулювання висновків.*

46. Паляничка Н. О., Гвоздев О.В., Самойчук К. О. Експериментальне обґрунтування ефективності використання імпульсної гомогенізації молока // Проблеми харчових технологій і харчування. Сучасні виклики і перспективи розвитку: тези доповідей VII міжнар. наук.-практ. конф., 7–9 вер. 2011 р. Донецьк: ДонНУЕТ ім. М. Туган-Барановського, 2011. С. 163–166. *Внесок здобувача: розробка критеріїв ефективності і аналіз результатів експериментальних досліджень.*

47. Паляничка Н.О., Гвоздев О.В., Самойчук К.О. Визначення енерговитрат на процес імпульсної гомогенізації молока // Состояние, достижения и перспективы переработки, стандартизации и сертификации

матеріалов: матеріали міжнар. наук.–практ. конф., 25–27 вер. 2012 р. Херсон: ХДАУ, 2012. С. 47–48. *Внесок здобувача: Участь у розробці аналітичних залежностей енерговитрат в імпульсному гомогенізаторі.*

48. Самойчук К.О., Ковальов О.О. Теоретичні основи диспергування в струминному гомогенізаторі молока // Прогресивна техніка та технології харчових виробництв, ресторанного та готельного господарств і торгівлі. Економічна стратегія і перспективи розвитку сфери торгівлі та послуг: тези доповідей міжнар. наук.–практ. конф., 19 лист. 2013 р. Харків: ХДУХТ, 2013. Ч. I. С. 382–384. *Внесок здобувача: побудова математичної моделі диспергування в струминному гомогенізаторі молока.*

49. Дейниченко Г.В., Самойчук К.О. Підвищення ефективності процесу гомогенізації молока в пульсаційному гомогенізаторі з вібруючим ротором // Інноваційні аспекти розвитку обладнання харчової і готельної індустрії в умовах сучасності: тези доповідей міжнар. наук.–практ. конф., 8–11 вер. 2015 р. Мелітополь–Кирилівка: ХДУХТ, 2015. С. 384–386. *Внесок здобувача: аналіз методів підвищення ефективності процесу гомогенізації молока в пульсаційному гомогенізаторі з вібруючим ротором.*

50. Самойчук К.О., Івженко А.О., Султанова В.О. Дослідження імпульсного гомогенізатора молока // Інноваційні аспекти розвитку обладнання харчової і готельної індустрії в умовах сучасності: тези доповідей міжнар. наук.–практ. конф., 8–11 вер. 2015 р. Мелітополь–Кирилівка: ХДУХТ, 2015. С. 91–92. *Внесок здобувача: проведення аналітичних дослідженні імпульсного гомогенізатора молока з одним поршнем.*

51. Самойчук К.О., Ковальов О.О. Струминний гомогенізатор–нормалізатор молока // Інноваційні аспекти розвитку обладнання харчової і готельної індустрії в умовах сучасності: тези доповідей міжнар. наук.–практ. конф., 8–11 вер. 2015 р. Мелітополь–Кирилівка: ХДУХТ, 2015. С. 93–94. *Внесок здобувача: аналіз особливостей використання струминного гомогенізатора–нормалізатора молока.*

52. Самойчук К.О., Ковальов О.О. Підвищення ефективності струминного гомогенізатору молока з роздільною подачею вершків // Інноваційні енерготехнології: збірник праць V міжнар. наук.–практ. конф., 7–11 вер. 2015 р. Одеса: ОНАХТ, 2015. С. 246–251. *Внесок здобувача: аналіз методів підвищення ефективності струминного гомогенізатора молока.*

53. Самойчук К.О. Ковальов О.О. Механізми диспергування жирових кульок в струминному гомогенізаторі молока // Удосконалення процесів і обладнання харчових та хімічних виробництв: збірник праць XVI міжнар. наук.–практ. конф., 5–9 вер. 2016 р. Одеса: ОНАХТ, 2016. С. 81–85. *Внесок здобувача: участь у аналізі механізмів диспергування жирових кульок в струминному гомогенізаторі молока, формулювання висновків.*

54. Дейниченко Г.В., Самойчук К.О., Ковальов О.О. Струминні гомогенізатори молока // Розвиток харчових виробництв, ресторанного та готельного господарств і торгівлі: проблеми, перспективи, ефективність: матеріали міжнар. наук.–практ. конф., 19 травня 2016 р. Харків: ХДУХТ, 2016. С. 274–276. *Внесок здобувача: розробка енергоефективної схеми струминного гомогенізатора з роздільним подаванням жирової фази.*

55. Самойчук К.О., Паляничка Н.О. Підвищення ефективності діяльності молокопереробних підприємств за рахунок впровадження нових типів гомогенізаторів // Підвищення ефективності діяльності підприємств харчової та переробної галузей АПК: матеріали V Всеукраїнської наук.–практ. конф., 17–18 лист. 2016 р. Київ: НУХТ, 2016. С. 210–211. *Внесок здобувача: аналіз можливостей і результатів використання енергоефективних гомогенізаторів.*

56. Самойчук К.О., Паляничка Н.О., Верхованцева В.О. Гомогенізація жирової фази молока в пульсаційному апараті з ротором, що вібрує // Фундаментальні та прикладні дослідження у сучасній науці // збірник матер. IV наук. конф., 30 жовт. 2016 р. Харків: «Технологический центр», 2016. С. 86–87. *Внесок здобувача: проведення досліджень і аналіз результатів гомогенізації молока в пульсаційному апараті з ротором, що вібрує.*

57. Воробйова О.В., Левченко Л.В., Самойчук К.О. Аналітичні дослідження енергетичної ефективності використання пульсаційного

гомогенізатора молока // Перспективи розвитку сучасної науки: матеріали IV міжнар. наук.–практ. конф., 2–3 грудня 2016 р. Львів: Видавничий дім «Гельветика», 2016. Ч. 1. С. 80–83. *Внесок здобувача: розробка критеріїв енергоефективності пульсаційного гомогенізатора та узагальнення результатів досліджень.*

58. Самойчук К.О. Шляхи енергозбереження при гомогенізації молока // Проблеми та перспективи сталого розвитку АПК: матеріали міжнар. наук.–практ. конф., 14–15 квітня 2016 р. Мелітополь: ТДАТУ, 2016. С. 89–90.

59. Дейниченко Г.В., Самойчук К.О. Перспективні конструкції гомогенізаторів молока // Озиқ-овқат ва кимёсаноатида чиқиндисиз ва экологик самарадор технологияларни қўллаш: мавзусида Республика миқёсидаги илмий-амалий анжуман иштирокчиларининг илмий маъруза материаллари киритилган, 14 марта 2017 р. Наманган шаҳри: НамМПИ, 2017. С. 146–148. *Внесок здобувача: аналіз перспективних конструкцій гомогенізаторів молока.*

60. Самойчук К.О., Ковальов О.О., Левченко Л.В. Перспективні способи диспергування жирової фази молока // Розвиток харчових виробництв, ресторанного та готельного господарств і торгівлі: проблеми, перспективи, ефективність: тези доповідей міжнар. наук.–практ. конф., 18 травня 2017 р. Харків: ХДУХТ, 2017. Ч. 1. С. 280–281. *Внесок здобувача: участь у аналізі та описі перспективних способів диспергування жирової фази молока.*

61. Ковальов О.О., Левченко Л.В., Самойчук К.О. Енергетичні витрати перспективних конструкцій гомогенізаторів молока // Наукові здобутки у вирішенні актуальних проблем виробництва та переробки сировини, стандартизації і безпеки продовольства: збірник праць за підсумками VII міжнар. наук.–практ. конф., 27–28 квітня 2017 р. Київ: НУБІП, 2017. С. 315–316. *Внесок здобувача: участь у проведенні досліджень по визначенню енергоефективності перспективних гомогенізаторів молока.*

62. Самойчук К.О., Паляничка Н.О. Методи аналізу зображень при визначенні дисперсійних характеристик мікро-емульсій методом оптичного мікроскопування // Фундаментальна підготовка фахівців у природничо-

математичній, технічній, агротехнологічній та економічній галузях: матеріали всеукраїнської наук.–практ. конф. з міжнародною участю, 11–13 вер. 2017 р. Мелітополь: ТДАТУ, 2017. С. 140–142. *Внесок здобувача: участь у узагальненні методів аналізу зображень та формулювання висновків.*

63. Самойчук К.О. Визначення універсального фактора диспергування жирової фази молока // Інноваційні аспекти розвитку обладнання харчової і готельної індустрії в умовах сучасності: матеріали другої міжнар. наук.–практ. конф., 5–7 вер. 2017 р. Харків: ХДУХТ, 2017. С. 17–19.

64. Дейниченко Г.В., Самойчук К.О., Левченко Л.В. Теоретичні дослідження пульсаційної гомогенізації молока // Інноваційні аспекти розвитку обладнання харчової і готельної індустрії в умовах сучасності: матеріали другої міжнар. наук.–практ. конф., 5–7 вер. 2017 р. Харків: ХДУХТ, 2017. С. 42–43. *Внесок здобувача: розробка теоретичної моделі пульсаційної гомогенізації.*

65. Дейниченко Г.В., Самойчук К.О., Ковальов О.О. Раціональні параметри струминного гомогенізатора молока // Інноваційні аспекти розвитку обладнання харчової і готельної індустрії в умовах сучасності: матеріали другої міжнар. наук.–практ. конф., 5–7 вер. 2017 р. Харків: ХДУХТ, 2017. С. 44–45. *Внесок здобувача: узагальнення результатів досліджень по визначенню раціональних параметрів струминних диспергаторів молочних емульсій.*

66. Самойчук К.О., Паляничка Н.О., Верхованцева В.О., Левченко Л.В. Перспективи використання вібраційних гомогенізаторів молока // Вібрації в техніці та технологіях: збірник тез доповідей XVI міжнар. наук.–практ. конф., 26–27 жовт. 2017 р. Вінниця: ВНАУ, 2017. С. 36–38. *Внесок здобувача: участь у описі вібраційних гомогенізаторів молока та перспектив їх використання.*

67. Дейниченко Г.В., Самойчук К.О., Л.В. Левченко. Перспективи використання пульсаційного гомогенізатора-диспергатора емульсій // Проблеми конструювання, виробництва та експлуатації сільськогосподарської техніки: матеріали XI міжнар. наук.–практ. конф., 1–3 лист. 2017 р. Кропивницький: ЦНТУ, 2017. С. 17–19. *Внесок здобувача: участь у описі пульсаційних гомогенізаторів-диспергаторів емульсій та перспектив їх використання.*

68. Самойчук К.О. Кратність гомогенізації молока // Інноваційні технології виробництва та переробки тваринницької продукції: матеріали міжнар. наук.–практ. інтернет–конф., 12 груд. 2017 р. Вінниця: ВНАУ, 2017. С. 170–172.

69. Самойчук К.О., Паляничка Н.П., Верхоланцева В.О., Левченко Л.В. Методика розрахунку потужності пульсаційного гомогенізатора молока // Modern methods, innovations and experience of practical application in the field of technical sciences: Conference proceedings: international research and practice conference, 27–28 grudzień 2017 р. Lublin : Izdevnieciba «Baltija Publishing», 2017. С. 176–179. *Внесок здобувача: побудова математичної моделі визначення потужності пульсаційного гомогенізатора молока.*

70. Самойчук К.О., Ковальов О.О., Левченко Л.В. Методика розрахунку дисперсності молочної емульсії в пульсаційному і струминному гомогенізаторах // Соціально–економічний розвиток аграрної сфери: інженерно-економічне забезпечення: матеріали міжнар. наук.–практ. конф., 19–20 квітня 2018 р. Бережани: «Бережанський агротехнічний інститут», 2018. С. 314–316. *Внесок здобувача: участь у розробці методика розрахунку дисперсності молочної емульсії в пульсаційному і струминному гомогенізаторах.*

71. Самойчук К.О., Левченко Л.В., Паляничка Н.О. Вплив амплітуди і частоти коливань поршня пульсаційного гомогенізатора на дисперсність жирової фази молока // The development of technical Sciences: problems and solutions: the international research and practical conference 27–28 april 2018 у. Brno: Baltija Publishing, 2018. С. 72–75. *Внесок здобувача: здійснення планування експериментальних досліджень та узагальнення отриманих результатів.*

72. Загорко Н.П., Самойчук К.О., Левченко Л.В. Експериментальне визначення кратності обробки в пульсаційному гомогенізаторі молока // Агроекологічні аспекти виробництва та переробки продукції сільського господарства: матеріали міжнар. наук.–практ. конф., 7–8 червня 2018 р. Мелітополь–Кирилівка: ТДАТУ, 2018. – С. 43. *Внесок здобувача:*

Виконане планування експериментальних досліджень та узагальнення отриманих результатів.

73. Самойчук К.О. Інноваційні технології гомогенізації в галузі виробництва молока та переробки молочної продукції // Агроекологічні аспекти виробництва та переробки продукції сільського господарства: матеріали міжнар. наук.–практ. конф., 7–8 червня 2018 р. Мелітополь–Кирилівка: ТДАТУ, 2018. – С. 59.

74. Гомогенізатор для рідких продуктів: пат. на корисну модель 66085 Україна / Гвоздев О.В, Паляничка Н.О., Самойчук К.О., Бездітний А.О., Кучеренко В.В. № 201106224; заявл. 18.05.11; опубл. 26.12.11, Бюл. № 24. 3 с. *Внесок здобувача: ідея винаходу та участь у розробці технічного рішення її реалізації.*

75. Струминний гомогенізатор молока з роздільною подачею вершків: пат. на корисну модель 94041 Україна / Самойчук К.О., Ковальов О.О., Ялпачик Ф.Ю. № 201405239; заявл. 19.05.14; опубл. 27.10.14, Бюл. № 20. 3 с. *Внесок здобувача: ідея винаходу та участь у розробці технічного рішення її реалізації.*

76. Спосіб гомогенізації та нормалізації молока: пат. на корисну модель 94048 Україна / Самойчук К.О., Ковальов О.О., Ялпачик Ф.Ю. № 201405343; заявл. 19.05.14; опубл. 27.10.14, Бюл. № 20. 4 с. *Внесок здобувача: ідея винаходу та участь у розробці технічного рішення її реалізації.*

77. Головка гомогенізатора: пат. на корисну модель 98488 Україна / Самойчук К.О., Султанова В.О, Ялпачик Ф.Ю. № 201412958; заявл. 03.12.14; опубл. 27.04.15, Бюл. № 8. 4 с. *Внесок здобувача: ідея винаходу та участь у розробці технічного рішення її реалізації.*

78. Струминний гомогенізатор молока з роздільною подачею вершків: пат. на корисну модель 106522 Україна / Самойчук К.О., Дейниченко Г.В., Ковальов О.О. № 201511244; заявл. 16.11.15; опубл. 25.04.16, Бюл. № 8. 4 с. *Внесок здобувача: ідея винаходу та участь у розробці технічного рішення її реалізації.*

79. Головка гомогенізатора: пат. на корисну модель 106521 Україна / Самойчук К.О., Дейниченко Г.В., Султанова В.О., Ялпачик Ф.Ю. № 201511243; заявл. 16.11.15; опубл. 25.04.16, Бюл. № 8. 6 с. *Внесок здобувача: ідея винаходу та участь у розробці технічного рішення її реалізації.*

80. Головка гомогенізатора: пат. на корисну модель 106533 Україна / Самойчук К.О., Дейниченко Г.В., Панов А.В. № 201511335; заявл. 17.11.15; опубл. 25.04.16, Бюл. № 8. 4 с. *Внесок здобувача: ідея винаходу та участь у розробці технічного рішення її реалізації.*

81. Головка гомогенізатора: пат. на корисну модель 106536 Україна / Самойчук К.О., Дейниченко Г.В., Панов А.В. № 201511347; заявл. 17.11.15; опубл. 25.04.16, Бюл. № 8. 4 с. *Внесок здобувача: ідея винаходу та участь у розробці технічного рішення її реалізації.*

82. Роторно-пульсаційний апарат з ротором, що вібрує: пат. на корисну модель 106554 Україна / Самойчук К.О., Івженко А.О., Ялпачик Ф.Ю., Султанова В.О. № 201511568; заявл. 23.11.15; опубл. 25.04.16, Бюл. № 8. 4 с. *Внесок здобувача: ідея винаходу та участь у розробці технічного рішення її реалізації.*

83. Роторно-пульсаційний апарат з ротором, що вібрує: пат. на корисну модель 107458 Україна / Самойчук К.О., Івженко А.О., Ялпачик Ф.Ю., Султанова В.О. № 201511506; заявл. 23.11.15; опубл. 10.06.16, Бюл. № 11. 5 с. *Внесок здобувача: ідея винаходу та участь у розробці технічного рішення її реалізації.*

84. Клапанна головка гомогенізатора: пат. на корисну модель 112317 Україна / Кюрчев В.М., Воробйова О.В., Самойчук К.О. № 201606459; заявл. 13.06.16; опубл. 12.12.16, Бюл. № 23. 3 с. *Внесок здобувача: ідея винаходу та участь у розробці технічного рішення її реалізації.*

85. Струминний гомогенізатор молока з роздільною подачею вершків: пат. на корисну модель 119871 Україна / Кюрчев В.М., Дейниченко Г.В., Самойчук К.О., Пацький І.Ю. № 201704300; заявл. 03.05.17; опубл. 10.10.17, Бюл. № 19. 5 с. *Внесок здобувача: ідея винаходу та участь у розробці технічного рішення її реалізації.*

86. Гомогенізатор для рідких продуктів: пат. на корисну модель 121278 Україна / Кюрчев В.М., Самойчук К.О., Марченко О.С., Левченко Л.В. № 201706676; заявл. 27.06.17; опубл. 27.11.17, Бюл. № 22. 6 с. *Внесок здобувача: ідея винаходу та участь у розробці технічного рішення її реалізації.*

87. Роторно-пульсаційний апарат з ротором, що вібрує: пат. на корисну модель. 121949 Україна / Кюрчев В.М., Дейниченко Г.В., Самойчук К.О., Пацький І.Ю. № 201705629; заявл. 07.06.17; опубл. 26.12.17, Бюл. № 24. 6 с. *Внесок здобувача: ідея винаходу та участь у розробці технічного рішення її реалізації.*

88. Струминний гомогенізатор молока з роздільною подачею вершків: пат. на корисну модель 122548 Україна / Кюрчев В.М., Самойчук К.О., Ковальов О.О., Пацький І.Ю. № 201708561; заявл. 21.08.17; опубл. 10.01.18, Бюл. № 1. 5 с. *Внесок здобувача: ідея винаходу та участь у розробці технічного рішення її реалізації.*

89. Розрахунки обладнання харчових виробництв: практикум / В.Ф. Ялпачик, С.Ф. Буденко, Ф.Ю. Ялпачик, О.В. Гвоздєв, В.Г. Циб, В.С. Бойко, К.О. Самойчук та ін. Мелітополь: Видавничий будинок ММД, 2014. 264 с. *Внесок здобувача: розробка методики розрахунку гомогенізаторів молока.*

90. Машини, обладнання та їх використання при переробці сільськогосподарської продукції: практикум / В.Ф. Ялпачик, В.О. Олексієнко, Ф.Ю. Ялпачик, К.О. Самойчук та ін. Мелітополь: Видавничий будинок ММД, 2015. 196 с. *Внесок здобувача: розробка і створення методики лабораторних робіт для дослідження гомогенізаторів молока.*

91. Технологічне обладнання для переробки продукції тваринництва: лабор. практикум / В.Ф. Ялпачик, Н.П. Загорко, Н.О. Паляничка, С.Ф. Буденко, К.О. Самойчук та ін. Мелітополь: Видавничий будинок ММД, 2017. 276 с. *Внесок здобувача: аналіз перспективного технологічного обладнання для механічних процесів переробки молока.*

ЗМІСТ

ПЕРЕЛІК СКОРОЧЕНЬ, ТЕРМІНІВ ТА УМОВНИХ ПОЗНАЧЕНЬ	40
ВСТУП	45
РОЗДІЛ 1. ЗАГАЛЬНІ ЗАКОНОМІРНОСТІ КОНСТРУКЦІЙ ПРИСТРОЇВ ДЛЯ ГОМОГЕНІЗАЦІЇ Й УЗАГАЛЬНЕННЯ ПРИНЦИПІВ, МЕХАНІЗМІВ І ГІПОТЕЗ ДИСПЕРГУВАННЯ МОЛОЧНОГО ЖИРУ	55
1.1 Властивості молочної емульсії як об'єкта гідродинамічного диспергування і гомогенізації	57
1.2. Аналіз гіпотез диспергування жирової фази молока	60
1.3. Аналіз конструктивних особливостей гомогенізаторів і узагальнення переважних гідродинамічних факторів диспергування емульсій	76
1.4. Узагальнення механізмів руйнування жирових кульок молока	93
1.5. Аналіз теоретичних основ методології розрахунку ступеня дисперсності жирової фази після гомогенізації	99
1.6. Обґрунтування методів інтенсифікації процесу диспергування молочних емульсій	105
1.6.1 Використання роздільної гомогенізації	105
1.6.2 Накладання механічних коливань на емульсію, що обробляється	106
1.6.3. Використання резонансних явищ	107
1.6.4. Багатоступінчаста гомогенізація	111
1.6.5 Багатократна обробка	112
1.7. Перспективні напрями підвищення ефективності процесу гідродинамічного диспергування молочних емульсій	114
Висновки за розділом 1	119
РОЗДІЛ 2. ОРГАНІЗАЦІЯ ТА МЕТОДИКА ПРОВЕДЕННЯ ДОСЛІДЖЕНЬ	122
2.1. Загальна структура та методи проведення наукових досліджень	122

2.2. Методика комп'ютерного моделювання гідродинамічних показників емульсії	124
2.3. Основні фактори та критерії оптимізації теоретичних і експериментальних досліджень і їх взаємозв'язок	125
2.4. Програма теоретичних і експериментальних досліджень	130
2.5. Обґрунтування схем та конструкцій лабораторних установок для проведення експериментальних досліджень	133
2.6. Методика планування повнофакторного експерименту	140
2.7. Засоби контролю при проведенні експериментальних досліджень	143
2.8. Методика оцінювання якості гомогенізації	143
2.9. Статистична обробка результатів експериментального дослідження для визначення дисперсних показників жирової емульсії	147
Висновки за розділом 2	150
РОЗДІЛ 3 РОЗРОБКА МАТЕМАТИЧНОЇ МОДЕЛІ ГІДРОДИНАМІЧНОГО ДИСПЕРГУВАННЯ МОЛОЧНОГО ЖИРУ ЗА РАХУНОК ВІДНОСНИХ ШВИДКОСТЕЙ РУХУ ДИСПЕРСНОЇ ТА ДИСПЕРСІЙНОЇ ФАЗ МОЛОЧНОЇ ЕМУЛЬСІЇ	
3.1. Визначення дисперсності жирової фази молока в струминному гомогенізаторі	152
3.2. Комп'ютерне моделювання гідродинамічних параметрів струминної гомогенізації	160
Висновки за розділом 3	165
РОЗДІЛ 4 РОЗРОБКА МАТЕМАТИЧНОЇ МОДЕЛІ ГІДРОДИНАМІЧНОГО ДИСПЕРГУВАННЯ МОЛОЧНОГО ЖИРУ ПІД ВПЛИВОМ ПРИСКОРЕННЯ РУХУ МОЛОЧНОЇ ЕМУЛЬСІЇ В УМОВАХ БАГАТОКРАТНОЇ ОБРОБКИ І РЕЗОНАНСНИХ ЯВИЩ	
4.1. Розробка математичної моделі руйнування жирової кульки молока, що пов'язує відносну швидкість дисперсної та дисперсійної фаз з прискоренням руху молочної емульсії	166

4.2. Механізм руйнування і визначення дисперсності жирової фази молока за рахунок прискорення емульсії в пульсаційних апаратах	176
4.2.1. Визначення дисперсності жирової фази молока в процесі пульсаційної гомогенізації в умовах багатократної обробки	176
4.2.1.1 Механізм диспергування жирової фази молока при пульсаційній гомогенізації	176
4.2.1.2. Аналітичне визначення впливу подачі емульсії та кратності обробки на параметри пульсаційної гомогенізації	183
4.2.1.3. Аналітичне визначення дисперсності молочної емульсії при пульсаційній гомогенізації	188
4.2.2. Визначення дисперсності жирової фази молока в процесі пульсаційної гомогенізації в роторному апараті в умовах резонансних явищ	191
4.2.2.1. Аналітичне визначення зміни площі прохідного перетину модулятора пульсаційного апарата з ротором, що вібрує	192
4.2.2.2. Швидкість емульсії в отворах переривника	196
4.2.2.3. Синхронізація фаз обертання ротора та кривошипу	203
4.2.2.4. Визначення прискорення та дисперсності емульсії	214
Висновки за розділом 4	219
РОЗДІЛ 5 АНАЛІТИЧНЕ ВИЗНАЧЕННЯ ЕНЕРГОВИТРАТ ТА ОПТИМІЗАЦІЯ ПАРАМЕТРІВ РОТОРНОГО, ПУЛЬСАЦІЙНОГО ТА СТРУМИННОГО ГОМОГЕНІЗАТОРІВ	221
5.1. Енерговитрати процесу гідродинамічного диспергування жирової фази молока в роторному, пульсаційному та струминному гомогенізаторах	221
5.1.1. Енерговитрати струминної гомогенізації	221
5.1.2. Енерговитрати пульсаційної гомогенізації	228

5.1.3. Визначення енерговитрат гомогенізації в пульсаційному апараті з ротором, що вібрує	238
5.2 Оптимізація конструктивно-технологічних параметрів роторного, пульсаційного та струминного гомогенізаторів на основі розробленої математичної моделі диспергування	253
5.2.1. Оптимізація параметрів струминного гомогенізатора з роздільним подаванням жирової фази	253
5.2.2. Оптимізація параметрів пульсаційного поршньового гомогенізатора	256
5.2.2.1. Оптимізація частоти і амплітуди коливання поршня	256
5.2.2.2. Оптимізація конструктивних параметрів поршня	257
5.3. Оптимізація параметрів роторного пульсаційного апарата	263
Висновки за розділом 5	269
РОЗДІЛ 6 ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНІ ДОСЛІДЖЕННЯ	
ГІДРОДИНАМІЧНОГО ДИСПЕРГУВАННЯ ЖИРОВОЇ ФАЗИ	
МОЛОЧНОЇ ЕМУЛЬСІЇ	
6.1 Диспергування під впливом відносних швидкостей руху дисперсної та дисперсійної фаз в струминному гомогенізаторі	271
6.1.1. Визначення впливу швидкості знежиреного молока та відстані між направляючими на дисперсність молочної емульсії	271
6.1.2. Визначення впливу коефіцієнту струминного диспергування на середній розмір жирових кульок молока	272
6.1.3. Локалізація зони максимальної швидкості для подачі вершків	277
6.2 Диспергування жирової фази молока під впливом прискорення руху молочної емульсії в умовах багатократної обробки і резонансних явищ	277
6.2.1. Експериментальні дослідження впливу прискорення емульсії на дисперсні показники жирової фази молока в процесі пульсаційної гомогенізації	277

6.2.1.1. Вплив амплітуди і частоти коливання поршня пульсаційного гомогенізатора на дисперсність жирової фази молока	277
6.2.1.2. Залежність прискорення руху потоку емульсії та дисперсності жирової фази молока	279
6.2.1.3. Залежність дисперсності жирової фази молока та кратності її обробки	280
6.2.1.4. Вплив коефіцієнта живого перетину поршня на дисперсність жирової фази молока	282
6.2.2. Експериментальні дослідження дисперсності жирової фази молока при обробці в пульсаційному гомогенізаторі з ротором, що вібрує в умовах резонансних явищ	284
6.2.2.1. Диспергування в роторному апараті в умовах вібрації та багатократної обробки	284
6.2.2.2. Дослідження синхронізація фаз між обертанням ротора та кривошипу	292
6.2.2.3. Вплив амплітуди коливання ротора на середній діаметр жирових кульок молока	294
6.3. Енергетичні показники роторних, пульсаційних і струминних гомогенізаторів	297
6.3.1. Результати експериментальних досліджень енерговитрат струминної гомогенізації	297
6.3.2. Результати експериментальних досліджень енерговитрат поршньового пульсаційного апарата	300
6.3.3. Результати експериментальних досліджень енерговитрат роторно-пульсаційного апарата	305
6.4. Порівняння ефективності гомогенізуючих пристроїв за допомогою коефіцієнта гомогенізації	308
6.5. Дисперсні показники молочної емульсії після диспергування	309
Висновки за розділом 6	311

РОЗДІЛ 7. ПРОЕКТУВАННЯ І МЕТОДИКИ РОЗРАХУНКУ РОТОРНИХ, ПУЛЬСАЦІЙНИХ І СТРУМИННИХ ГОМОГЕНІЗАТОРІВ З УРАХУВАННЯМ РОЗРОБЛЕНОЇ МОДЕЛІ ДИСПЕРГУВАННЯ ТА ЕКОНОМІЧНА ЕФЕКТИВНІСТЬ ЇХ ВПРОВАДЖЕННЯ	314
7.1. Методики розрахунку розроблених гомогенізаторів	314
7.1.1. Методика розрахунку струминного гомогенізатора з використанням нормалізації молока за жирністю	315
7.1.2. Методика розрахунку пульсаційного апарата з ротором, що вібрує для гомогенізації молока	318
7.1.3. Методика розрахунку пульсаційного поршньового гомогенізатора молока	321
7.2. Синтез конструктивних рішень гідродинамічних гомогенізаторів, оснований на результатах теоретичних і експериментальних досліджень	324
7.2.1. Надання коливань емульсії, що обробляється та використання резонансних явищ	324
7.2.2. Підвищення відносної швидкості дисперсної та дисперсійної фаз за рахунок використання зустрічних струменів	326
7.2.3. Профілювання поверхонь, які формують потоки та струмені	330
7.3. Розробка промислових зразків гомогенізаторів молока	336
7.3.1. Струминний гомогенізатор з роздільною подачею жирової фази	336
7.3.2. Пульсаційний апарат з ротором, що вібрує	338
7.3.3. Пульсаційний поршньовий гомогенізатор	341

7.4. Економічна ефективність впровадження промислових зразків гомогенізаторів	345
Висновки за розділом 7	348
ВИСНОВКИ	350
СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ	354
ДОДАТКИ	392
Додаток А Види конструктивних рішень роторних апаратів за принципом створення кавітації	393
Додаток Б Математичний аналіз механізмів руйнування крапель	396
Додаток В Конструкції роторно-пульсаційних апаратів з інтенсифікацією процесу диспергування емульсій резонансними явищами	401
Додаток Г Аналіз досліджень впливу кратності на енерговитрати та прискорення потоку емульсії в клапанній щілині гомогенізатора	410
Додаток Д Акти впровадження результатів науково-дослідної роботи у навчальний процес	414
Додаток Ж Патенти за результатами досліджень дисертаційної роботи	418
Додаток З Акти впровадження результатів науково-дослідної роботи у виробництво	499
Додаток К Акти передачі науково-технічної документації	506
Додаток Л Розрахунок економічної ефективності впровадження струминного гомогенізатора молока з роздільною подачею жирової фази	512
Додаток М Розрахунок економічної ефективності впровадження пульсаційного апарата з ротором, що вібрує для гомогенізації молока	519

Додаток Н Розрахунок економічної ефективності впровадження поршньового пульсаційного апарату для гомогенізації молока	526
Додаток П Листи-підтримки проекту	533
Додаток Р Сертифікати та довідки учасника конференцій	535

ПЕРЕЛІК УМОВНИХ ПОЗНАЧЕНЬ ТА СКОРОЧЕНЬ

- ПА – пульсаційний апарат;
- РПА – роторно-пульсаційний апарат;
- ПА з ВР – пульсаційний апарат з ротором, що вібрує;
- ППГ – пульсаційний поршньовий гомогенізатор;
- СГРЖФ – струминний гомогенізатор з роздільною подачею жирової фази;
- We – критерій Вебера;
- We_k – критичне значення критерія Вебера;
- u – швидкість ковзання жирової кульки відносно оточуючого середовища, м/с;
- k_c – коефіцієнт струминного диспергування;
- $k_{сжс}, k_{сшс}$ – коефіцієнти впливу жирності, швидкості та діаметра каналу (струменя) подачі вершків відповідно;
- k_{cd}
- J_v – жирність вершків, %
- $J_{н.м}$ – жирність нормалізованого молока, %
- $J_{зн}$ – жирність знежиреного молока, %
- v_v – швидкості потоку вершків на виході з каналу подачі вершків, м/с
- $v_{зн}$ – швидкість потоку знежиреного молока, м/с;
- d_v – діаметр каналу подачі вершків, м;
- $Q_{зн}$ – подача знежиреного молока, м³/с;
- Q_v – подача вершків, м³/с;
- s_k – площа внутрішнього перерізу камери струминного гомогенізатора в місці найбільшого звуження, м²;
- a – ширина камери (відстань між направляючими) СГРЖФ, м;
- h – висота камери СГРЖФ, м;
- S_1, h_1 – координати зони найбільшої швидкості в камері СГРЖФ, м;

- $\Delta p_{згв}$ – надлишковий тиск знежиреного молока в камері СГРЖФ, Па;
- Δp_{ϵ} – надлишковий тиск в каналі подачі вершків СГРЖФ, Па;
- a_m – миттєве прискорення руху потоку емульсії молока, м/с²;
- a_e – середнє прискорення руху потоку емульсії молока, м/с²;
- K_h – коефіцієнт гомогенізації, який встановлює зв'язок між прискоренням емульсії молока та середнім діаметром жирової кульки;
- a_{omax} – максимальне значення миттєвого прискорення потоку емульсії в отворах поршня, м/с²;
- a_{omin} – мінімальне значення миттєвого прискорення потоку емульсії в отворах поршня, м/с²;
- v_Q – швидкість руху емульсії вздовж робочої камери, м/с;
- v_n – швидкість руху поршня ППГ, м/с;
- N – кількість отворів поршня ППГ;
- N_k – кількість каналів подачі вершків СГРЖФ;
- K – кратність проходження емульсії крізь отвори поршня ППГ (кратність обробки);
- K_{max} – максимальна кратність обробки, при якій досягається ефективність гомогенізації 90%;
- K_0 – коефіцієнт живого перетину отворів поршня;
- h_n – товщина поршня, м;
- μ – коефіцієнт витрат;
- τ – час процесу, с;
- μ_k, φ_k – коефіцієнти витрат, швидкості та стиснення камери СГРЖФ відповідно;
- ϵ_k
- $\mu_{\epsilon}, \varphi_{\epsilon}$ – коефіцієнти витрат, швидкості та стиснення для каналу подачі вершків у СГРЖФ відповідно;
- ϵ_{ϵ}
- z_p, z_c – кількість отворів ротора і статора;

- d_p, d_c – діаметри отворів ротора і статора, м;
- d_o – діаметр отворів поршня, м;
- ω_p, ω_k – кутова швидкість обертання відповідно ротора та кривошипу приводу коливальних рухів ротора вздовж вісі обертання, рад/с;
- ω – кутова швидкість обертання кривошипу ПА з ВР, рад/с;
- n_k, n_p – частота обертання кривошипу та ротору ПА з ВР, об/хв;
- R, D – радіус і діаметр ротора ПА з ВР, м;
- D_n – діаметр поршня, м;
- r – радіус кривошипу, м;
- s – амплітуда коливання (пульсацій) робочих органів гомогенізаторів (ротора ПА з ВР вздовж осі обертання або поршня ППГ), м;
- l_c, l_p – довжина каналів відповідно статора і ротора, м;
- δ – зазор між ротором та статором, м;
- α – кут повороту кривошипу ППГ, град;
- φ, β – кут повороту відповідно ротору та кривошипу ПА з ВР, рад;
- $\varphi_{ш}$ – коефіцієнт швидкості;
- β_c – кут зсуву фаз між обертанням ротора та кривошипу ПА з ВР, рад;
- v_o^n – швидкість емульсії при коливальних осьових рухах ротора, не враховуючи відцентровий тиск рідини, що створюється при обертанні ротора ПА з ВР, м/с;
- v_o^e – швидкість емульсії при проходженні переривника ПА з ВР, що викликана тільки відцентровими силами, м/с;
- v_o – швидкість емульсії у робочих органах гомогенізаторів (переривнику ПА з ВР або отворах поршня ППГ), м/с;
- $Q_p(t)$ – витрата емульсії, що витісняється ротором ПА з ВР при його коливальних рухах, м³/с;

- $Q_o(t)$ – витрата емульсії крізь переривник ПА з ВР за рахунок осьових коливань ротора, м³/с;
- Q_o – сумарна миттєва витрата емульсії крізь переривник ПА, м³/с;
- Q – подача молока (продуктивність гомогенізатора), м³/с;
- Q_c – середня витрата рідини через отвори поршня, м³/с;
- S – площа модулятора ПА з ВР, м²;
- ΔP – перепад тиску між входом до каналу ротора та виходом з каналу статора, Па;
- ζ_{max} – максимальний гідравлічний опір (коефіцієнт місцевого гідравлічного опору пари "канал ротора – канал статора" при закритих каналах);
- H – висота ротора, м;
- h_p – товщина ротора, м;
- m – маса ротора, кг;
- m_n – маса поршня, кг;
- C – коефіцієнт опору руху тіла;
- P_o – потужність, що витрачається електродвигуном приводу обертання ротора ПА з ВР, Вт;
- P_v – потужність, що витрачається електродвигуном приводу вібрації ротора ПА з ВР, Вт;
- P_c – потужність СГРЖФ, Вт;
- P_{zn} – потужність насоса подачі знежиреного молока, Вт;
- P_{nv} – потужності насоса подачі вершків, Вт;
- P_Σ – споживана потужність ПА з ВР в резонансному режимі роботи, Вт;
- P – сумарна потужність, що споживається ППГ, Вт;
- P_i – потужність, що витрачається на подолання сил інерції, що виникають під час зворотно–поступального руху поршня і штока, Вт;

- P_{op} – потужність, що витрачається на подолання опору поршня під час руху в робочому середовищі апарата, Вт;
- $\rho_{пл}$ – густина плазми молока, кг/м³;
- $\rho_{жс}$ – густина молочного жиру, кг/м³;
- ρ_m – густина молока, кг/м³;
- ρ_n – щільність матеріалу поршня, кг/м³;
- σ – поверхневий натяг жирової кульки, Н/м;
- $E_{пит}$ – питомі енерговитрати гомогенізації, Дж/кг;
- E – енерговитрати на гомогенізацію, Дж;
- T – температура гомогенізації, °С;
- χ – показник стабільності емульсії молока;
- d_k – середній діаметр жирової кульки після гомогенізації, мкм ;
- d_m – середній діаметр жирових кульок молока до гомогенізації, мкм;
- $\sigma_{жс-n}$ – поверхневий натяг на границі фаз жир - плазма, Н/м;
- σ_n – поверхневий натяг на границі фаз повітря - плазма, Н/м;
- $\sigma_{жс}$ – поверхневий натяг на границі фаз повітря - жир, Н/м;
- $\mu, \mu_{пл}, \mu_{жс}$ – динамічна в'язкість молока, плазми та молочного жиру, відповідно, Па·с;
- $\nu, \nu_{пл}, \nu_{жс}$ – кінематична в'язкість молока, плазми та молочного жиру відповідно, м²/с;
- $\mu, \mu_{пл}, \mu_{жс}$ – динамічна в'язкість молока, плазми та молочного жиру, відповідно, Па·с;
- E_{ϕ} – ефективність гомогенізації, м·кВт/(с²·т);
- c – швидкість звуку в двофазному середовищі, м/с;
- f_c, f_k, f_p – відповідно частоти озвучування статора, власна частота, ротора, Гц;

ВСТУП

Актуальність теми. На сьогодні виробництво молока і молокопродуктів в Україні є одним із найбільш перспективних напрямів розвитку в аграрному секторі, а молоко в структурі валового продукту сільського господарства держави займає другу позицію. Активно відбувається диверсифікація географії експорту молочних продуктів. Урядом країни одним із пріоритетних напрямів розвитку в 2018 році обрано нарощування об'єму виробництва молока. Тому молочна галузь на сучасному етапі є однією із провідних у структурі харчової індустрії України, а виробництво молока стало невід'ємною складовою забезпечення національної продовольчої безпеки держави. Незважаючи на це, виробництво молочної продукції залишається на низькому рівні, а виробничі потужності молокопереробних підприємств країни задіяні лише на 30–40%, що викликано нестачею як внутрішнього так і зовнішніх ринків збуту молочної продукції. Для підвищення об'ємів її продажу в сучасних умовах високої конкуренції необхідне зниження собівартості виробництва шляхом використання енергоефективних процесів і технологій. Ця ситуація створює проблему харчової промисловості України, яка полягає в недостатній техніко-технологічній ефективності виробництва питного молока та молочних продуктів, що значною мірою обумовлено низькою енергоефективністю технологічних процесів їх промислового виробництва.

Одним з найбільш енерговитратних процесів переважної більшості технологічних схем виробництва молока та молочних продуктів є гомогенізація. Питоме енергоспоживання найбільш поширених – клапанних гомогенізаторів – сягає 7–8 кВт·год/т і є найбільшим серед обладнання для механічної обробки молока. Розрахунки показують, що при зниженні питомої енергоємності до 1,5–2 кВт·год/т, при об'ємах виробництва молочної продукції в Україні на рівні минулого року, економія лише електроенергії складає не менше 19 млн грн. Тому вирішення проблеми високих енерговитрат процесу гомогенізації в сучасних реаліях зростання цін на енергоносії шляхом підвищення ефективності диспергування молочного жиру відрізняється високою актуальністю.

При аналізі наукових робіт щодо диспергування жирової фази молока вчених Н.В. Барановського, В.В. Вайткуса, В.Я. Грановського, А.А. Долинського, М.М. Ліпатова, Є.В. Нужи́на, М.М. Орешіної, Є.О. Фіалкової, F. Innings, T. Glawdel, C. Liu, Y. Lu, C. Trägårdh та інших було визначено більше 7 основних гіпотез гомогенізації та більше 12 можливих механізмів руйнування жирових часток, переважна частина яких суперечать і протиставляються одна одній. На сьогоднішній час відсутні узагальнюючі теорії, механізми та методики розрахунку гомогенізаторів різних конструкцій на задану міру дисперсності, а існуючі отримані в основному емпіричним шляхом, не є універсальними і використовуються лише для конструктивних рішень певного типу. Тому науково-технічна проблема полягає в недостатньому розвитку науково-теоретичних основ гідродинамічного диспергування жирової фази молока. Розв'язання цієї проблеми дозволить розробити гомогенізатори з високою енергетичною ефективністю, використання яких призведе до зниження собівартості виробництва питного молока та молочних продуктів, які виробляються із використанням гомогенізації.

Зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами. Робота проводилась у рамках наукових досліджень кафедри обладнання переробних і харчових виробництв імені професора Ф.Ю. Ялпачика Таврійського державного агротехнологічного університету відповідно до програм науково-дослідних робіт на 2011–2015 рр. «Розробка наукових основ систем технологій і технічних засобів для забезпечення продовольчої безпеки Південного регіону України» (тема 1.6 «Розробка технологій і технічних засобів для переробки і зберігання сільськогосподарської продукції», № 0107U008964) та на 2016–2020 рр. «Розробка технологій і технічних засобів для переробки і зберігання сільськогосподарської продукції та процесів і обладнання харчових виробництв» (тема 3 «Підвищення ефективності процесів та обладнання для диспергування та гомогенізації харчових емульсій і змішування рідких компонентів», № 0116U002729).

Концептуальна гіпотеза роботи пролягає у розвитку теорії гідродинамічного диспергування молочної емульсії, що ґрунтується на створенні відносної швидкості дисперсної та дисперсійної фаз та зв'язку цього чинника з прискоренням руху потоку емульсії. Оптимізація процесу диспергування з метою підвищення прискорення потоку емульсії при використанні знаковмінних пульсацій, накладання механічних коливань, створення умов для виникнення резонансних явищ та оптимізації кратності обробки продукту та відносної швидкості фаз емульсії при реалізації способу подачі жирової фази у потік знежиреного молока дозволить підвищити енергоефективність гомогенізаторів молока.

Мета і задачі дослідження. Метою роботи є розвиток наукових основ гідродинамічного диспергування жирової фази молочної емульсії для зниження енерговитрат процесу гомогенізації молока. Для досягнення поставленої мети були поставлені та вирішені такі задачі дослідження:

- провести аналіз конструктивних особливостей гомогенізаторів емульсій, гіпотез і теорій гомогенізації, механізмів руйнування крапель, переважних гідродинамічних явищ, які призводять до руйнування жирових кульок молока та методик розрахунку гомогенізаторів, визначити методи інтенсифікації процесу диспергування жирової фази молочної емульсії та встановити узагальнюючі показники підвищення ефективності цього процесу та відповідні енергоефективні конструктивні рішення гомогенізаторів;

- розробити математичну модель диспергування жирової фази молочної емульсії, що пов'язує відносну швидкість дисперсної та дисперсійної фаз з прискоренням руху та дисперсністю молочної емульсії;

- обґрунтувати узагальнюючий показник для кількісної характеристики впливу додаткових умов ефективності процесу диспергування жирової фази молочної емульсії на її дисперсність;

- розробити математичні моделі гідродинамічного диспергування жирової фази молочної емульсії, які пов'язують технологічні, конструктивні, кінематичні, режимні та гідравлічні параметри з енергетичними та якісними

показниками процесу диспергування в струминному та пульсаційних гомогенізаторах молока, здійснити експериментальну перевірку та уточнення розроблених математичних моделей;

– встановити енергоефективні (при забезпеченні необхідних дисперсних показників) параметри та режими роботи струминного та пульсаційних гомогенізаторів молока;

– розробити методики та рекомендації для розрахунку й обґрунтувати конструктивні рішення промислових зразків струминного та пульсаційних гомогенізаторів молока;

– здійснити заходи щодо впровадження результатів досліджень у виробництво і оцінити техніко-економічну ефективність використання розроблених гомогенізаторів молока.

Об'єктом дослідження є процес гідродинамічного диспергування молочної емульсії.

Предметом дослідження є технологічні, конструктивні, кінематичні та гідродинамічні параметри гомогенізаторів у взаємозв'язку з енергетичними та якісними показниками процесу диспергування молочної емульсії.

Методи дослідження. Теоретичні залежності параметрів диспергування визначались за допомогою класичних залежностей гідравліки та механіки, теорії дискретно-імпульсного введення енергії, коливань консервативних лінійних систем та прикладного програмування COSMOSFloWorks разом з програмою геометричного проектування SolidWorks та програмного комплексу ANSYS для дослідження гідродинаміки у віртуальному середовищі. Для знаходження оптимальних параметрів процесів використано графічний метод двопараметричної та аналітичні методи локальної оптимізації. Відбір проб, фізико-хімічні та органолептичні показники молока визначалися згідно ДСТУ ISO 11870:2007, ДСТУ ISO 488:2007, ДСТУ 8553:2015, ДСТУ ISO 707:2002, ISO 5538:2004. Дисперсні характеристики жирової фази молочної емульсії визначали методом оптичної мікроскопії з використанням цифрової камери. Для аналізу зображень використано програмний модуль, який реалізовано в

середовищі Microsoft Visual Studio із застосуванням набору бібліотек OpenCV Sharp. Ефективність гомогенізації визначали методом центрифугування. Експериментальні дані обробляли за допомогою методів математичної статистики з використанням табличного процесора Microsoft Excel та програмного забезпечення Mathcad.

Наукова новизна одержаних результатів.

Вперше:

– розроблено теорію гідродинамічного диспергування молочної емульсії, яка ґрунтується на кореляції прискорення руху потоку емульсії з її відносною швидкістю дисперсної та дисперсійної фаз і критерієм Вебера;

– науково обґрунтовано та запропоновано використання показника «коефіцієнт гомогенізації», який пов'язує прискорення руху емульсії з середнім діаметром жирової частки молочної емульсії і характеризує додаткові гідродинамічні умови процесу диспергування жирової фази молочної емульсії;

– розроблено безперервну математичну функцію для опису процесу зміни площі прохідного перерізу модулятора роторно-пульсаційного апарата (РПА) для умов застосування отворів круглої форми та рівності кількості отворів ротора і статора, що дозволило розробити математичну модель руху рідини у модуляторі пульсаційного апарата з ротором, що вібрує (ПА з ВР);

– визначені умови виникнення бажаних резонансних явищ пульсацій емульсії в модуляторі ПА з ВР, викликаних відцентровим тиском при обертанні та осьовими коливаннями ротора, які призводять до підвищення ефективності диспергування молочної емульсії;

– розроблено математичну модель гомогенізації молока в ПА з ВР, яка пов'язує основні технологічні, конструктивні, кінематичні та енергетичні показники ПА з ВР з дисперсністю жирової емульсії при забезпеченні умов резонансних явищ;

– науково обґрунтовано та запропоновано використання показника «коефіцієнт диспергування» для умов подачі жирової фази молочної емульсії у потік знежиреного молока, визначення якого дозволило встановити критичне

значення критерія Вебера для руйнування жирової кульки молока в потоці молочної плазми;

– розроблено математичну модель диспергування жирової фази молока в струминному гомогенізаторі з роздільним подаванням жирової фази (СГРЖФ) з одночасною нормалізацією молока за жирністю.

Удосконалено:

– математичну модель диспергування молочної емульсії в ППГ шляхом врахування кратності проходження емульсії крізь отвори поршня та впливу цього параметру на дисперсні та енергетичні показники диспергування;

– теорію гідродинамічного диспергування струминних гомогенізаторів при подачі струменя вершків у потік знежиреного молока врахуванням впливу жирності вершків, діаметра каналу подачі та швидкості струменя вершків.

Набули подальшого розвитку:

– уявлення про закономірності диспергування жирової фази молока в умовах руху молочної емульсії з прискоренням;

– математична модель диспергування жирової фази молока при пульсаційній гомогенізації за рахунок аналітично визначеного та експериментально перевіреного на адекватність зв'язку між технологічними, конструктивними, кінематичними та енергетичними показниками пульсаційного поршньового гомогенізатора (ППГ) з дисперсністю жирової емульсії.

Практичне значення одержаних результатів:

– визначені значення коефіцієнтів гомогенізації для СГРЖФ, ППГ, ПА з ВР і клапанного гомогенізатора, за допомогою яких можливо прогнозувати ефективність пристроїв для гідродинамічного диспергування молочної емульсії;

– встановлені оптимальні технологічні, конструктивні та кінематичні параметри СГРЖФ, ППГ, і ПА з ВР за умови високої енергоефективності їх роботи;

– розроблено методики розрахунків та промислові зразки СГРЖФ, ППГ і ПА з ВР для отримання дрібнодисперсної молочної емульсії та зниженими питомими енерговитратами;

– розроблено технічну документацію на виготовлення СГРЖФ, ППГ і ПА з ВР, яку передано до впровадження у виробництво в ТОВ «Продмашпроект» (акт впровадження від 21.03.2014) та ПП ВКФ «Харчоналадка» (акти впровадження від 26.04.2018 і 09.05.2018);

– здійснено впровадження у виробництво СГРЖФ, ППГ і ПА з ВР на приватному підприємстві «Молокозавод-ОЛКОМ» (м. Мелітополь Запорізької області, акти впровадження від 09.10.2010 р., 12.04.2016 р. і 12.06.2018 р.) та ТОВ МЖК «Південний» (м. Мелітополь Запорізької області, акт впровадження від 02.07.2018), економічний ефект від якого становить 265740–362945 грн/рік;

– результати наукових досліджень використано в навчальному процесі Таврійського державного агротехнологічного університету (м. Мелітополь Запорізької обл.) при викладанні дисциплін «Технологічне обладнання переробних і харчових виробництв», «Процеси і апарати харчових виробництв», «Технологічне обладнання підприємств з переробки продукції тваринництва» (акти впровадження від 06.11.2015, 12.03.2017, 12.03.2017).

На технічні рішення, запропоновані в дисертаційній роботі, отримано 15 патентів України на корисну модель №№ 66085, 94041, 94048, 98488, 106554, 107458, 106522, 106521, 106533, 106536, 112317, 119871, 121278, 121949, 122548.

Особистий внесок здобувача. Докторантом здійснено: аналіз досліджень процесу і встановлення закономірностей руйнування жирових кульок молока; постановку задач досліджень, розробку теорії гомогенізації, що базується на прискоренні потоку емульсії, розробку математичних моделей гомогенізації в струминному, пульсаційному гомогенізаторах і пульсаційному апараті з ротором, що вібрує, планування експериментальних досліджень, узагальнення отриманих результатів, формулювання висновків.

Апробація результатів дисертації. Основні положення дисертаційної роботи доповідалися, обговорювалися та були схвалені на: VII Міжнародній науково-практичній конференції «Проблеми харчових технологій і харчування: сучасні виклики і перспективи розвитку» (Донецьк-Святогірськ, 2011 р.),

Міжнародній науково-практичній конференції «Состояние, достижения и перспективы переработки, стандартизации и сертификации материалов» (Херсон, 2012 р.), IV–VI Міжнародних науково-практичних конференціях «Інноваційні енерготехнології» (Одеса, 2013, 2015, 2017 рр.), Міжнародній науково-практичній конференції, присвяченій 75-річчю з дня народження ректора університету, д.т.н., проф., чл.-кор. ВАСГНІЛ Беляєва М.І. «Прогресивна техніка та технології харчових виробництв, ресторанного та готельного господарств і торгівлі. Економічна стратегія і перспективи розвитку сфери торгівлі та послуг» (Харків, 2013 р.), VII, XVI Міжнародній науково-практичній конференції «Научные перспективы XXI века. Достижения и перспективы нового столетия» (Новосибірськ, 2014 р.), I і II Міжнародних науково-практичних конференціях «Інноваційні аспекти розвитку обладнання харчової і готельної індустрії в умовах сучасності» (Мелітополь-Кирилівка, 2015, 2017 рр.), XV, XVI Міжнародних наукових конференціях «Удосконалення процесів і обладнання харчових та хімічних виробництв» (Одеса, 2014, 2016 рр.), Міжнародній науково-практичній конференції «Розвиток харчових виробництв, ресторанного та готельного господарств і торгівлі: проблеми, перспективи, ефективність» (Харків, 2016 р.), V Всеукраїнській науково-практичній конференції «Підвищення ефективності діяльності підприємств харчової та переробної галузей АПК» (Київ, 2016 р.), IV науковій конференції «Фундаментальні та прикладні дослідження у сучасній науці» (Харків, 2016 р.), IV Міжнародній науково-практичній конференції «Перспективи розвитку сучасної науки» (Львів, 2016 р.), Республіканській конференції «Применение безотходных и экологически чистых технологии в пищевой и химической промышленности» (Узбекістан, 2017 р.), Міжнародній науково-практичній конференції, присвяченій 50-річчю заснування Харківського державного університету харчування та торгівлі: «Розвиток харчових виробництв, ресторанного та готельного господарств і торгівлі: проблеми, перспективи, ефективність» (Харків, 2017 р.), Всеукраїнській науково-технічній конференції «Сучасні аспекти розвитку техніки, енергетики та транспорту в АПК» (Вінниця, 2017 р.), VII Міжнародній науково-практичній конференції «Наукові здобутки у

вирішенні актуальних проблем виробництва та переробки сировини, стандартизації і безпеки продовольства» (Київ, 2017 р.), Всеукраїнській науково-практичній конференції «Фундаментальна підготовка фахівців у природничо-математичній, технічній, агротехнологічній та економічній галузях» (Мелітополь, 2017 р.), XVI Міжнародній науково-технічній конференції «Вібрації в техніці та технологіях» (Вінниця, 2017 р.), XI Міжнародній науково-практичній конференції «Проблеми конструювання, виробництва та експлуатації сільськогосподарської техніки» (Кропивницький, 2017 р.), Міжнародній науково-практичній інтернет-конференції «Інноваційні технології виробництва та переробки тваринницької продукції» (Вінниця, 2017 р.), Міжнародній науково-практичній конференції «Сучасні методики, інновації та досвід практичного застосування у сфері технічних наук» (Республіка Польща, Люблін, 2017 р.), Міжнародній науково-практичній конференції «Соціально-економічний розвиток аграрної сфери: інженерно-економічне забезпечення» (Бережани, 2018 р.), Міжнародній науково-практичній конференції «The development of technical Sciences: problems and solutions» (Brno, 2018 р.), Міжнародній науково-практичній конференції «Агроекологічні аспекти виробництва та переробки продукції сільського господарства» (Мелітополь-Кирилівка, 2018 р.), Міжнародних науково-практичних конференціях ТДАТУ «Проблеми та перспективи сталого розвитку АПК» (Мелітополь, 2009–2017 рр.) і конференціях професорсько викладацького складу Донецького державного університету економіки і торгівлі імені Михайла Туган-Барановського (Донецьк, 2011, 2012 рр.).

Публікації. За матеріалами дисертаційної роботи опубліковано 91 наукова праця, в тому числі: 1 монографія; 43 статті, серед яких 28 – у наукових фахових виданнях України (з них 6 – у виданнях, що включені до міжнародних наукометричних баз), 4 – у наукових періодичних виданнях інших держав з напрямку, із якого підготовлено дисертацію (з них 2 – у виданнях, що включені до міжнародних наукометричних баз); 15 патентів України на корисну модель; 29 тез доповідей та матеріалів конференцій; 3 навчальних посібника.

Структура та обсяг дисертації. Робота складається з анотації, вступу, семи розділів, висновків, списку використаних джерел з 347 найменувань (у тому числі 77 іноземних) та додатків. Основний зміст дисертації становить 309 сторінок друкованого тексту, де розміщено 152 рисунка і 24 таблиці.

РОЗДІЛ 1

ЗАГАЛЬНІ ЗАКОНОМІРНОСТІ КОНСТРУКЦІЙ ПРИСТРОЇВ ДЛЯ ГОМОГЕНІЗАЦІЇ ТА УЗАГАЛЬНЕННЯ ПРИНЦИПІВ, МЕХАНІЗМІВ І ГІПОТЕЗ ДИСПЕРГУВАННЯ МОЛОЧНОГО ЖИРУ

Під гомогенізацією молока розуміють процес його обробки, який призводить до диспергування жирової (дисперсної) фази і рівномірного розподілу її по об'єму дисперсійної фази [106].

На сьогодні переважна більшість молока як сировини для виробництва питного молока, вершків та інших видів молочної продукції піддається гомогенізації. Основні переваги продуктів, що виробляються з використанням гомогенізації надані в табл. 1.1 [39, 54, 106, 187, 338, 347].

Таблиця 1.1

Переваги гомогенізованої молочної продукції

Вид молочної продукції	Переваги продукту після гомогенізації
1	2
Незбиране молоко після надою	Зменшення розвитку окислювальних процесів, дестабілізації та підзбивання при інтенсивному перемішуванні та транспортуванні
Молоко та вершки пастеризовані	Надання однорідності кольору, смаку, жирності; покращення консистенції, підвищення інтенсивності білого кольору; зменшення жирової плівки при кип'ятінні, що зберігає сухі речовини молока; збільшення засвоюваності (по показнику перетравлювання жиру гомогенізоване молоко відповідає кип'яченому)
Молоко та вершки стерилізовані	Підвищення стійкості при зберіганні, зменшення відстоювання жиру
Кисломолочні продукти (сметана, кефір, йогурт і інш.)	Підвищення міцності згустку, стійкості і поліпшення консистенції білкових згустків, підвищення в'язкості, зменшення виділення сироватки

1	2
Згущені молочні консерви	Запобігання виділенню жирової фази при тривалому зберіганні
Сухе незбиране молоко	Зниження кількості вільного молочного жиру, не захищеного білковими оболонками, що призводить до швидкого його окислення під дією кисню атмосферного повітря
Відновлені молоко, вершки і кисломолочні напої	Створення наповненості смаку продукту і попередження появи водянистого присмаку
Молоко з наповнювачами	Поліпшення смаку, підвищення в'язкості і зниження вірогідності утворення осаду
Деякі тверді сири	Полегшення доступу ліпаз плісняв до молочного жиру в період дозрівання сирів [15]
Деякі сири з рекомбінованого молока та деякі свіжі кисломолочні сири (Вершковий і інш.)	Запобігання відстоюванню жирового шару під час відносно тривалого періоду гелеутворення, сприяння поліпшенню однорідності продукту, а також формуванню рихлої і ламкої текстури [15]
Молочні суміші для виробництва морозива	Покращення збивання сумішей для виробництва морозива, його структури та однорідності

Крім молочної промисловості приготування високодисперсних емульсій, стабільних протягом тривалого часу, широко використовується при отриманні:

- сумішей для морозива (підготовка суміші "молочна основа - рослинний жир");
- майонезів, маргаринів, кетчупів і т.п. продуктів;
- антипригарних емульсій (шарів) для змащування хлібних форм і листів;
- емульсій для обробки поверхні сільськогосподарської продукції – створення на їх поверхні плівкоутворюючого захисного шару ;
- варених ковбас, при введенні жиру-сирця у фарш у вигляді водно-жирової емульсії;
- тіста при введенні емульсії замість жиру, завдяки чому зберігається до 90% жиру [193];

- косметичних і фармакологічних препаратів, в яких емульсії швидше всмоктуються організмом, пом'якшують подразнюючий вплив інгредієнтів;
- лікувальних масел, які втрачають неприємний смак і запах;
- отриманні емульсії на основі застосування знежиреного молока шляхом додавання жиру і інших необхідних інгредієнтів при виробництві замінників незбираного молока [135, 305].

Крім переваг, гомогенізація молочних продуктів має і недоліки :

- підвищення собівартості продукта;
- підвищення чутливості до світла, яке призводить до вад смаку, таких як прогірклість, мильність і окислення;
- молоко стає непридатним для виробництва багатьох видів твердих сирів, завдяки надто м'якої коагуляції та труднощів вологовіддачі;
- незбиране молоко непридатне для гомогенізації через швидке погіршення аромату через дію ліпази.

1.1 Властивості молочної емульсії як об'єкта гідродинамічного диспергування і гомогенізації

Дисперсійною фазою молочної емульсії є плазма молока, яка представляє собою розчин молочного цукру і солей у воді. Деякі автори [14, 44, 82, 133] виділяють ще третю фазу молока – білкову, що складається переважно з нерозчинних міцел і субміцел казеїну, а також сироваткових білків.

Рівномірності розподілу мікроскопічних жирових часток не приділяється особлива увага завдяки їх постійному (броунівському) руху, завдяки чому концентрація жиру в мікрооб'ємі молочної емульсії вирівнюється без докладання спеціальних засобів і умов [211, 215].

Жирова фаза молока представляє собою молочний жир у вигляді жирових кульок (крапель, часток), розмір яких у незбираному молоці коливається у широких межах 0,1–10 мкм [4, 179, 319, 344,]. Переважна маса жирових кульок такого молока має розміри 2–6 мкм, а середній їх розмір 2–4 мкм [82, 100, 216]. Кількість жирових кульок у необробленому молоці становить 1,5–3,0 млрд. в 1

мл. В процесі гомогенізації середній діаметр жирових кульок зменшується до 0,75-1,2 мкм, при цьому кількість жирових кульок зростає до 40–80 млрд. в 1 мл, а площа поверхонь жирових кульок збільшується в 13–27 разів.

Стандартів і нормативів, які регламентують ступінь дисперсності жирових часток молока після гомогенізації, не існує. Єдиним стандартом з гомогенізації є ГОСТ 27203-87 "Гомогенизаторы для молока. Основные параметры", який регламентує лише основні технічні показники плунжерних гомогенізаторів клапанного типу без урахування ступеня дисперсності молочного жиру після обробки. Для визначення достатньої дисперсності жирової фази після гомогенізації існують такі орієнтири:

- інструкція по хімічному контролю [173], в якій перевірку якості гомогенізації рекомендують проводити за відстоюванням жиру протягом 48 годин або методом центрифугування, причому зазначено, що найбільш надійним вважається метод мікроскопічного визначення розмірів жирових кульок;

- середній розмір жирових кульок в найбільш розповсюджених – клапанних гомогенізаторах, який сягає 0,75–0,80 мкм при режимах роботи, спрямованих на максимальний ступінь дисперсності [74, 210, 322];

- середній розмір жирових кульок після обробки в клапанних гомогенізаторах згідно рекомендованих режимів гомогенізації (тиску) в технологічних схемах виробництва питного молока і вершків, який вважається достатнім, становить 1,0–1,2 мкм [210, 338];

- нижня границя дисперсності жирової емульсії молока після обробки в серійних але менш розповсюджених типах гомогенізаторів (вакуумних, роторно-пульсаційних тощо) становить 1,0–1,2 мкм [210, 212, 322, 323];

- у відповідності з United States Public Health Service, у добре гомогенізованому молоці протягом 48 годин не з'являється видимого відстоювання вершків;

- вміст жиру у верхніх 100 мл пляшки обсягом 250 мл не повинен відрізнитись більше ніж на 10% від молока, що знаходиться у решті пляшки [21].

Таким чином, можна вважати, що дисперсність молочної емульсії є високою при середніх розмірах жирових кульок 0,75–0,8 мкм і менше, а достатньою при досягненні середнього діаметру 1,2 мкм.

Білкова фаза молока має розміри близько 0,1 мкм (від 40 до 300 нм) і при гомогенізації частково подрібнюється, але причиною є не гідродинамічні, а переважно адсорбційні сили [82]. В необробленому молоці на поверхні жирових кульок адсорбуються близько 2–3% білка, а після гомогенізації – до 25%, тобто відбувається перерозподіл білка між плазмою та оболонками жирових кульок. Товщина оболонки жирових кульок молока після гомогенізації зменшується, а після вистоювання збільшується і наближується до товщини оболонки жирових кульок у незбираному молоці [179]. Жирова кулька має складну будову, стосовно якої немає єдиного погляду [89, 179, 238, 322,]. Внутрішня частина жирової кульки представляє собою легкоплавкі жири, ближче до поверхні розташовані тугоплавкі жири. Оболонка, яка покриває жири, має тонку мембрану, що складається з ліпопротеїдних часток [11]. На зовнішній частині оболонки адсорбуються міцели і субміцели білків плазми (рис. 1.1) [27, 49].

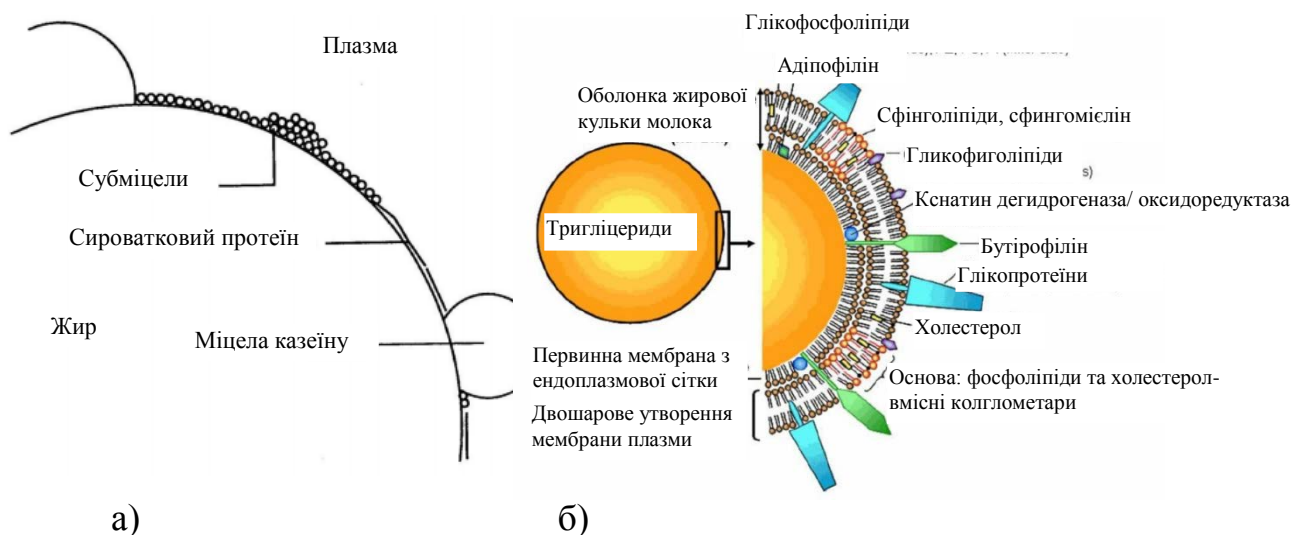


Рис. 1.1. Жирова кулька молока: а) характерні розміри мембрани жирової кульки молока, б) будова жирової кульки

Таким чином внаслідок складності будови жирової кульки і її оболонки, склад, властивості і розміри яких значно змінюються в процесі гомогенізації, не вірно визначати характеристикою міцності жирової кульки лише поверхневий натяг.

В процесі гомогенізації важливо не допускати дестабілізації молочного жиру і коалесценції жирових часток. Стабільність дисперсної фази порушується при:

- будь-якій механічній обробці молока (перекачування, транспортування, очищення тощо);
- змінам кислотності молока за границі рН 6,0–7,0;
- заморожуванні та відтаюванні;
- підвищенні концентрації жиру;
- зіткненні жирових часток або їх агломератів в процесі гомогенізації.

Вірогідність зіткнення жирових кульок підвищується при використанні таких типів гомогенізаторів, яка, наприклад, протитечійно-струминні [148, 263, 264].

Підвищити стабільність жирової фази молока можливо додаванням емульгаторів, наявність яких зменшує поверхневий натяг складових молока [56, 106]

1.2. Аналіз гіпотез диспергування жирової фази молока

Диспергування складається з двох етапів: деформації жирової кульки, її руйнування [62]. Після диспергування знов утворена жирова кулька повинна бути стабілізована. В протилежному випадку може відбутися процес її коалесценції.

Процес деформації та руйнування жирових кульок молока важко піддається експериментальному вивченню [37] (таблиця 1.2).

**Основні причини труднощів отримання візуальних даних руйнування
жирових кульок молока під час гомогенізації**

Основні причини	Можливий спосіб вирішення проблеми
Високі швидкості руху жирових часток (до 200 м/с)	Швидкісна кінозйомка
Мікроскопічні розміри жирових кульок (0,1–5 мкм)	Оптична або електронна мікроскопія
Низька прозорість молочної емульсії	Спеціальні барвники
Мала різниця густини молочної плазми та молочного жиру	
Необхідність у розташуванні об'єктиву оптичного мікроскопу на відстані менше 1 мм від об'єкта дослідження	Виконання об'єктиву як частини робочого органу гомогенізатора
Велика довжина зон руйнування жирових кульок відносно їх розмірів (на 3 порядки більше діаметра жирової кульки)	Використання пульсуючих мікролазерів

Нестача необхідних експериментальних даних призвела до появи багатьох гіпотез механізму диспергування жирової фази молока (гомогенізації), основні з яких представлені в таблиці 1.3.

Таблиця 1.3

Основні гіпотези механізму гомогенізації молока

Сутність гіпотези	Автори гіпотези	Літературні посилання
1	2	3
Руйнування жирових кульок під впливом дії повздовжнього градієнта швидкості потоку на вході у клапанну щілину	М.В. Барановський	[92]
Руйнування під впливом поперечного градієнту швидкості потоку	П.О. Ребіндер, Г. Віттіг	[75, 76, 240, 325];
Руйнування за рахунок відцентрової сили при обертанні жирової кульки	В.Д. Сурков	[315];
Руйнування за рахунок турбулентності	Колмогоров-Хінце	[30, 185, 328];

1	2	3
Руйнування за рахунок кавітації	А. А. McKillop, Г.А. Кардашев, А.Н. Ткаченко і інш.	[53, 110, 122, 198, 320];
Руйнування здуванням з поверхні жирової кульки мікрочасток при імпульсних впливах на емульсію	М.М. Орешина	[212, 215, 213, 217];
Руйнування за рахунок низькотемпературної кавітаційної гомогенізації	Є.А. Фіалкова	[322, 323];
Руйнування скипанням мікрооб'ємів емульсії в вакуумі	А.А. Долинський	[157– 163];
Руйнування за рахунок різниці швидкостей між жировою кулькою і дисперсійним середовищем в зоні зіткнення струменів	К.О. Самойчук	[263, 264].

Сутність та достовірність більшості теорій розглянемо на прикладі найбільш вивчених клапанних гомогенізаторів, ступінь диспергування у яких, безумовно, найвищий. Руйнування жирової кульки в клапанному гомогенізаторі відбувається в зазорі між клапаном та сідлом гомогенізуючої головки, величина якої 0,3–1,5 мм. Тиск подачі молока становить 10–25 МПа, внаслідок чого швидкість молока в клапанному зазорі сягає величини 150–200 м/с [199, 332].

Критика гіпотези руйнування жирових кульок проф. Барановського, яка з'явилась у 50-х роках минулого століття, надана у багатьох роботах [210, 217, 321, 322] і підтверджується останніми даними [18, 32, 71]. Суть теорії в тому, що жирова кулька молока, що рухається до клапанної щілини, розмірами d зі швидкістю потоку v_0 при тиску плазми p_0 , витягується у місці входу до клапанної щілини, висотою h де її швидкість значно збільшується до v_m при тиску p_1 , а потім розпадається під дією сил поверхневого натягу (рис. 1.1) [92].

Основні аргументи опонентів даної теорії: невраховано дійсний масштаб процесу, де розміри жирової кульки на 1–2 порядки менші за розмір клапанної

щілини, неможливість отримати значний перепад швидкості на довжині, порівняною з розмірами жирової кульки (1–3 мкм) тощо [199, 208, 210]. Розрахунки теоретично можливих умов дроблення жирової кульки за цією гіпотезою в клапанному (найбільш розповсюдженому та вивченому) гомогенізаторі показали, що необхідний перепад тиску для руйнування жирової кульки створюється лише при умові входу в клапанну щілину під кутом 68° , що малоймовірно [47, 321, 322, 324].

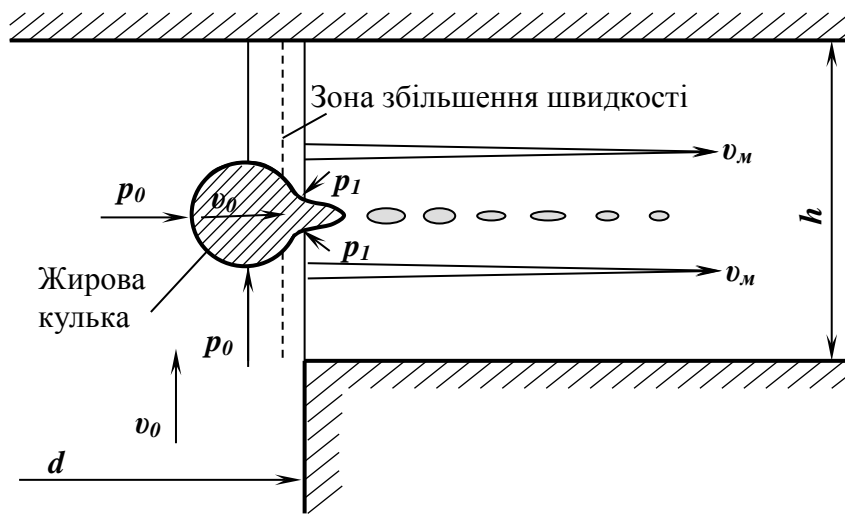


Рис. 1.1. Схема гомогенізації за теорією проф. Барановського.

Віттіг [75, 76] запропонував розглядати вихідну жирову кульку до гомогенізації як "материнську", яка складається з декількох жирових часток (рис.1.2).

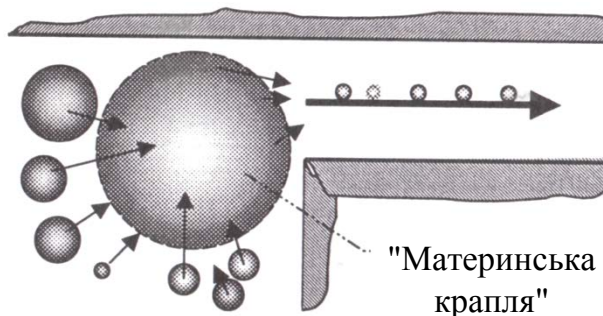


Рис. 1.2. Схема формування "материнської кульки" за гіпотезою Віттіга.

Тим самим уникалось протиріччя між недотриманням масштабу між розмірами жирової кульки та клапанної щілини в теорії Барановського. Але,

якщо погодитись з такою точкою зору, то необхідна наявність застійної зони, в якій би жирові кульки зливались та утворювали материнську. Досліди плинучності рідини в зазорі між клапаном та сідлом не підтвердили наявності такої зони. Крім того, якщо б така зона існувала, то вихрова течія, яка б утворилась в цій зоні, перешкождала утворенню материнської кульки [204, 208, 210].

По гіпотезі Ребіндера [240] (згодом така теорія була висунута і Віттігом) [76] причиною деформації і подрібнення жирових кульок молока вважається великий градієнт швидкості руху молока в гомогенізуючій щілині клапанного гомогенізатора. Під дією сил, які діють зі сторони потоку, жирові кульки розтягуються в циліндри або нитки, переборюючи сили поверхневого натягу і переходячи в нестійкий стан, а потім, під дією тих же сил поверхневого натягу, розпадаються на більш дрібні. Ребіндер встановив, що розпад крапель відбувається при відношенні довжини циліндра до діаметра, рівному чи більшому π .

За розрахунками умов, що створюються в клапанному гомогенізаторі, лише половина жирових кульок, що проходять крізь клапанну щілину, можуть сприймати розтягуючий вплив градієнта швидкості (рис.1.3) [35, 322, 323, 325]. Решта жирових кульок проходить крізь центральну частину потоку, де градієнт швидкості недостатній для диспергування.

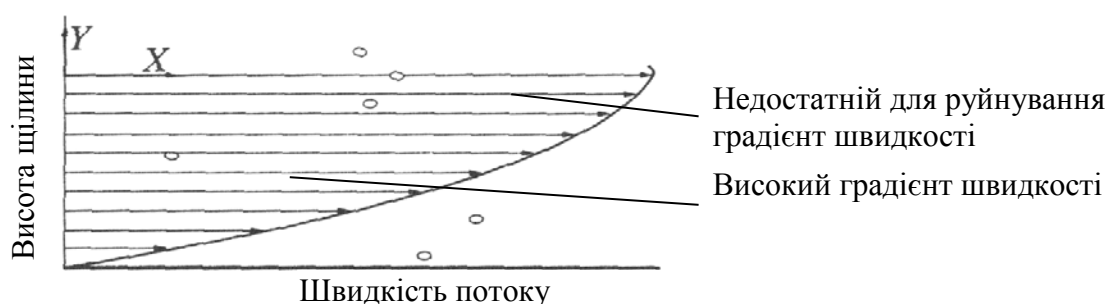


Рис. 1.3. Поле швидкостей потоку в клапанній щілині гомогенізатора А1-ОГ2С.

Професор В.Д. Сурков припустив, що в щілинному каналі жирові кульки повинні обертатися і розпадатися за рахунок відцентрової сили [315, 316]. Його гіпотеза побудована на дії поперечного градієнту швидкості в потоці, який має

різні швидкості в поперечному перерізі. За цією теорією, до поверхні кульки, яка опинилася на границі шарів, прикладений крутний момент, який викликаний різницею швидкостей.

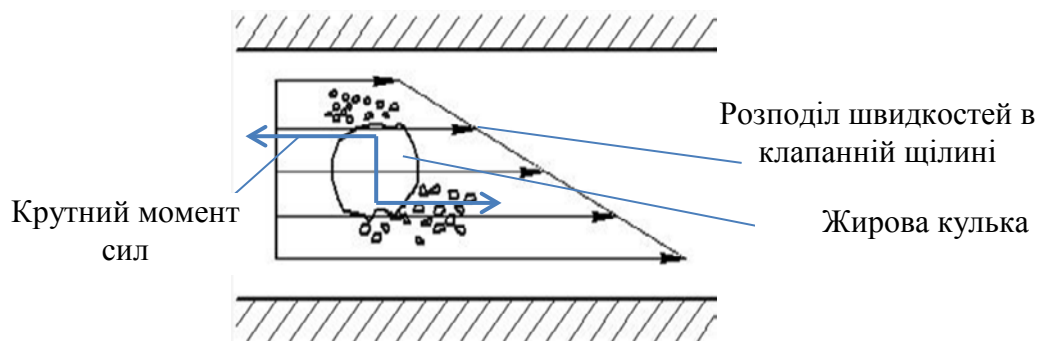


Рис. 1.4. Диспергування жирової кульки по В.Д. Суркову

Під дією цього моменту кожна кулька, яка здійснює обертовий рух, втрачає свою початкову форму, далі відцентрові сили зростають, стають більшими за сили поверхневого натягу, після чого кулька розпадається на більш дрібні. За цією теорією найбільш придатним є режим ламінарної течії в клапанній щілині, що спростовується експериментальними дослідженнями [48, 210]. Розрахунками [322, 323] показано, що половина жирових часток, які проходять крізь центральну частину клапанної щілини, де градієнт швидкості невеликий, не можуть бути зруйновані за теорією відцентрового руйнування.

Гіпотеза про переважний вплив **кавітації** як основного чинника процесу гомогенізації розвивалась стрибкоподібно: від основної для клапанної гомогенізації до незначної і не впливової [53, 193, 317, 336]. Свідченнями наявності кавітації в клапанній щілині є ерозійні кільцеві утворення на робочих поверхнях сідла і клапана [199, 324, 332]. Але спочатку Н.В. Барановським [92], а згодом іншими дослідниками було експериментально доведено, що інтенсивність кавітації не впливає на ступінь гомогенізації [177], а сильно деформовані жирові кульки незруйнованими проходять зони кавітації в початковій частині клапанної щілини, а руйнуються набагато пізніше [37]. Дослідами [31, 32, 51] встановлено, що інтенсивність кавітації в клапанній щілині невелика, на відміну від виходу з клапанної щілини, де кавітація відбувається набагато інтенсивніше.

Кавітаційна дезінтеграція, як основний фактор диспергування, розвивається у двох напрямках: гідродинамічна і акустична, механізм впливу яких на диспергування дисперсної фази емульсії не відрізняється.

За гіпотезою Ткаченка, в зоні кавітації виникають пульсуючі кавітаційні пухирці, які зхлопуються, стикаючись з краплями дисперсної фази [320]. Кумулятивні струмені, що утворюються в пухирцях, вдаряють по жировій кульці і розбивають її на більш дрібні.

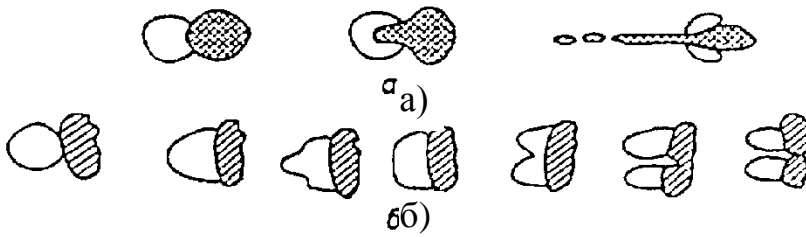


Рис. 1.5. Схема процесу кавітаційного диспергування:

а – втягування жирової краплі в пухирець; *б* – руйнування жирової краплі дисперсної фази.

За описаним вище принципом для руйнування жирової кульки необхідний збіг у просторі і часі як мінімум одразу двох факторів:

- наявності жирової краплі у безпосередній близькості до кавітаційного пухирця;
- розташування жирової краплі зі сторони появи кумулятивного струменя.

Таке співпадіння умов можливе лише при великій кратності обробки одного об'єму емульсії або довготривалій обробці.

Інший, і більш вірогідний механізм впливу кавітації – диспергування жирової фази за рахунок високих локальних перепадів тисків (ударних хвиль) при схлопуванні кавітаційних пухирців [5, 45, 65, 122] (рис. 1.6).

В зоні локального високого тиску навколо кавітаційного пухирця, що зхлопується, величина тиску досягає 1000МПа. Крім гідравлічного удару значно підвищується температура та виділяється водень, наявність якого погіршує властивості молока [110, 139, 198].

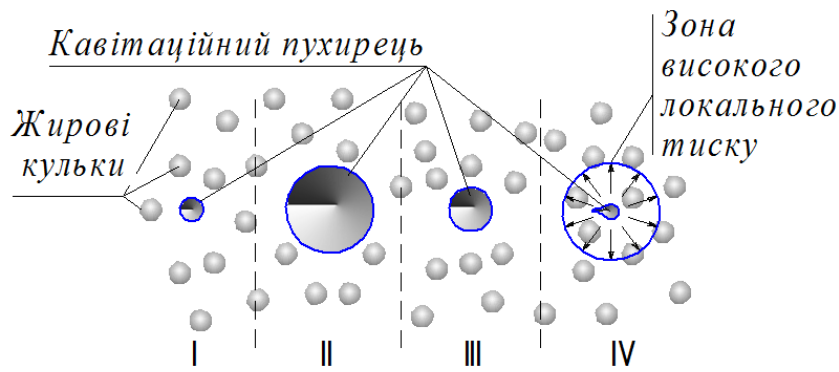


Рис. 1.6. Схема руйнування жирових кульок при кавітації: I – утворення кавітаційного пухирця, II – досягнення максимального розміру пухирця, III – зменшення розмірів, IV – експлозія пухирця з утворенням кумулятивного струменя.

Поява локальних зон високої швидкості призводить до появи високих прискорень мікрооб'ємів, що веде до високої швидкості ковзання жирових кульок відносно плазми і до їх руйнування за критерієм Вебера. В такому разі на швидкість ковзання при кавітації найбільшим чином впливають розміри кавітаційних бульбашок і їх концентрація. Виявлено [110, 111, 320, 322], що для підвищення ступеня диспергування жирової фази необхідно зменшувати розміри кавітаційних пухирців, що відбувається при підвищенні швидкості течії у зоні кавітації (збільшенні числа Рейнольдса), що співпадає з залежністю дисперсності жирової фази молока зі швидкістю потоку в клапанній щілині. Це може бути непрямим доказом руйнування за рахунок швидкості ковзання жирової кульки.

При кавітаційному диспергуванні відбувається поступове зменшення впливу кавітації на ступінь диспергування емульсії при багатократній обробці [5, 336] до моменту, коли за рахунок кавітації диспергування зупиняється. У досліджах [336] показано, що мінімальний розмір жирових кульок за рахунок кавітації сягає лише 1,4–2,0 мкм. Промислова установка для кавітаційної гомогенізації молока буде мати низьку продуктивність (менше 500–1000 л/год), за середньої дисперсності емульсії – 2,0 мкм і витратах енергії набагато вищих за клапанні машини (20 Дж/см³) при більшій вартості апарата.

Завдяки теорії кавітації пояснюється факт, що при появі кавітації істотно змінюється залежність між ступенем гомогенізації та енерговитратами: при тій самій енергії, що підводиться, гомогенізація стає більш ефективною [48, 112]. Гомогенізацію в клапанній щілині можливо організувати без наявності кавітації, але це знижує ефективність процесу [12].

Зважаючи на результати досліджень кавітації, цей процес може бути лише додатковим інтенсифікуючим чинником для гомогенізації молока при необхідності отримання високодисперсних емульсій (<1 мкм), а механізм кавітації дезінтеграції може бути пояснений виникненням високої швидкості ковзання при експлозії кавітаційних бульбашок в молоці.

А.Н. Колмогоровим [185] та І.О. Хінце [328] представлені теорії **турбулентного** диспергування крапель: ізотропна та в'язкісна (рис. 1.7).



Рис. 1.7. Схематичне представлення механізмів турбулентного диспергування: а) ізотропний, б) в'язкісний.

За механізмом ізотропної турбулентності диспергування відбувається флуктуаціями тиску, спричиненими мікрозавихреннями [2]. При в'язкісному механізмі – зсувними напруженнями більш масштабних завихрень [51, 185, 328]. За твердженнями [25, 26, 57], турбулентний механізм гомогенізації є основним у порівнянні з градієнтними гіпотезами диспергування та кавітаційним диспергуванням. За гіпотезою Колмогорова розміри гідравлічних завихрень визначають дисперсність емульсії: чим менші розміри завихрень, тим менше розміри жирових крапель. А розміри мікрівихорів зменшуються з підвищенням швидкості потоку.

Згідно теорії Колмогорова-Хінце, зруйнувати краплю можуть: динамічний напір та сила в'язкого тертя. В залежності від того, яка з сил, що діє на поверхню краплі, домінує, можливі два механізми дроблення краплі. Основний чинник, який визначає динамічний напір це швидкість зовнішнього середовища відносно краплі (швидкість ковзання). Визначальними для сили в'язкого тертя є середня швидкість зсуву та питома дисипація енергії. Пізніше Слейчер [219] у візуальних дослідах за результатами швидкісної зйомки довів, що:

- основним параметром для руйнування жирової краплі є швидкість;
- теорія ізотропної турбулентності Колмогорова-Хінце не може використовуватись для подрібнення крапель в потоці, де існує високий градієнт швидкості;
- найчастішим механізмом руйнування є витягування крапель, причому при відношенні їх довжини до діаметра більше 4 утворюється декілька нових дрібних крапель, а при відношенні менше 4 – лише дві нові краплі.

Таким чином, за теорією турбулентності експериментально доведено візуальними спостереженням руйнування краплі при її витягуванні згідно в'язкісного механізму, основним чинником якого є швидкість ковзання краплі. У 2011 році для клапанної щілини ці висновки було підтверджено експериментально [32].

Максимальний розмір крапель, що утворюються при дробленні в потоці суцільного середовища, визначається, в основному, трьома механізмами:

- нестійкість Кельвіна–Гельмгольца, що визначається величиною відносної швидкості;
- нестійкість Рэлея–Тейлора, що визначається величиною прискорення;
- механізм дроблення турбулентними пульсаціями А.Н. Колмогорова, що визначається величиною дисипації потужності.

Отже, для з'ясування переважного механізму диспергування жирової фази в клапанній щілині гомогенізатора високого тиску були проведені ретельні дослідження полів швидкості мікрочасток з використанням найсучасніших

методів пульсуючих лазерів [29, 32, 36]. Експерименти показали, що кавітація зосереджена в першій половині проміжку клапанної щілини, тоді як інтенсивність турбулентності в цьому місці дуже низька. Турбулентність найбільш ефективна у випускній камері після клапанної щілини. Це підтверджує утворення в цьому місці камери турбулентних вихорів з розмірами, порівняними з жировими кульками, які, як відомо, найбільш ефективні для руйнування. Висока турбулентність у останній частині клапанної щілини призводить до збільшення енергії великих турбулентних вихорів і зменшення енергії дрібних вихорів. Це означатиме відносно збільшення впливу турбулентного в'язкого механізму руйнування в порівнянні з турбулентним інерційним механізмом при збільшенні дисперсності. Порівнюючи ці висновки з візуалізацією процесу диспергування, турбулентність в більшій мірі ніж кавітація, є домінуючим чинником гомогенізації в клапанній щілині.

Таким чином, на сьогодні експериментально підтверджено переважну дію в'язкісного турбулентного механізму гомогенізації молока в клапанній щілині. Кавітація грає другорядну роль, але збільшує ефективність диспергування.

Е.А. Фіалковою була висунута гіпотеза низькотемпературної кавітаційної гомогенізації або **скловання жирових кульок молока в процесі субкавітаційного диспергування**, в основу якої покладена ідея формування на поверхні бульбашок кавітацій «мікрокрижинок», утворених в результаті сублімації і руйнуючих як жирові кульки, так і робочу поверхню клапанів [233, 322, 323].

Згідно даної теорії, у зонах високих швидкостей гомогенізаторів тиск рідини знижується до таких значень, що відбувається сублімація поверхневого шару жирових кульок внаслідок низьких температур, тобто перехід їх у твердий стан (рис. 1.8). При подальшому русі мікроскопічні частки льоду, що рухаються з великою швидкістю, подрібнюють жирові кульки.

Автор вважає, що диспергування у клапанному гомогенізаторі відбувається саме за цією теорією і приводить у підтвердження розподіл тиску в клапанній щілині, досліджених експериментально Кацнельсоном і Мухінім, де показана зона наднизького тиску [177].

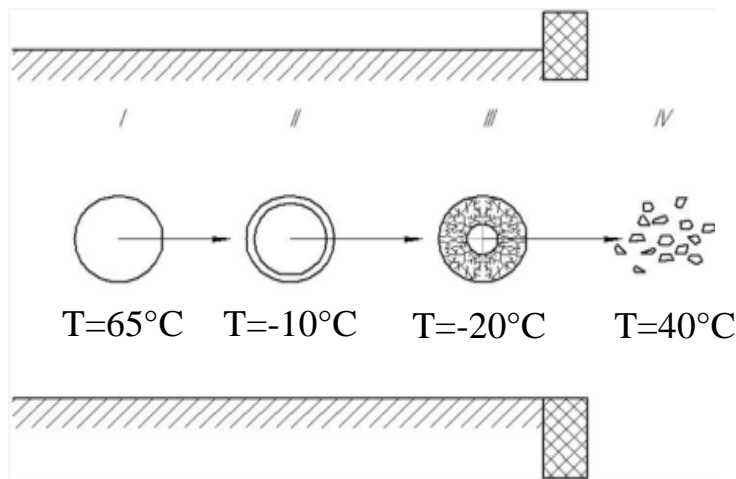


Рис. 1.8. Стадії дроблення жирової кульки за проф. Є.О. Фіалковою.

Час знаходження жирової кульки в клапанній щілині складає лише $(1-2) \cdot 10^{-5}$ с. Автором не проведені розрахунки швидкості замерзання поверхневого шару жирових кульок за такий короткий час. Дослідами [25, 30, 37] ідея скловання жирових кульок не дістала підтвердження.

На початку 2000-х років впроваджений клас вакуумних гомогенізаторів, розроблених на основі досліджень інституту Технічної Теплофізики НАН України [158–161]. Принцип їх дії заключається у впорскуванні нагрітого до 60° молока через форсунку у камеру, де підтримується вакуум. Глибина вакууму розрахована таким чином, щоб відбувалось скипання крапель молока, за рахунок чого жирові кульки руйнуються. Принципово новий принцип гомогенізації забезпечує такі переваги, яка дезодорація та зниження кислотності молока. Однак у вакуумних гомогенізаторах не вдалося досягти зменшення середніх розмірів жирових кульок молока до 1,2 мкм [160, 161].

Теорія гомогенізації скипанням мікрооб'ємів емульсії у вакуумі докорінно відрізняється від інших способів диспергування і може бути застосована лише до вакуумних гомогенізаторів.

Якщо співставити теорії Барановського, Ткаченка, Віттіга та Фіалкової, то впливовим чинником у всіх випадках буде швидкість потоку. Дійсно, Барановський довів, що на ступінь гомогенізації впливає лише швидкість потоку рідини. При підвищенні швидкості плинину через клапанну щілину

збільшиться і величина вакууму, і, як наслідок, кавітація, що є рушійною силою гомогенізації за кавітаційною теорією і за теорією Фіалкової. Разом з тим збільшується і градієнт швидкості, що є причиною руйнування за Ребіндером і Віттігом. Це ще раз підтверджує, що фактори процесу гомогенізації та відсутність візуальних даних про нього можуть призвести до суттєвих розбіжностей та помилок у поясненні його механізмів та рушійних сил.

Таким чином, за останні 60 років накопичений величезний експериментальний матеріал досліджень гомогенізації в клапанних машинах, але безпосередньо спостерігати руйнування жирових кульок поки що не вдавалось. Проривом у цьому напрямі стали дослідження доктора Фредеріка Іннінгса в університеті Лунда (Швеція). В гомогенізуючій голівці було створено сапфірове вікно з пульсуючими лазерами вздовж просвіту [37], що дало змогу спостерігати послідовність процесу розщеплювання жирових кульок і фотографувати його швидкісними камерами. В результаті отримано висновок, що жирові краплі деформуються під дією прискорення при вході в щілину і проходять по ній в такому деформованому стані у витягнутій формі. Розділення відбувається тільки під дією турбулентних потоків, коли кульки виходять назовні. Саме градієнт швидкості – феномен відмінності швидкості руху різних частин розтягнутої краплі – забезпечує її руйнування.

Гіпотеза подрібнення жирової краплі здуванням з її поверхні мікрочасток була висунута Орешиною М.М. [212, 214–217] і потім розвинута Паляничкою Н.А. [220, 221, 223]. Жирова кулька розглядається подібно краплі рідини, що подрібнюється у швидкісному повітряному потоці. Механізм дроблення базується на розпаді краплі в залежності від різниці швидкостей жирової кульки та оточуючої її плазми (швидкості ковзання), що визначає критерій Вебера (рис. 1.9).

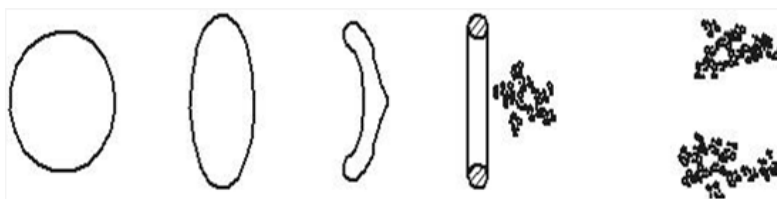


Рис. 1.9. Схема гомогенізації за проф. М.М. Орешиною.

Математична модель дроблення жирових часток гідравлічними збуреннями базується на гіпотезі, що дисперсійне середовище захоплює в рух жирову частку і з урахуванням цього формується відносний рух середовища і частки. Виділена істотна роль прискорення жирової кульки [212, 215, 217].

Рух поршня-ударника вниз або вгору спричиняє рух дисперсійної фази зі швидкістю $v_{пл}$, яка обтікає жирову кульку, що рухається в протилежному напрямку за рахунок сили інерції F_i (рис. 1.10) [221].

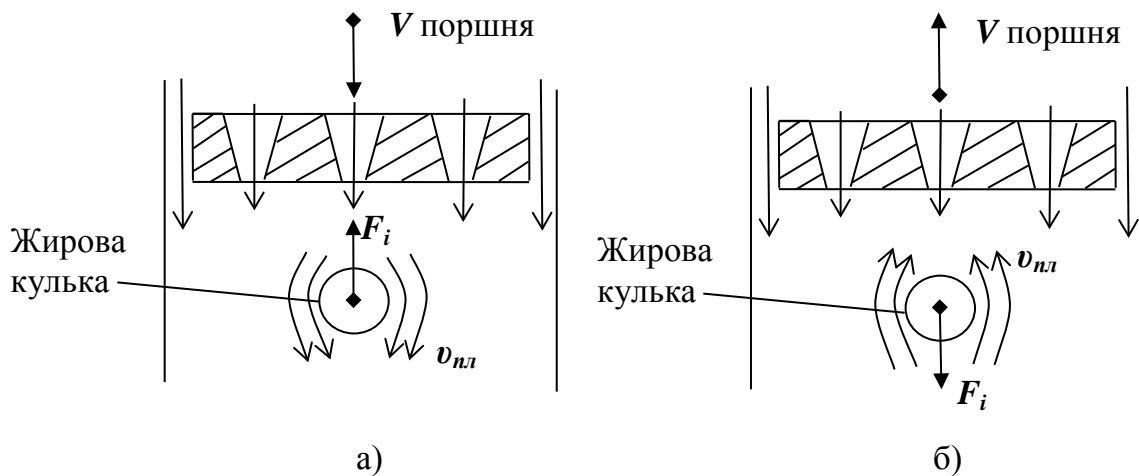


Рис. 1.10. Схема виникнення сил інерції при імпульсній гомогенізації при русі поршня-ударника: а) вниз; б) вгору.

Досліди з деформації та руйнування крапель рідини при обтіканні потоком повітря, проведені в роботах [70, 113, 121], дозволили отримати фотографії руйнування та виділити декілька характеристик розпаду крапель в залежності від критерію Вебера. Орешиній М.М. вдалося отримати фотографії руйнування краплі олії в потоці води імпульсними впливами, що моделює характеристики жирової кульки в потоці плазми [212, 215]. За твердженнями автора, розміри жирових кульок молока після обробки в розробленому імпульсному гомогенізаторі менші, ніж при обробці в клапанних гомогенізаторах і, в середньому, становлять 0,5 мкм.

Жирова кулька має складну будову: жирові кульки молока вкриті тонкою білково-ліпідною оболонкою, під якою розташований шар тугоплавких жирів.

Така пружна та водночас еластична оболонка створює додаткові труднощі дробленню жирової кульки [133, 134, 179, 210]. Крім того, після її руйнування на поверхні нових більш дрібних жирових кульок знову утворюються оболонки, які перешкоджають процесу їх агломерації, що також потребує часу. Якщо нехтувати складною внутрішньою структурою жирової кульки, то погляд на процес її дроблення буде надто спрощеним та не буде відповідати дійсності. З огляду на це крапля олії в дослідях М.Н. Орешіної не може вважатися адекватною моделлю жирової кульки молока.

Мала різниця між густиною плазми та жирової кульки створює значну залученість руху сусідніх шарів молока. Тому безпосереднє перенесення механізмів подрібнення рідини в потоці повітря, де різниця густини відрізняється майже на 3 порядки, на подрібнення жирової кульки в плазмі молока викликає сумніви. Незважаючи на це, високий ступінь диспергування жирової фази молока в імпульсному гомогенізаторі дозволяє зробити висновки, що механізм диспергування за рахунок швидкості ковзання жирової кульки є перспективним для подальших досліджень.

Для створення максимальної швидкості ковзання жирової кульки запропонована теорія гомогенізації при зіткненні струменів молока [118, 256, 263, 264]. В зоні зіткнення струменів жирова кулька, за рахунок сил інерції, рухається прямолінійно зі швидкістю v_1 (рис. 1.11), в той час як швидкість оточуючої плазми v_2 змінює напрямок руху спочатку на 90° , а потім і на 180° . Деякий час жирова кулька рухається у потоці зустрічного струменя, де створюється максимальна швидкість ковзання жирової кульки, що призводить до її руйнування у відповідності з критерієм Вебера, модифікованим для випадку протитечійно-струминної гомогенізації.

При обробці в протитечійно-струминному гомогенізаторі розміри жирових кульок порівняні або менші за їх розміри при клапанній гомогенізації, однак візуальне спостереження процесу диспергування не було отримано.

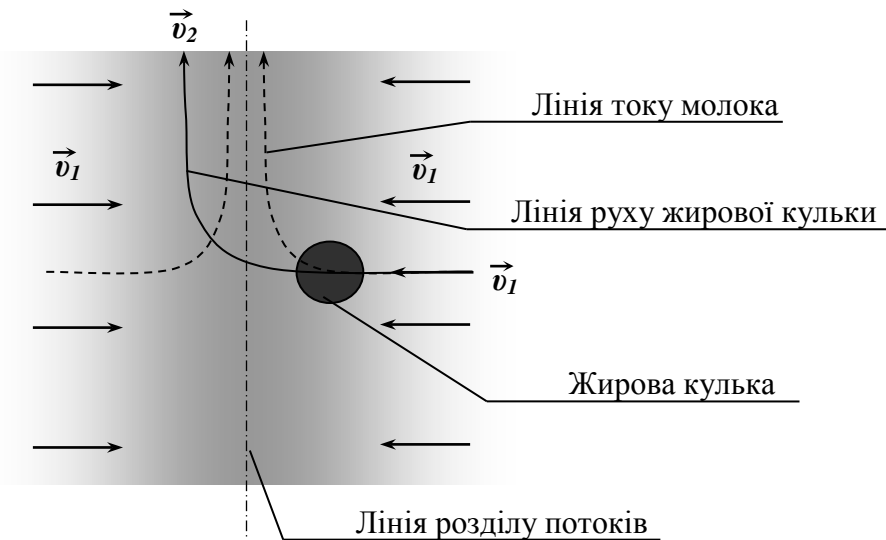


Рис. 1.11. Схема гомогенізації в зоні зіткнення струменів протитечійно-струминного гомогенізатора.

У результаті проведеного аналізу зрозуміло, що значна кількість гіпотез гомогенізації спричинена труднощами отримання візуальних даних руйнування жирових кульок. Останні дослідження процесу диспергування жирової фази в клапанних гомогенізаторах свідчать про сильне розтягування жирових кульок в клапанній щілині перед руйнуванням та підтверджують справедливість турбулентної в'язкісної теорії, за якою руйнування відбувається в результаті дестабілізації Кельвіна–Гельмгольца та Рэлея–Тейлора. Такі механізми руйнування крапель викликаються швидкістю та прискоренням потоку емульсії. Кавітація інтенсифікує процес клапанної гомогенізації, але її вплив другорядний.

Високий ступінь дисперсності жирової фази молока досягається при використанні пристроїв, побудованих на гіпотезах здування поверхні мікрочасток та різниці швидкості в зоні зіткнення струменів. Спільність між цими гіпотезами в створенні умов для виникнення максимальної різниці швидкості між фазами молока.

Гіпотези гомогенізації скипанням мікрооб'ємів емульсії у вакуумі та субкавітаційної гомогенізації принципово відрізняються від інших. Перша з них не отримала візуального підтвердження для клапанного гомогенізатора, а

друга – застосовна лише для вакуумних гомогенізаторів, ступінь диспергування в яких не досягає рівня клапанних машин.

Незважаючи на суттєві відмінності розглянутих вище гіпотез, спільними для них є створення гідродинамічних умов в зоні руйнування, які сприяють підвищенню відносної швидкості жирової кульки. Для градієнтних теорій це відбувається при відносній швидкості шарів емульсії, для турбулентного руйнування – при утворенні мікровихорів, для кавітаційної – пульсацій тиску і швидкості в зоні схлопування кавітаційних пухирців, здування мікрочасток – руху емульсії з високим прискоренням і просковзування жирової кульки відносно плазми за рахунок сил інерції, для зіткнення струменів – інерціальних сил при різкій зміні руху плазми навколо жирової кульки, для субкавітаційного руйнування – чергування зон з низьким тиском і високим градієнтом швидкості.

1.3. Аналіз конструктивних особливостей гомогенізаторів і узагальнення переважних гідродинамічних факторів диспергування емульсій

Для проведення процесів диспергування та отримання емульсій використовують десятки апаратів, які конструктивно значно відрізняються один від одного. Спроби класифікувати гомогенізатори, що використовуються для обробки молока, наведені у роботах [148, 210, 217, 263, 322], в основу яких покладено як конструктивні ознаки, так і принцип дії сукупно з гідродинамічними умовами в зоні подрібнення та механізмом руйнування жирових часток. Поєднання одразу декількох ознак для класифікації призводить до невизначеності, яку посилює той факт, що для багатьох типів гомогенізаторів немає впевненості ні у виді переважного механізму диспергування, ні в гідродинамічних умовах у зоні подрібнення. Класифікація за найбільш визначеними – конструктивними ознаками дозволяє уникнути вищезгаданих протиріч (рис. 1.12) [143].

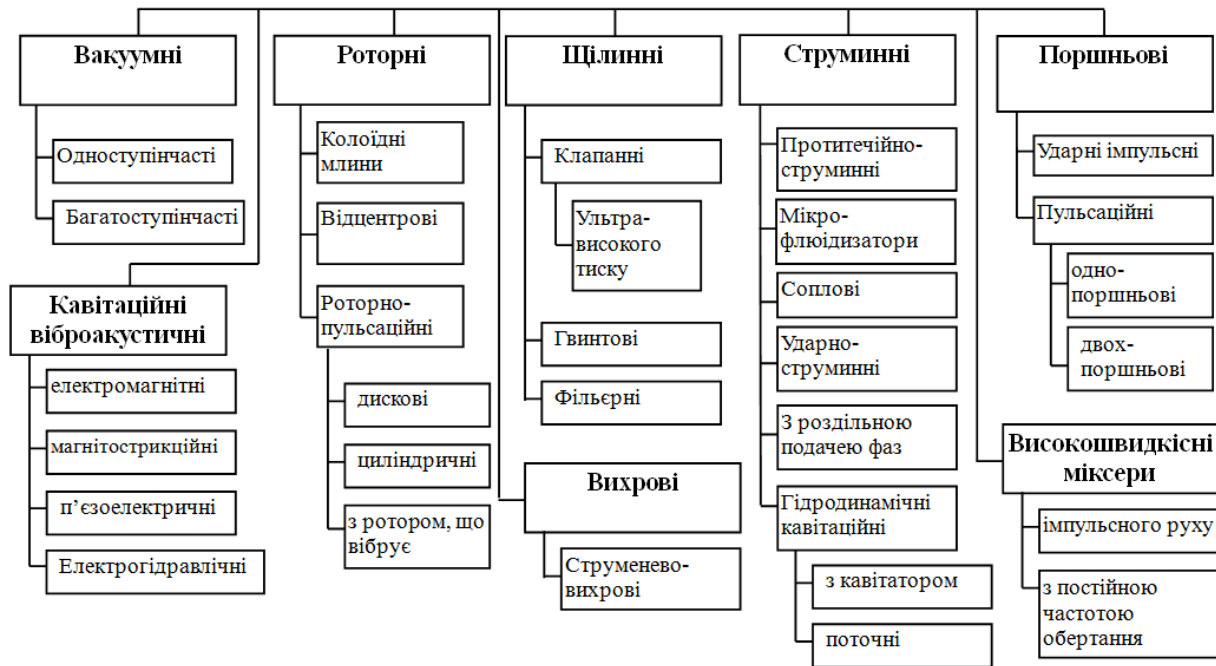


Рис. 1.12. Класифікація конструкцій апаратів для гомогенізації молока за конструктивними ознаками.

Щілинні клапанні гомогенізатори. Найбільш поширені на виробництві гомогенізатори клапанного типу, в яких суміш, що обробляється під високим тиском (від 8 до 25 МПа), проходить через вузьку кільцеву щілину (0,1–0,5 мм), утворену клапаном і клапанним сідлом (рис. 1.13) [33].

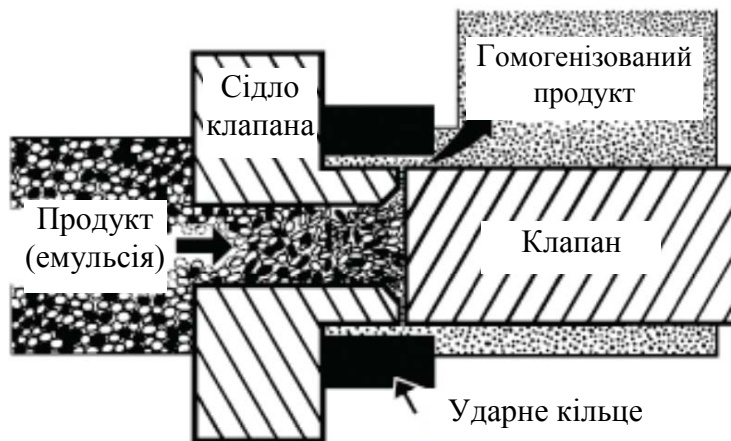


Рис. 1.13. Принцип обробки в клапанній голівці гомогенізатора високого тиску

Головні переваги клапанних гомогенізаторів, за рахунок яких вони отримали найвищу промислову освоєність в світі [24, 34, 39, 73, 74, 316]:

- при обробці продуктів можна отримати високодисперсні емульсії з середнім діаметром дисперсної фази 0,75 – 0,8 мкм [9, 50, 77];
- нечутливість до облітерації робочих поверхонь клапана та сідла внаслідок "плаваючої" конструкції клапана;
- універсальність, тобто можливість обробляти молоко та вершки різної жирності, а також інші продукти з широким діапазоном в'язкості;
- переважна більшість технологічних схем і інструкцій виробництва продукції містить рекомендації (режими гомогенізації), розроблені саме для клапанних гомогенізаторів.

Недоліки клапанних гомогенізаторів суттєві:

- висока вартість (більше 120 тис. дол при продуктивності 20 т/год [62])
- найвищі, серед промислово освоєних типів машин, енерговитрати: 7,4–9 кВт·год/т, завдяки чому витрати на електроенергію за рік експлуатації сягають половину вартості нової машини [62];
- високі масо-габаритні показники (більше 3 т при продуктивності 10 т/год);
- швидке зношення ущільнень і клапанів (в т.ч. кавітаційне), завдяки чому вартість обслуговування і заміни зношуваних частин сягає 16 тис. євро/рік [62] при обробці молока (в разі гомогенізації томат-паст і т.п. абразивних продуктів сума значно зростає);
- складність конструкції завдяки використанню плунжерного насосу високого тиску та високий рівень шуму [199, 210, 218, 332].

Незважаючи на численні вдосконалення клапанних гомогенізаторів, коефіцієнт корисної дії, а отже і енергоефективність процесу гомогенізації, залишається дуже низьким – 0,18% [48]. При цьому механічний к.к.д. досить високий (70–85%), що свідчить про недосконалість механізму гомогенізації в клапанних машинах.

Клапанні гомогенізатори мають найбільшу історію та характеризується найбільшою вивченістю серед усіх інших типів диспергаторів, тому достовірне знання механізму руйнування жирових кульок молока у цьому типі

гомогенізатора є ключовим для визначення шляхів підвищення ефективності гомогенізації взагалі. Тому розглянемо процес диспергування у такому гомогенізаторі докладніше.

Неможливість спостереження за процесом диспергування молочного жиру призвело до появи десятків гіпотез про можливі механізми гомогенізації у клапанних гомогенізаторах. Практично кожен з описаних у підрозділі 1.1 гіпотез в певний період часу вважали основною і переважною для клапанної головки гомогенізатора. Але візуальні експериментальні дані процесу руйнування жирових кульок, показали, що в клапанній щілині вони сильно розтягуються, проходять клапанну щілину та розпадаються на дрібні краплі на виході з робочої щілини [37]. Отримані результати дозволяють зробити такі висновки:

- візуально (розтягування у циліндри, з відношенням довжини до діаметра більше π) процес співпадає з гіпотезами градієнтних гіпотез гомогенізації;

- гіпотези руйнування за рахунок відцентрових сил (інша форма деформації жирової кульки), кавітації, субкавітації (які виникають лише у вузьких кільцевих ділянках клапанної щілини) та здування з поверхні мікрочасток (згідно з якими передбачається деформація у вигляді "парашут" чи "зонт") не відповідають дійсності;

- розпад сильно витягнутих жирових крапель на виході з клапанної щілини відбувається за рахунок турбулентних пульсацій [76, 240], але кавітація підвищує ефективність цього процесу, адже в цій частині клапанної головки знаходиться зона інтенсивної кавітації [31];

- сильне витягування жирових кульок (утворення довгих циліндрів) перед руйнуванням узгоджується з даними Ю.Ф. Дітякіна та М.С. Волинського для диспергування високов'язких емульсій в досліджах по руйнуванню крапель [113, 156] і теорією турбулентної в'язкісного диспергування Колмогорова-Хінце.

Останній висновок пов'язує процес диспергування жирової кульки молока з добре вивченим процесом руйнування рідкої краплі, визначальними для якого

є критерії Вебера і час індукції [113, 156, 262]. В основі критерія Вебера лежить визначення різниці швидкості жирової кульки відносно оточуючого шару (молочної плазми). Таку швидкість називають швидкістю ковзання жирової кульки. Час індукції процесу диспергування краплі, а також час її повного руйнування, залежить від критерія Лапласа, а отже сили поверхневого натягу краплі, розміру краплі і швидкості руху емульсії. Саме ці чинники є визначальними у дослідженнях клапанної гомогенізації. З них сталими є розмір жирової кульки до гомогенізації та її поверхневий натяг, а змінними: швидкість ковзання, яка головним чином залежить від темпів зміни швидкості емульсії (або градієнта швидкості, або прискорення емульсії) в клапанній щілині та час індукції (впливу сил диспергування) [209, 262].

Таким чином, для підвищення ступеня диспергування в клапанному гомогенізаторі необхідно:

- 1) збільшувати градієнт (прискорення) швидкості, для чого підвищувати тиск гомогенізації та (або) зменшувати довжину (висоту) клапанної щілини;
- 2) збільшувати час знаходження жирової кульки в клапанній щілині, тобто зменшувати швидкість потоку та (або) збільшувати довжину клапанної щілини.

Як бачимо ці шляхи підвищення ступеня гомогенізації в клапанній голівці знаходяться у протиріччі. Можливо в цьому і є основний недолік такого типу гомогенізатора. Незважаючи на більш ніж сторічну історію існування, величезну кількість досліджень і вдосконалень – спроб знизити його енерговитрати без погіршення якості диспергування, вони фактично не увінчалися успіхом. Сучасні вітчизняні (Одеський механічний завод) та закордонні клапанні гомогенізатори (Alfa-Laval, "APV", "Bran&Luebbe", Manton – Gaulin, "Cherry-Burrell", Rannie і ін.) мають близькі технічні характеристики і розрізняються в основному лише ступенем автоматизації та технічною досконалістю їх механічної частини [322].

Гомогенізатори ультрависокого тиску. Будову аналогічну до клапанних мають промислові та лабораторні клапанні гомогенізатори, що працюють при

ультра високомутиску (УВТ) – від 10 до 300 (1000) МПа [10, 34]. Головні відмінності процесу гомогенізації УВТ:

- дисперсність жирових кульок сягає 0,1 мкм і менше;
- в клапанній голівці відбувається підвищення температури до 95°C, завдяки чому одночасно з гомогенізацією здійснюється знезаражування молока від патогенної мікрофлори [3, 52].

Фільтрні гомогенізатори. У таких апаратах продукт продавлюється через паралельно розташовані отвори з постійним або змінної величини перерізом. Такими апаратами є фільтрний апарат СВА-3 та агрегат МДХ401 (Унитех&Флант-М, Росія – Болгарія). В цих апаратах відбувається багатоступінчаста обробка, чим досягається зниження необхідного тиску в порівнянні з клапанними гомогенізаторами. При роботі таких апаратів ефективність гомогенізації невисока і становить близько 17%, а при обробці протягом 20 хвилин – 20% [138].

Гвинтові гомогенізатори. По типу фільтрних працюють гвинтові апарати, в яких гвинт та корпус утворюють послідовно розташовані зазори (агрегат АЛМ від П'єр Герен) [322]. Продукт проходить крізь тонкий гвинтовий канал, що значно підвищує час обробки. Ступінь диспергування молока в гвинтових гомогенізаторах вище, ніж в фільтрних.

Роторно-пульсаційні апарати. Типова конструкція радіального роторно-пульсаційного апарата (РПА) представлена на рис. 1.14. Робочими елементами таких апаратів є коаксіально розташовані циліндри ротора і статора, на бічній поверхні яких є канали для проходу середовища, що обробляється. Частина РПА, що включає отвори ротора та статора, називають модулятором. Принцип роботи РПА полягає в наступному [87, 196, 237]. Емульсія, що обробляється вводиться в апарат через центральний патрубок. Проходячи через робочі органи, рідина піддається значним знакозмінним навантаженням, внаслідок чого в ній виникають істотні зсувні напруги. Крім того, на суміш, що обробляється при роботі РПА діють високочастотні пульсації та явища кавітації.

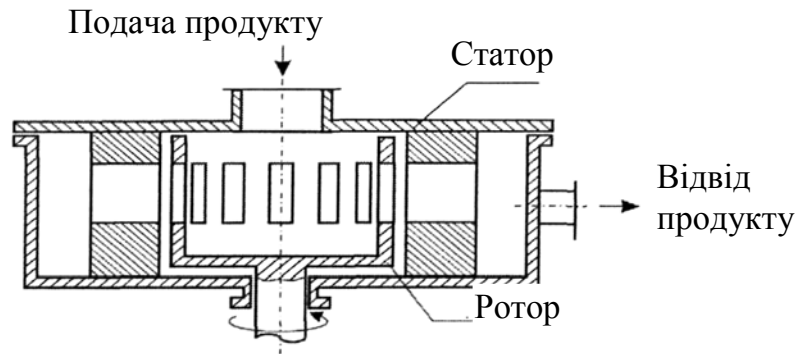


Рис. 1.14. Конструкція радіального РПА

При обертанні ротора його канали періодично перекриваються або співпадають з каналами статора. У першому випадку в порожнині ротора тиск зростає, а в другому - за короткий проміжок часу скидається. В результаті цього через канал статора поширюється імпульс надмірного тиску, услід за яким виникає короткочасний імпульс зниженого ("негативного") тиску, оскільки поєднання каналів ротора і статора завершилося і подача рідини в канал статора відбувається тільки за рахунок транзитної течії з радіального проміжку між ними. Об'єм рідини, що увійшов до каналу статора, прагне до виходу з нього і інерційні сили створюють розтягуючу напругу в рідині, що викликає кавітацію [5, 7]. Бульбашки кавітацій ростуть при дії імпульсу зниженого тиску і згортаються або пульсують при збільшенні тиску в каналі статора. Частина бульбашок кавітацій виноситься в робочу камеру.

Оскільки швидкість потоку рідини в каналі статора велика і є також змінною величиною, потік є турбулентним. Робочі поверхні ротора і статора впливають на рідке гетерогенне середовище за рахунок високих зрізуючих і зсувних зусиль, що виникають в радіальному проміжку, і турбулентних вихорів.

Роторні апарати відносяться до апаратів з періодичними перехідними гідромеханічними процесами зі збудженням гідродинамічної і акустичної імпульсної кавітації і великими градієнтами швидкостей та значними пульсаціями. Перехідні нестабілізовані процеси визначаються тим, що період модуляції площі прохідного перерізу менше часу встановлення основних гідродинамічних параметрів: швидкості і тиску [196].

Роторні апарати пристосовані для автономної роботи із зовнішнім джерелом тиску або без нього. В першому випадку крізь РПА подають продукт, що обробляється зовнішнім насосом, що інколи технологічно зручно. В другому випадку тиск створюється під дією відцентрових сил, а для підвищення насосного ефекту всередині ротора встановлюють лопатки (подібно до відцентрових насосів) або преднасос шнекового типу [129, 196].

За способом обробки та руху емульсії РПА діляться на два основні типи: радіальні й осьові [87, 237]. Радіальний апарат розглянутий вище (рис. 1.14), а в осьових апаратах початкові компоненти переміщуються в осьовому напрямі. Тут обробка середовища відбувається в вузькому проміжку між плоскими дисками статорів і роторів з радіальними прорізами. Ефективність таких апаратів нижча, ніж радіальних. РПА радіального типу забезпечують більш рівномірну обробку середовища та є простішими у виготовленні й експлуатації.

Спектр конструкцій РПА, їх технологічних характеристик і структура нестационарних потоків продуктів, що обробляються приведені в роботах [86, 88, 236, 237, 306]. Особливістю нестационарних потоків в РПА є різноманіття їх форм (кавітаційні, безкавітаційні, резонансні, нерезонансні, коливальні і інші), а при проектуванні для максимізації кавітації додаються численні способи її збудження (акустичне, гідродинамічне, змішане, імпульсне, резонансне, високочастотне, низькочастотне та ін.).

РПА дозволяють інтенсифікувати технологічні процеси за рахунок проведення їх в нестационарних умовах, використання енергії звукових коливань і вторинних акустичних ефектів, за рахунок здійснення дискретного введення енергії в оброблюване середовище [68, 69, 88, 203, 330]. До апаратів, які якнайповніше відповідають усім вищепереліченим вимогам, відносяться роторні апарати, що мають різні назви:

- роторний апарат з модуляцією потоку (РАМП) [87];
- роторно-пульсаційний апарат (РПА) [167, 237];
- пульсаційний апарат роторного типу (ПАРТ) [87, 236, 237];
- гідродинамічний апарат роторного типу (ГАРТ) [232];

– рідинні, гідроакустичні сирени, «ультратурракс»; гідромеханічний диспергатор [16, 17, 192, 196].

Ці апарати відрізняються простотою конструкції, високою надійністю і ефективністю. Принципові конструктивні схеми у них однакові, проте по механізму дії на емульсію, що обробляється ці апарати істотно відрізняються, що пов'язано з величиною радіального зазору між ротором і статором. У роторних апаратах типу РАМП, ПАРТ, гідромеханічних диспергаторів зазор прагнуть виконати мінімальним – не більше 0,1 мм, а в РПА вказаний проміжок більше 0,2 мм і може досягати декількох міліметрів [7, 46, 59, 86]. Інтенсифікації процесів диспергування в роторних апаратах сприяють в першу чергу інтенсивна імпульсна акустична кавітація [60, 61, 96, 137], висока турбулентність і високий градієнт швидкості в робочих об'ємах.

Більшість РПА конструюється для створення розвиненої кавітації [86, 167, 330]. Види конструктивних рішень роторних апаратів за принципом створення кавітації представлені у додатку А.

Роторні апарати відрізняє простота в їх виготовленні. Їх енергетична ефективність обумовлена тим, що рідке середовище являється одночасно і джерелом, і об'єктом коливань і, таким чином, механічна енергія плинного середовища, що обробляється безпосередньо перетворюється на корисну – необхідну для диспергування [38, 167, 306, 331]. Імпульсна концентрація енергії на коротких проміжках часу обумовлює їх високу інтенсивність [157, 158]. Час і кратність впливу на емульсію можливо регулювати подачею продукту в РПА.

При дослідженні дисперсності емульсій, оброблених у РПА, встановлено, що в цілому середній діаметр частинок дисперсної фази не перевищує 1 мкм [68, 331], але дисперсний склад відрізняється нерівномірністю і містить підвищену кількість неподрібнених жирових часток [322].

Для опису механізму диспергування емульсій в РПА застосовують три основні гіпотези: кавітаційну, турбулентну та градієнту. В зазорі між ротором і статором створюється високий градієнт швидкості ($6,8 \cdot 10^6 \text{ c}^{-1}$), який можна

порівняти лише з градієнтом швидкості в робочому зазорі клапанного гомогенізатора ($8,4 \cdot 10^6 \text{ c}^{-1}$) [322]. При цьому високі значення градієнта швидкості майже рівномірно охоплюють весь об'єм робочого зазору, на відміну від клапанного гомогенізатора. Крім того, у РПА у порівнянні з клапанним гомогенізатором підвищується час дії руйнуючих факторів. Але ці переваги РПА не дозволили отримати ступінь диспергування, порівняний з клапанним гомогенізатором. Тому гіпотеза градієнтного руйнування не знайшла експериментального підтвердження.

У 80-х роках переважною гіпотезою гомогенізації в РПА було турбулентне диспергування [86]. Але авторам не вдалося знайти експериментального підтвердження цієї теорії даними візуального спостереження. У останні часи більшість дослідників РПА застосовують гіпотезу кавітаційного руйнування як базову [330].

Пульсаційні апарати з ротором, що вібрує. Різновидом роторно-пульсаційних апаратів є конструкція з ротором, що здійснює осьові коливання (вібрації) в процесі роботи – пульсаційний апарат з ротором, що вібрує (ПА з ВР) [174, 250, 252]. При накладанні додаткових коливань за рахунок вібруючого ротора розподілення енергії стає рівномірним і внаслідок узгодження коливань ротора з перекриттям отворів, створюється резонанс пульсацій, що додатково підвищує ефективність процесу в порівнянні з класичним РПА [78, 273]. Це призводить до підвищення рівномірності дисперсного складу молока після гомогенізації та зниження енерговитрат процесу. Але досліджень роботи такого апарата практично не проводилось.

Відцентрові гомогенізатори. У відцентрових гомогенізаторах під дією обертання ротора рідина під тиском проходить через сопла або щілинні отвори та вдаряється о спеціальні відбивачі. Руйнування жирових кульок відбувається за рахунок кавітації в кавітаційних кавернах, які утворюються за відбивачами [322].

Відцентрові апарати простіше клапанних, вони менш металоємні, в них немає швидкозношуваних плунжерних пар. Основний їх недолік – низький ступінь гомогенізації молока (середній розмір жирових кульок – більше 2 мкм)

і значне спінювання продукту в ході його обробки [103, 106, 210]. Такі пристрої частіше використовуються як змішувачі, а не як гомогенізатори.

Колоїдні млини. Тонке диспергування можливо здійснити у млинах тонкого подрібнення при проходженні продукта крізь тонкі зазори між робочими органами цих машин [128, 218]. Але для створення емульсії з дисперсністю 1 мкм необхідно створювати розвинуте тертя робочих органів млина, що забруднює емульсію продуктами зносу поверхонь робочих органів та суттєво підвищує необхідну потужність процесу. Тому для гомогенізації молока колоїдні млини не отримали застосування.

Вакуумні гомогенізатори. При вакуумній гомогенізації крім диспергування молочного жиру досягаються такі додаткові переваги як: зниження кислотності, підвищення термостійкості, дегазація, дезодорація молока, а також часткове пригнічення мікрофлори [160, 161]. Сутність методу ґрунтується на тому, що дво-, трикратне адіабатне раптове скипання молока в камерах призводить до дроблення жирових кульок молока.

В розроблених вакуумних гомогенізаторах ВГ-5 широта розподілу жирових кульок за розмірами порівняна з обробкою в клапанних апаратах, однак їх середній розмір істотно більше і складає 1,5–2,5 мкм [160, 162]. Механізм диспергування молочного жиру в вакуумних гомогенізаторах істотно відрізняється від інших пристроїв відсутністю кавітації. Незважаючи на це при скипанні крапель молока у вакуумній камері жирова кулька потрапляє в умови, які подібні до гідродинамічних умов в зоні високих локальних тисків навколо бульбашки, яка схлопується. Тобто на жирову кульку діють інтенсивні локальні тиски, що спричиняють мікрозавихрення, які, згідно з турбулентною теорією руйнування, є причиною руйнування жирових кульок молока.

Кавітаційні пристрої для диспергування. Принцип дії кавітаційних диспергаторів базується на використанні коливань від вібраційних (десятки і сотні Гц) до акустичного ультразвукового діапазону ($>10^3$ Гц) для руйнування крапель дисперсної фази [22]. Для створення коливань використовуються гідромеханічні та гідродинамічні генератори [45, 206].

За принципом дії та конструктивно кавітаційні пристрої розділяють на 4 типи [198]:

– гідродинамічні (кавітація генерується гідродинамічним шляхом внаслідок вибору форми робочої камери, або розміщенням в останній кавітуючих елементів – кавітаторів);

– гідроакустичні (з резонатором і без резонатора) – в яких кавітація виникає внаслідок пульсацій тиску від коливань акустичного випромінювача в ультразвуковому спектрі частот;

– вібраційні, в яких кавітація виникає внаслідок змінного тиску за рахунок коливань, викликаних зовнішнім збудниками, такими як п'єзоелектричні, магнітострикційні та електродинамічні;

– розрядно-імпульсні, в яких використовується високовольтний розряд в рідині (електрогідравлічний ефект), внаслідок електропробою якої в зоні оточення каналу розряду виникають високі імпульсні тиски, ударні хвилі та акустична кавітація.

Інтенсифікуюча дія гідродинамічної кавітації зумовлена виникненням низки ефектів, а саме: пульсацій тиску (10^2 – 10^3 МПа) і хвиль розрідження-стиснення під час пульсації парогазових кавітаційних бульбашок; кумулятивних мікроструминок високого енергетичного потенціалу, які руйнують межі розділу фаз; фазових переходів на поверхні бульбашок; пульсацій температури (понад 10^3 К) внаслідок колапсу кавітаційних бульбашок [168].

Кавітаційні апарати значно менш енергоємні, ніж клапанні, компактні і зручні в обслуговуванні, при цьому одночасно з диспергуванням і емульгуванням спостерігається руйнування мікрофлори та клітин мікроорганізмів [84, 165, 335, 337]. Акустичне емульгування дозволяє отримувати дисперсність емульсій починаючи з розміру 1,2–1,8 мкм, що істотно більше за дисперсність після обробки в клапанних гомогенізаторах [38, 111, 239, 317].

Електрогідравлічні гомогенізатори. За рахунок надвисоких імпульсів тиску у продукті, що обробляється, створюються ударні хвилі, які призводять до ефекту електрогідравлічного удару [333]. Це створює високі локальні градієнти тиску і швидкості та кавітацію, що призводить до диспергування жирових часток до розмірів менше 1 мкм [106, 210, 308]. Але для рівномірності обробки емульсії необхідно значно підвищувати кратність обробки, що знижує енергоефективність пристрою та погіршує дисперсний склад емульсії, внаслідок одночасної коалесценції жирових крапель [28]. При тривалій дії електрогідравлічного впливу змінюється смак продукту.

Струминні гомогенізатори. В струминних апаратах для диспергування жирової фази молока гомогенізація відбувається за рахунок дії струменя (як вільного, так і затопленого) або потоку продукту.

Струминний гомогенізатор представляє собою форсунку або сопло, струмінь яких:

- відбивається близько розташованим відбивачем (ударні) [135, 164, 183];
- занурюється у дисперсійну рідину даної емульсії (роздільна гомогенізація) [40, 135];
- стикається з іншим струменем (протитечійно-струминні) [148, 264, 266];
- виходить у камеру більшого розміру, за рахунок чого створюються кавітаційні каверни [138];
- створює гідроакустичну та гідродинамічну кавітацію як за рахунок кавітатора, резонатора, так і за рахунок чергування зон високого та низького тиску (кавітаційні) [84, 110, 122, 198].

Сопловий гомогенізатор марки ОГВ розроблений В.Я. Грановським. Гомогенізуюча головка цього гомогенізатора складається з двох камер, у першій з яких продукту надається обертальний рух, у другій – поступальний при проходженні рідини через сопла. Гомогенізація відбувається при вприскуванні продукту до другої камери і при виході з сопла. Вихровий рух середовища, на думку автора, не відіграє особливої ролі. Основний принцип руйнування жирових кульок – за рахунок кавітації та турбулентності. Тому ефективність гомогенізації дорівнює 80% при тиску 10 МПа, а середній діаметр

жирових кульок дорівнює 1,2 мкм, що в 1,5 рази більше, ніж в клапанному гомогенізаторі [138].

Високі швидкості ковзання досягаються в **протитечійно-струминних гомогенізаторах**, що складаються з двох співвісно розташованих форсунок. Дисперсність жирової фази молока дуже висока (становить 0,7–0,8 мкм) і порівняна з дисперсністю, що досягається в клапанних гомогенізаторах [148, 264, 266, 268]. Незважаючи на низькі енерговитрати та високу якість обробки, значне спінювання заважає широкому використанню таких апаратів [260].

Струминними гомогенізаторами, які позбавлені вищевказаного недоліку є гомогенізатори з роздільним подаванням жирової фази у потік знежиреного молока [284, 288], або знежиреного молока у струмінь вершків (Т-гомогенізатори) [19, 23, 42]. Такі апарати дозволяють досягти високої різниці швидкості між жировою кулькою та плазмою і за показником ефективності гомогенізації не поступаються клапанним [43]. За рахунок використання роздільної гомогенізації (обробка лише жирової фази) вони мають низькі енерговитрати (менше 2 кВт·год/т) [296]. Також вони можуть суміщувати операцію нормалізації молочної суміші за жирністю [283], але при цьому потребують попереднього розділення молока на вершки та знежирене молоко (сепарацію). Завдяки необхідності використовувати для підвищення ступеня диспергування тонкі канали протитечійно-струминні апарати мають високу схильність до облітерації внутрішніх поверхонь сопел (заростання шаром продукту). Також такий тип гомогенізатора висуває високі вимоги до чистоти вершків для недопущення забивання каналів.

Гідродинамічні та гідроакустичні кавітаційні пристрої представляють собою конструкції, в яких шляхом чергування зон з різною швидкістю або взаємодії струменя (потіку) з кавітатором або резонатором ініціюється кавітація. Перевагами гідродинамічної кавітації (зниження тиску в потоці до значень, що близькі до значень тиску насиченої водяної пари за відповідних умов) порівняно із акустичною є рівномірність просторового оброблення рідиннофазового середовища та висока продуктивність [168].

Мікрофлюїдизатори дозволяють отримати найвищий ступінь диспергування з розмірами дисперсних часток меншими, ніж в клапанному УВТ гомогенізаторі: 10–100 нм та більш вузьким діапазоном розподілу жирових кульок по фракціях [18, 66]. Мікрофлюїдизатор складається з завантажувального резервуара, насоса високого тиску (від 100 до 300 МПа) та робочої камери, де відбувається зіткнення двох (або більше) потоків емульсії з високою швидкістю (більше 400 м/с). Під час проходження потоків через тонкі канали (50–300 мкм) в рідині виникають значні напруги зсуву (градієнт до 10^7 c^{-1}), а під час зіткнення в ударній камері – висока турбулентність, кавітація і високі швидкості обтікання жирових кульок [41].

Мікрофлюїдизатори допускають багатократну обробку при необхідності, але мають високі питомі енерговитрати та невисоку продуктивність (5–50 літрів за хвилину).

Поршньові гомогенізатори. Існують апарати, де емульсія утворюється завдяки зворотньо-поступальному руху поршня – так звані пульсаційні апарати [117, 130, 220, 221, 226, 231]. Зазвичай вони виконані у вигляді пластин або дисків з отворами, закріплених на вертикальних штангах, які здійснюють зворотньо-поступальні рухи. Рух поршня-ударника вниз або вгору спричиняє рух дисперсійної фази зі швидкістю $v_{пл}$, яка обтікає жирову кульку, що рухається в протилежному напрямку за рахунок сили інерції F_i (рис. 1.8) [153, 221, 303].

Існують також пульсаційні апарати, які конструктивно виконані у вигляді зануреної в апарат камери з системою різноманітних сопел [183]. Дисперсність емульсії перевищує цей показник для клапанної гомогенізації завдяки створенню високих швидкостей ковзання жирової кульки [229].

Пульсаційний гомогенізатор з двома поршнями, з'єднаними пружним елементом, показав високу ефективність. При дисперсності емульсії молока на рівні клапанних гомогенізаторів енерговитрати промислового зразка – менше 2 кВт·год/т [222, 224, 229].

Імпульсні гомогенізатори ударної дії. Диспергування молочної емульсії в імпульсних гомогенізаторах відбувається при збуреннях поршня

інтенсивністю 1,5 МПа та частотою 50Гц, створених за допомогою гідравлічних або пневматичних імпульсних приводів [212, 215, 217]. В таких гомогенізаторах можливо отримати емульсію з дисперсністю, яка перевищує показники клапанних гомогенізаторів (0,5 мкм), при енерговитратах менше 4 кВт·год/т, що в 2 рази менші за клапанну. Запропонована гіпотеза гомогенізації в імпульсних апаратах (здуванням мікрочасток з поверхні жирової кульки) є сумнівною внаслідок складності реалізації такого механізму руйнування для молока, густина дисперсної та дисперсійної фаз якої відрізняється лише на 5–6% [216]. Але ця гіпотеза базується на створенні швидкості ковзання за критерієм Вебера, що загалом співпадає з сучасними уявленнями про механізм гомогенізації. Створення імпульсів тиску (збурювань) високої інтенсивності має наслідком використання приводу з високим гальмівним та розгінним ефектом, що потребує високих витрат енергії.

Високошвидкісні міксери. Мішалки з високою частотою обертання є універсальним і дуже розповсюдженим обладнанням для створення стабільних емульсій різного складу [58, 90, 101, 104]. В них створюються високі швидкості руху продукту та, на відміну від клапанних, необмежений час впливу руйнуючих сил. Розмаїття конструкцій робочих органів сприяє до можливості створення високих градієнтів руху емульсії. Але режим роботи міксерів – періодичний. Для рівномірності диспергування при роботі мішалки продукт зазнає багатократної обробки, внаслідок чого один мікрооб'єм емульсії зазнає багато "зайвих" впливів робочих органів, які не призводять до диспергування дисперсних часток, що значно знижує енергоефективність процесу. При сталому русі мішальних органів, незважаючи на високу швидкість руху емульсії, градієнт швидкості знижується, що знижує ступінь диспергування [13]. Для його підвищення необхідно використовувати імпульсні режими руху мішалки, які енергетично неефективні внаслідок високих витрат енергії при розгоні та гальмуванні. Таким чином високошвидкісні міксери не отримали широкого розповсюдження для приготування мікроемульсій, таких як гомогенізоване молоко, та найчастіше застосовуються як емульсори (при необхідній дисперсності більше 2 мкм) [210, 217, 322].

Вихрові гомогенізатори. Вихрові гомогенізатори сконструйовані для створення максимальних умов диспергування за теорією низькотемпературної кавітаційної гомогенізації, рухомою силою якої є сублімація [93–95]. Конструкція такого типу гомогенізатора ґрунтується на принципі вихрової труби, теорія роботи якої на даний час не розвинена, яка, на думку авторів, дозволяє отримати максимальну довжину зон наднизького тиску [322].

Дисперсність емульсії після обробки у вихровому апараті сягає 1,2 мкм і енерговитрати на рівні протитечійно-струминної 3,8 кВт·год/т [233, 322].

Струменево-вихровий апарат марки Я9-ОЖЗ представляє собою блок емульгування, що має шість отворів діаметром 5 мм. Продуктивність машини 8000 л/год, робочий тиск – 0,3–0,4 МПа. Середній діаметр жирових кульок після обробки в емульсорі дорівнює 1,6–2,2 мкм [59].

Проаналізуємо основні фактори диспергування в сучасних гомогенізаторах молочної промисловості (табл. 1.4).

Таблиця 1.4

Переважні гідродинамічні явища, які призводять до руйнування жирових кульок молока в основних типах пристроїв для гомогенізації

Тип гомогенізатора	Турбулентність	Гradient потоку рідини	Обтікання жирової кульки	Кавітація	Електрогидравлічний удар	Сублімація	Скипання у вакуумі
1	2	3	4	5	6	7	8
Клапанний (фільєрний, гвинтовий)	●	●	●	●			
Мікро-флюїдизатор	●	●	●	●			
Імпульсний			●				
Пульсаційний			●				
Роторно-пульсаційний	●	●	●	●			
Ультразвуковий	●		●	●			
Протитечійно-струминний		●	●				
Вихровий (струменево-вихровий)			●	●		●	

1	2	3	4	5	6	7	8
Струминний з роздільної гомогенізацією			•				
Колоїдний млин	•	•					
Міксери	•	•	•				
Електрогідравлічний				•	•		
Вакуумний							•
Основні гідродинамічні фактори руйнування	Відносна швидкість дисперсної та дисперсійної фаз та прискорення потоку емульсії						

Основними причинами диспергування розробники та дослідники гомогенізаторів вважають турбулентність, градієнт потоку рідини (у повздовжньому і поперечному напрямках), обтікання жирової кульки і кавітацію. Електрогідравлічний удар поєднує дію кавітації та гідравлічного удару (високого градієнта течії). Але всі ці чинники можливо об'єднати такими гідродинамічними факторами як відносна швидкість дисперсної та дисперсійної фаз та прискорення потоку емульсії. Дійсно, і турбулентність, і градієнт потоку, і обтікання жирової частки призводять до появи ковзання жирової кульки відносно дисперсійного середовища. Ця швидкість пропорційна прискоренню потоку рідини. При цьому фактор прискорення обіцяє бути більш універсальним показником для багатьох типів гомогенізаторів, завдяки якому можливо створювати конструкції високоефективних апаратів з низькими енерговитратами.

1.4. Узагальнення механізмів руйнування жирових кульок молока

Хоча питанню дроблення крапель (диспергування, емульгування) приділено величезну кількість робіт, першими серед яких, є дослідження А.Н. Колмогорова [48, 185], достатньо повної картини цього складного явища не існує. Найбільш значні результати, що стосуються даної проблеми,

опубліковані також у роботах В.Г. Левича [194], Р.И. Нігматуліна [209], Х.А. Стоуна [70]. В апаратах з мішалками проведені дослідження дроблення крапель у відсутності коалесценції [104], а також процесу масообміну від бульбашок і крапель [90].

Стоуном [70] виділено чотири причини внутрішнього руху рідини в краплі: сдвигова течія протягом суцільного середовища; міжфазний натяг; рух, обумовлений плавучістю крапель (тобто різницею щільності); зміна міжфазного натягу (ефект Марангоні) та / або наявність ПАР.

Спробуємо провести узагальнення можливих механізмів подрібнення жирових кульок і оцінити ступінь їх впливу на кінцевий розмір часток дисперсної фази. При цьому будемо розглядати системи без поверхнево-активних речовин і з постійним міжфазним натягом. Число таких механізмів сягає десяти [79, 96, 137]:

1) Нестійкість Кельвіна-Гельмгольца [209], виникаюча в результаті достатньої різниці швидкостей між дисперсною та дисперсійною фазами.

2) Нестійкість Релея-Тейлора [209], що виникає при направленні вектора сил від важкої рідини до легкої (рідина з більшою густиною до меншої).

3) Дроблення крапель в турбулентному потоці рідини, обумовлене турбулентними пульсаціями [48].

4) Нестійкість Толміна-Шліхтинга, що виникає при переході від ламінарного режиму до турбулентного, коли паралельно-струминна ламінарна течія стає нестійкою внаслідок домінування інерційних сил над силами в'язкого тертя; може мати місце і в гомогенних системах [340].

5) Нестійкість Бенардо, що виникає завдяки флуктуаціям щільності (коли важкі шари рідини опиняються над легкими), викликаними у свою чергу, градієнтами температур і концентрацій; також може мати місце в гомогенних системах [340].

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 [340]. За даними

Б.Г. Новицького [206], цей процес може відбуватися і за рахунок перенесення на поверхні кавітаційного пухирця крапель однієї рідини при його міграції в іншу рідину (флотація). Існує гіпотеза й про кумулятивний механізм кавітаційного емульгування [175].

7) Динамічний – виникнення внутрішнього динамічного тиску у краплі, обумовленого тороїдальною течією або навіть турбулентним рухом в ній, здатного подолати зовнішній тиск і капілярні сили [194].

8) Дроблення крапель поблизу твердих стінок і інших елементів апарата [194].

9) Наявність зсувних і розтягуючих напружень в суцільному середовищі, здатних значно деформувати краплю – течія Куетта, різні види гіперболічних течій [340].

10) При нестационарному русі рідин можливий ще один механізм дроблення крапель – інерційний, експериментально та чисельно досліджений Стоуном [70].

Відзначимо, що найчастіше різкої межі між описаними механізмами немає, іноді деякі з них можуть бути зведені до інших. Наприклад, динамічний і інерційний в тій чи іншій мірі можуть вважатися еквівалентними.

Розглянемо роль цих механізмів в дробленні крапель (додаток Б) [79, 118, 137, 185, 194, 205, 273, 340], для чого порівняємо діаметри жирових часток молока в пульсаційному резонансному апараті, РПА циліндричного та дисково-циліндричного типів (властивості середовищ при температурі 60⁰С: $\rho_1 = 923$ кг/м³, $\rho_2 = 1030$ кг/м³, $\mu_1 = 1,8 \cdot 10^{-3}$ Па·с, $\mu = 5 \cdot 10^{-3}$ Па·с, $\sigma = 0,05$ Н/м) [78, 137, 273]. Властивості РПА: частота повздовжніх коливань ротора 50 с⁻¹, радіальна швидкість в апараті 32 м/с, максимальна швидкість в модуляторі апарата 130 м/с. Підсумки аналізу механізмів дроблення крапель, зводимо до таблиці 1.5 [78, 273].

Результати розрахунку розмірів жирових кульок молока

Механізм диспергування	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Пульсаційний резонансний апарат										
d, мкм	1,2	1,67	75	–	–	3,6	0,43	8,2	3000	0,68
РПА циліндричного типу										
d, мкм	0,1-10	0,15-6	0,2-2,5	–	–	4,3	3,8	4,3	94	0,12-6,9
РПА дисково-циліндричного типу										
d, мкм	1–135	1–133	–	–	–	300	–	17-38	28-633	–

З аналізу результатів таблиці можна зробити висновок, що домінуючими механізмами, які дають дані найбільш наближені до експериментальних, є нестійкості Кельвіна-Гельмгольца, Релея-Тейлора, інерційний і динамічний.

Крім наведених вище причин деформації і дроблення крапель в рідині, що коливається, можуть існувати ще й специфічні механізми, пов'язані з коливаннями самої краплі.

Релей [205] отримав вираз для розрахунку власних частот малих коливань рідкої краплі "близько її сферичної фігури рівноваги"

$$f_n = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{8n(n-1)(n+2)\sigma}{[(n+1)\rho_2 + n\rho_1]d^3}}, \quad (1.1)$$

де n – номер моди коливань;

σ – міжфазний натяг, Н/м;

ρ_1 – густина суцільного середовища, кг/м³;

ρ_2 – густина рідини в краплі, кг/м³;

d – діаметр краплі, м.

Діаметр частки, що резонує з частотою коливань емульсії f_n і подрібнюється на більш дрібні

$$d = \sqrt[3]{\frac{2n(n-1)(n+2)\sigma}{(f_n\pi)^2 [(n+1)\rho_2 + n\rho_1]}}. \quad (1.2)$$

Нульова мода ($n=0$) відповідає радіальним коливанням розширення-стиснення краплі і для нестисненої рідини неможлива, перша мода ($n=1$) відповідає поступальним коливанням краплі як цілого, що для рідини з постійним міжфазним натягом також неможливо. Результати розрахунків за формулою (1.2) при $n=2-5$ для розглянутої системи представлені в табл. 1.6.

Таблиця 1.6

Діаметр частки, що резонує з частотою коливань емульсії f_n власних коливань сферичних крапель

f_n , Гц	Діаметр частки, мкм			
	2	3	4	5
10	5500	7600	9400	11000
100	1200	1600	2000	2400
1000	260	350	440	510
10000	55	76	94	110
500000	4,1	5,6	6,9	81

З таблиці 1.6 слідує, що для дроблення жирової кульки діаметром 5 мкм необхідна частота коливань близько 500 кГц. Таких частот важко досягти навіть в ультразвукових пристроях для диспергування: гідродинамічних свистках, сиренах і т.п.

При проведенні аналізу застосування наведених механізмів для подрібнення жирової кульки молока, що рухається в оточенні молочної плазми, залишимо у формулах (Б.1–Б.10 додатку Б) лише змінні фактори, вважаючи константами густину, в'язкість, поверхневий натяг та інші постійні [273]. Результати наведено у таблиці 1.7.

Таблиця 1.7

Аналіз істотних факторів дроблення жирової кульки молока

Механізм диспергування	Характер залежності діаметра часток від основних факторів
1	2
Нестійкість Кельвіна-Гельмгольца	$d_k \sim \frac{1}{v^2}$

1	2
Нестійкість Релея-Тейлора	$d_k \sim \frac{l}{\sqrt{a}}$
Дроблення крапель в турбулентному потоці рідини (по Колмогорову і Левичу)	$d_k \sim \frac{L^{2/5}}{\nu^{6/5}}$
Динамічний механізм дроблення крапель (по Левичу)	$d_k \sim \frac{l}{\nu^2}$
Зсувний механізм емульгування (по Гопалу)	$d_k \sim \frac{l}{\nu}$
Інерційний механізм дроблення крапель	$d_k \sim \frac{l}{\nu^2}$

Аналізуючи дані таблиці, можна зрозуміти, чому більшість авторів для оцінки ступеня диспергування молочного жиру використовують критерій Вебера [48, 209, 210, 264]

$$We = \frac{\rho_{nl} U^2 d}{\sigma_{ж-н}}, \text{ або } d_k \sim \frac{We}{U^2} \quad (1.3)$$

За цим критерієм діаметр кульки 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 [48, 210]. 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. Диспергування відбувається лише при різкій зміні потоку, що відбувається у клапанних гомогенізаторах в момент проходження вузької щілини і струминних гомогенізаторах при зіткненні потоків. При цьому швидкість зміни потоку і буде пропорційною швидкості потоку ($\nu \sim U$), що експериментально

підтверджується дослідями гомогенізації в клапанних та струминних гомогенізаторах [92, 266].

1.5. Аналіз теоретичних основ методології розрахунку ступеня дисперсності жирової фази після гомогенізації

Незважаючи на широке поширення процесу отримання емульсій, нині відсутня єдина методика розрахунку апаратів для диспергування молочного жиру до заданого ступеня дисперсності. Існуючі методики розрахунку отримані в основному емпіричним шляхом і не універсальні – використовуються лише для апаратів певного типу. При дослідженні нового типу гомогенізатора автором зазвичай розробляється своя методика його розрахунку [105, 210, 215, 217, 322, 345, 346].

Не полегшує задачу визначення методики розрахунку диспергаторів і велика кількість існуючих теорій і механізмів гомогенізації і диспергування. Причому автори теорій диспергування не погоджують свої припущення з наявними підтвердженими і доведеними експериментально механізмами руйнування часток емульсії.

В роботі [343] за основний механізм руйнування прийнята теорія "розтяг-розрив", запропонована Ребіндером та розвинута Віттігом, візуальні дані деформації та руйнування за якою співпадають з експериментальними даними. Визначальною силою прийнята сила інерції, яка пов'язана з прискоренням потоку на вході в клапанну щілину. Методика передбачає визначення емпіричних коефіцієнтів для кожної конструкції клапанного пристрою.

В роботі [62] задача руху рідини через робочу щілину клапанного гомогенізатора вирішена для періодичних рухомих граничних умов у припущенні, що в реальних умовах клапан здійснює періодичні коливання. Отримано висновок про змінні за часом координати точок потоку, де тангенційні напруження рівні нулю. Додаткова осцилююча сила може бути інтенсифікуючим фактором в клапанному гомогенізаторі. Але справедливість припущень не була перевірена на практиці.

В монографії [210] ступінь гомогенізації клапанного гомогенізатора визначається через експериментальний графік необхідного значення числа Вебера для клапана з рівною та рельєфною поверхнею. Після чого розраховується необхідна швидкість потоку в клапанній щілині та тиск гомогенізації. Така методика придатна для розрахунку типових клапанних гомогенізаторів лише для двох типів клапанів. Крім того, числа Вебера, показані на графіку, визначені для модифікованого критерія Вебера [225, 285], в якому замість швидкості ковзання використана швидкість потоку емульсії:

$$We_m = \frac{\rho_{nl} dv_n^2}{\sigma_{ж-н}}, \quad (1.4)$$

де v_n – швидкість потоку емульсії, м/с.

У будь-якому диспергаторі v_n визначити не представляє труднощів. Такий підхід полегшує розрахунки, але має істотні недоліки. По-перше, критичне значення We_m необхідно визначати для кожного диспергатора окремо при його проектуванні та не можна порівнювати We_m для різних типів гомогенізаторів. По-друге спотворюється фізичний сенс критерію Вебера: неможливо дати оцінку енергоефективності пристрою для диспергування. Наприклад швидкість потоку може бути скільки завгодно великою (і, як наслідок, великі енерговитрати на створення такого потоку), а швидкість ковзання бути рівною нулю, отже диспергування в такому потоці взагалі не відбувається.

В роботі [264] наведено розрахунок протитечійно-струминного гомогенізатора, який базується на критерії Вебера. Але замість швидкості ковзання використана швидкість потоку струменя. Аналогічний недолік має методика розрахунку імпульсного гомогенізатора, яка теж ґрунтується на розрахунку числа Вебера [221, 223].

В монографії [210] приводиться більш універсальна методика розрахунку ступеня дисперсності молочної емульсії як відношення початкового діаметра d_n жирової кульки в негомогенізованій емульсії до її діаметра після обробки d_k , яка основана на виводі критеріального рівняння, за методом подібності та аналізу розмірностей

$$\frac{d_k}{d_n} = \frac{0,4}{We^{0,22} Bo^{0,5} Nj^{0,42}}, \quad (1.5)$$

де We – критерій Вебера;

Bo – критерій Бонда;

Nj – критерій, який показує відношення сил в'язкості дисперсійного середовища до сил міжфазного поверхневого натягу.

Залежність (1.5) дозволяє прогнозувати форму клапанної щілини та кратність обробки в клапанному гомогенізаторі для підвищення ефективності його роботи. Найбільша "питома вага" серед критеріїв формули (1.5) у числа Бонда, що показує співвідношення між зовнішніми силами та силами поверхневого натягу

$$Bo = \frac{d^2 a (\rho_{nl} - \rho_{mc})}{\sigma_{mc-n}}. \quad (1.6)$$

Визначальним змінним параметром числа Бонда, на відміну від критерія Вебера, є прискорення. Крім того, важливою є величина різниці густини фаз між дисперсним та дисперсійним середовищем. Для молока ця різниця досить мала і становить $1035 - 923 = 112 \text{ кг/м}^3$. Густина середовищ відрізняється лише на 10%, що є однією з причин низької ефективності диспергування молочного жиру. Внаслідок емпіричного способу отримання рівняння (1.5) та заміни швидкості ковзання в We на швидкість потоку таку формулу можна застосовувати лише для клапанних гомогенізаторів з несуттєвими змінами у конструкції клапанної головки.

Автор роботи [78] шляхом аналізу можливих механізмів руйнування крапель в пульсаційних (вібраційних) апаратах виділяє 3 критерія, які аналогічні дослідженням Є.В. Нужина [210]: Бонда, Вебера і капілярності Ca , який за фізичним змістом повністю аналогічний Nj у формулі (1.5), що свідчить про подібність сил і механізмів руйнування в клапанних і суттєво відмінних за принципом дії вібраційних апаратів.

Ю.Ф. Дітякіним досліджені механізми руйнування крапель різної в'язкості в широкому діапазоні швидкостей ковзання [156]. Для високов'язких

емульсій, до яких відносяться дисперсні молочні системи, виявлено, що:

- при зменшенні діаметра частки критичне значення критерію Вебера We_k зростає;
- We_k залежить від критерію Лапласа;
- зростає час індукції і час руйнування частки;
- при руйнуванні утворюються не краплі, а тонкі нитки.

По Ю.Ф. Дітякіну, режими руйнування крапель в залежності від швидкості руху дисперсійної фази діляться на 2 види: близькі до критичного $We > We_k$ і закритичні $We \gg We_k$. Для в'язких рідин при співвідношенні щільності фаз, близькому до одиниці, диспергування по останньому виду ускладнене. Крім того, руйнування може відбуватися по вібраційній моді або з утворенням тонкої плівки, що видувається потоком.

Залежно від зміни характеру потоку з часом руйнування може бути в стаціонарному або нестаціонарному потоці. У імпульсних (ударних) і роторно-пульсаційних диспергаторах реалізується процес дроблення в нестаціонарному потоці, для клапанних і струминних – в стаціонарному.

Таким чином для диспергаторів жирових молочних емульсій характерне диспергування при невеликому перевищенні критичного числа Вебера з деформацією, що має форму сильно витягнутих крапель.

Критерій Вебера, як відомо, визначається із залежності (1.4).

Критерій Лапласа має вигляд

$$La = \frac{\sigma \rho_2 d}{\eta^2}, \quad (1.7)$$

де μ – динамічний коефіцієнт в'язкості дисперсійної фази, Па·с.

Для розрахунку міри дисперсності отриманої емульсії (середнього розміру жирових часток) необхідно визначити:

- критичне значення критерію Вебера;
- швидкість ковзання дисперсних часток і значення критерію Вебера;
- час індукції і час, потрібний на руйнування дисперсної частки;
- час дії факторів дисперсну фазу емульсії.

Критичне значення критерію Вебера We_k залежить від критерію Лапласа і описується емпіричною формулою:

$$We_k = 10(1 + 1,93La^{-0,37}). \quad (1.8)$$

Наприклад, для молочної емульсії розраховане значення We_k згідно останньої формули складає 66.

Час повного руйнування частки емульсії τ_p визначається по формулі [156]:

$$\tau_p = \frac{4,5d(1 + 1,2La^{-0,37})}{v_e}, \quad (1.9)$$

де v_e – швидкість руху емульсії, м/с.

Для руйнування дисперсної частки необхідно, щоб час дії на неї робочих органів диспергатора τ був більше за необхідний

$$\tau > \tau_p. \quad (1.10)$$

Наприклад, час знаходження жирової кульки молока в клапанній щілині завдовжки L гомогенізатора можна розрахувати як:

$$\tau = \frac{L}{v_e}. \quad (1.11)$$

При $L=4-8$ мм і швидкості потоку в ній $v_e=120-180$ м/с, $\tau=2,2-6,6 \cdot 10^{-5}$ с. Час руйнування τ_p по формулах (1.9) і (1.11) для молочної емульсії складає $(4-5) \cdot 10^{-8}$ с, тобто умова (1.10) для клапанного гомогенізатора виконується. З результатів розрахунків можна зробити висновок, що час впливу гідродинамічних факторів на жирову частку (час руйнування) набагато менший за необхідний для клапанного гомогенізатора. Завдяки малій довжині клапанної щілини та високій швидкості її руху, тривалість впливу руйнуючих факторів в ньому – одна з найменших. Тому для інших типів диспергаторів час впливу руйнуючих сил буде набагато перевищувати необхідний.

Швидкість ковзання для отримання емульсії з розмірами жирових кульок, меншими за заданий d_k , обчислюється за формулою:

$$v \geq \sqrt{\frac{We_k \sigma}{\rho_2 d_k}}. \quad (1.12)$$

Для розрахунку швидкості ковзання часток дисперсного середовища зручно застосовувати комп'ютерні програми для моделювання потоків рідин, наприклад ANSYS, COSMOS, Fluent, Comsol Multiphysics, RealFlow та ін. При розрахунках струминних (з роздільною подачею дисперсної фази) і протитечійно-струминних диспергаторів [273] визначення швидкості ковзання не є складним завданням, на відміну від клапанних і роторно-пульсаційних апаратів. Але дійсність формули (1.9) для мікроскопічних емульсій не була підтверджена експериментально. В досліджах [156] розміри часток, що диспергуються, не перевищували 300 мкм через складність спостереження за руйнуванням більш дрібних крапель. Крім того, велика частина досліджень проводилася при співвідношенні щільності дисперсної і дисперсійної фаз більше 500–800 (вода – повітря, олія – повітря). Проте молочна емульсія має співвідношення щільності фаз майже на 3 порядки менше. За таких умов, створити значну різницю швидкостей між часткою і навколишньою дисперсійною фазою складно. Висока, в порівнянні з повітрям, в'язкість дисперсійної фази, захоплює в рух сусідні шари рідини, що у поєднанні з малими розмірами часток дисперсного середовища призводить до істотних труднощів створення необхідної для руйнування швидкості ковзання.

Таким чином, результатом відсутності єдиної теорії гомогенізації є брак єдиної методики розрахунку гомогенізаторів молока різних типів. Існуючі методи розрахунку дисперсності жирової фази отримані в основному емпіричним шляхом і придатні лише для апаратів певної конструкції. З розглянутих методик найбільш близькою за можливостями широкого застосування є методика розрахунку критеріїв подібності Вебера, Бонда і капілярності, які базуються на визначенні швидкості обтікання жирової частки, швидкості її руху та прискорення. Час впливу гідродинамічних факторів на жирову частку (час руйнування) в гомогенізаторах, які використовуються в молочній промисловості, на 2 порядки перевищує необхідний.

1.6. Обґрунтування методів інтенсифікації процесу диспергування молочних емульсій

Для підвищення ефективності гомогенізації: зниження енерговитрат та (або) підвищення ступеня гомогенізації молочних емульсій використовують [68, 169, 175, 176, 200, 202, 203, 235, 334]:

- роздільну гомогенізацію;
- накладання механічних коливань на емульсію, що обробляється [107–109, 136];
- резонансні явища [68, 69];
- багатократну обробку;
- багатоступінчасту гомогенізацію.

1.6.1 Використання роздільної гомогенізації

Роздільна гомогенізація передбачає відділення вершків з молока шляхом сепарації та гомогенізацію лише жирової фази (вершків) [72]. Змішування гомогенізованих вершків зі знежиреним молоком здійснюється після гомогенізації. Така форма гомогенізації отримала широке використання при виробництві пастеризованого молока. Значне зменшення об'єму продукту, який піддається гомогенізації, пропорційно зменшує енерговитрати до 80% та необхідну продуктивність машини (приблизно 5 разів) [62]. При обробці вершків в клапанному гомогенізаторі необхідний тиск гомогенізації зменшується на 20–40% у порівнянні з молоком.

Деякі типи гомогенізаторів (струминні з роздільним подаванням жирової фази та Т-гомогенізатори) потребують обов'язкової сепарації молока до подачі його в машину [19, 23]. Недоліком роздільної гомогенізації є додаткові витрати на розділення молока на знежирене молоко та вершки. Існують обмеження на максимальну жирність вершків для обробки в клапанному гомогенізаторі (18–20%) [62]. Крім того, підвищується ступінь коалесценції жирових кульок, що може призвести до погіршення якості гомогенізованої емульсії.

1.6.2 Накладання механічних коливань на емульсію, що обробляється

Групою дослідників [78, 80, 176] вивчено вплив низькочастотних пульсацій на перебіг диспергування. Експерименти, описані в роботах [79, 174, 200, 206], показали, що при відносно низьких частотах (порядка десятків і сотень Гц) і амплітудах порядку 10^{-3} м, в рідині спостерігаються явища, схожі з тими, що відбуваються в озвучуваній ультразвуком рідині, такі як вібротурбулізація, розвиток і схлопування кавітаційних бульбашок, диспергування крапель тощо, що представляють безпосередній інтерес з точки зору інтенсифікації процесу гомогенізації молока.

Проведемо співставлення двох способів введення енергії в рідину: в класичних гомогенізаторах і при накладанні механічних коливань [78]. Якщо розглянути дисипацію потужності в таких гомогенізаторах, як клапанні, пульсаційні, роторні, струминні, то внаслідок високої нерівномірності її розподілення по об'єму апарата (у пристінних зонах робочих органів градієнт швидкості на порядок вищий, ніж у центральних) відбувається дисипація потужності не на поверхні розділу фаз, в результаті чого енергія використовується неефективно. Добре відомі випадки, коли, наприклад, не більше 10% частинок циркулюють в емульсії, що обробляється втричі довше, ніж інші, яким "пощастило" частіше потрапляти в зону дії локальних градієнтів тиску та кавітації [80]. Оскільки увесь об'єм гетерогенної рідини при накладанні вібрації здійснює коливання, то логічно припустити, що дисипація буде відбуватися у всьому об'ємі з однаковою інтенсивністю. При цьому будуть усунуті застійні зони з низьким градієнтом швидкості та недоліки у дисперсному складі обробленого продукту. Таким чином, спрямовуючи енергію, що вводиться в апарат, переважно на поверхні розділу фаз, та ще і в умовах резонансних коливань, можна добитися максимального зниження енерговитрат [78].

Вібрація робочих органів з успіхом використовується у імпульсних, пульсаційних та роторно-пульсаційних апаратах з ротором, що вібрує. Як

показують експериментальні дослідження, саме в таких типах гомогенізаторів досягається найвищий ступінь дисперсності молочної емульсії при енерговитратах у 2–4 рази менших за енерговитрати клапанних гомогенізаторів [212, 221, 272].

1.6.3. Використання резонансних явищ

Використання зовнішніх керованих вібраційних впливів для створення резонансу в масоенергообмінних процесах – відомий шлях для значної інтенсифікації процесів диспергування [78–80, 236, 270].

У механіці лінійних систем без демпфування (консервативних систем) явищем резонансу називають різке зростання амплітуди сталих вимушених коливань системи, обумовлене близькістю частоти зовнішнього періодичного впливу на систему і одній з частот її власних (незатухаючих) коливань [107–109, 136]. Особливість цих впливів полягає в тому, що частота коливань збудливої зовнішньої сили відповідає частоті власних коливань системи "апарат –неоднорідне середовище, що обробляється" і узгоджена з максимальним масоенергопереносом або в самому неоднорідному середовищі, або на його кордонах (наприклад, стінках апарата). При цьому виникають переваги в порівнянні з традиційними апаратами, що пов'язані зі зниженням енерговитрат, збільшенням відносної швидкості, об'ємної частки і зменшення розмірів частинок (крапель і бульбашок).

До особливостей фазових співвідношень при резонансі в системах з в'язкою дисипацією (коли сила тертя пропорційна швидкості руху) слід віднести векторну рівновагу сил інерції і пружності, між якими відбувається обмін реактивної складової потужності, і рівновага векторів зовнішньої (змушуючої) сили і сили в'язкого тертя, причому зовнішня сила здійснює роботу по відшкодуванню втрат активної потужності. Таким чином, резонанс характеризується тим, що зовнішні впливи при сталому режимі коливань потрібні лише для підтримки досягнутої при перехідному процесі амплітуди коливань і затрачуються цілком на компенсацію втрат енергії, обумовлених

дисипацією в системі. З цієї причини вимога проведення процесів при резонансі враховується багатьма дослідниками при проектуванні пульсаційних апаратів [88, 330].

Аналіз розмірів крапель і бульбашок, утворених у резонансній коливальній апаратурі [78, 80], показав, що домінуючими механізмами дроблення є динамічні, обумовлені високими відносними коливальними швидкостями фаз або їх прискореннями; роль турбулентних пульсацій при цьому другорядна [1, 8, 78].

Недоліком використання резонансних режимів роботи обладнання може бути підвищене механічне навантаження на рухомі частини і вузли апарата.

В клапанних, роторних, пульсаційних і струминних гомогенізаторах споживана потужність дисипується не тільки на поверхні контакту фаз, але і у всьому обсязі, внаслідок чого енерговитрати апарата значно більші за енергію, необхідну для диспергування жирових часток молока. Природно очікувати, що одна частина жирових кульок не встигне зруйнуватися, а інша встигне піддатися впливу руйнуючих зусиль багатократно. Щоб зняти в значній мірі перерахований недолік, необхідно створити істотні прискорення в середовищах, що мають відмінну густину фаз.

Нехай коливається деякий об'єм рідини, що містить частинку, краплю. За рахунок різниці густини буде спостерігатися відносно періодичне прослизання частинки. Таким чином, дисипація енергії буде відбуватися поблизу поверхні розділу фаз, і вся потужність, що підводиться до апарата, буде переходити в корисну. Оскільки весь обсяг неоднорідного середовища здійснює коливання, то логічно припустити, що при рівномірному розподілі частинок за об'ємом апарата дисипація буде відбуватися з однаковою інтенсивністю у всьому обсязі і сили міжфазної взаємодії будуть також однакові.

Але при удосконаленні апаратів, призначених для створення гомогенних емульсій і дисперсій, створення умов для виникнення резонансних вібраційних або акустичних коливань лише в рідкісних випадках приділялася увага такому питанню як відповідність режимних параметрів (частота, амплітуда, швидкість)

апарата оптимальним умовам для гомогенізації. Таким чином, стримуючим фактором у використанні резонансних коливальних гомогенізаторів є недостатня вивченість і відсутність надійних методик розрахунку амплітудно-частотних, гідродинамічних і масообмінних характеристик, особливо в резонансному режимі коливань.

Аналіз конструкції роторно-пульсаційних апаратів з інтенсифікацією процесу диспергування дисперсної фази емульсії резонансними явищами.

За останні 20 років запропоновано більше 100 патентних документів, спрямованих на вдосконалення конструкції РПА, причому не завжди наведені зміни призводять до підвищення ефективності процесу [192]. Аналіз основних конструктивних рішень РПА, які дозволяють підвищити ступінь диспергування та (або) зменшити питомі енерговитрати цього процесу за рахунок резонансних ефектів, наданий у додатку В. Зупинимось докладніше на найбільш перспективній, на наш погляд, конструкції РПА, в якій ротор крім обертання здійснює осьові коливання: пульсаційного апарата з ротором, що вібрує [245]. Такий РПА (рис. 1.15) складається з корпусу 1, в який вмонтований електромагніт 10.

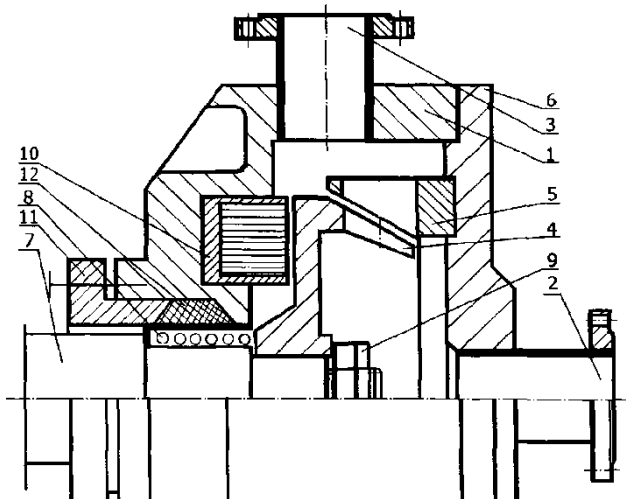


Рис. 1.15. Роторно-пульсаційний апарат з ротором, що вібрує

Ротор 4 встановлений на валу 7 і притиснутий пружиною 8 до гайки 9. Статор 5 жорстко закріплений на кришці 6. Між ротором і статором

виставлений мінімальний проміжок. До складу апарата входять також кришка 11, ущільнення 12, патрубки 2 для введення і 3 для виведення компонентів.

Апарат працює таким чином. Середовище, що обробляється через вхідний патрубок 2 поступає в центральну частину пристрою і під дією відцентрових сил проходить в проміжок між ротором 4 і статором 5. За рахунок удару часток об зуби ротора і статора, а також зсувних напруг, що виникають в проміжку, відбувається їх дроблення. При подачі змінної напруги на котушку електромагніту 10 виникають осьові коливання ротора 4.

У момент його тяжіння до електромагніту проміжок збільшується. Значення радіального проміжку є змінною величиною в часі, що дозволяє змінювати величину зсувних напруг гетерогенного середовища. В процесі обертання ротора відбувається періодичне перекривання прорізів, внаслідок чого виникає гідравлічний удар і генерування акустичних коливань. Таким чином, на середовище, що обробляється відбувається одночасне накладення пружних коливань і осьових вібрацій. Для ефективної роботи апарата повинна виконуватися наступна умова: частота вібрацій ротора кратна частоті перекриття прорізів ротора. Пройшовши активну зону, суміш потрапляє в зовнішню камеру і виводиться через патрубок 3. Таким чином, в пропонованій конструкції РПА за рахунок вмонтованого в корпус електромагніту можлива обробка середовища в умовах резонансу, що дозволяє інтенсифікувати технологічні процеси в ній і підвищити якість отриманого продукту.

На основі розглянутих конструктивних і технологічних особливостей РПА можна зробити такі висновки:

- практично усі конструктивні елементи проектуються для підвищення амплітуди пульсацій тиску, зсувних напруг, розвитку турбулентності і (або) кавітації;

- в існуючих конструкціях резонаторів у вигляді голок, мембран і інших пружних елементів неможливо створювати режими, де б частота вібрацій та пульсацій регулювалась незалежно від частоти обертання ротора; такі можливості присутні тільки в конструкціях, де ротор здійснює коливання

відносно осі обертання, якими можливо керувати незалежно від обертання ротора;

– для ПА з ВР відмічено, що частота вібрації ротора повинна бути кратна частоті перекриття отворів, що створює умови для виникнення резонансу;

– дослідження якості диспергування та ґрунтовні теоретичні дослідження РПА зі збудниками механічних коливань не проводились, тому дослідження таких пристроїв є перспективним напрямом подальших досліджень, який може дозволити підвищити ефективність гомогенізації емульсій в РПА.

1.6.4. Багатоступінчаста гомогенізація

Багатоступінчаста гомогенізація отримала застосування в клапанних гомогенізаторах. З цією метою клапанна головка складається з двох незалежних комплектів "клапан-сідло". Молоко проходить послідовно першу ступінь обробки (під тиском крізь кільцеву щілину, утворену клапаном і сідлом), а потім – через другу. Основна перевага багатоступінчастої гомогенізації – зменшення розмірів жирових кульок і більш вузьке розподілення їх за розмірами.

Тиск другої ступені (P_2) нижчий за тиск першої ступені (P_1). Найкращі результати отримані при використанні тиску другої ступені $0,2P_1$. Друга ступінь створює зниження перепаду тиску на першій ступені клапанного гомогенізатора [199, 210, 257, 332, 339]. Механізм впливу пояснюється: змінами кавітаційного режиму в клапанному зазорі обох ступенів, змінами турбулентності або руйнуванням агломератів жирових кульок, які утворились після проходження першої ступені клапанної головки [62].

Серійно випускаються двоступінчасті головки клапанних гомогенізаторів, які дозволяють знизити питомі енерговитрати процесу на 15–20% [210, 322]. При цьому тиск на другій ступені гомогенізації менший за тиск на першій ступені. Крім клапанних гомогенізаторів двоступінчаста гомогенізація застосовується у вакуумних гомогенізаторах типу ВГ [160, 162].

Механізм зменшення енерговитрат при багатоступінчастій гомогенізації

пояснюється: по-перше – підвищенням часу впливу гідродинамічних факторів руйнування, по-друге – охопленням більшої частини жирових кульок руйнуючих її факторів.

1.6.5 Багатократна обробка

Збільшення кратності обробки жирової емульсії – кількості проходжень крізь робочі органи гомогенізатора, використовується у багатьох видах гомогенізаторів, таких як ультразвукові, пульсаційні, фільтрні, струминні, електрогідравлічні та міксери [261]. Багатократне проходження продукту крізь робочі органи апарата призводить до значного підвищення дисперсності емульсії (в 2 і більше разів) на відміну від двоступінчастої гомогенізації, завдяки якій дисперсність зростає максимум на 20%.

Для міксерів, ультразвукових та електрогідравлічних пристроїв багатократна обробка є необхідною для досягнення високої дисперсності внаслідок того, що робочими органами за один цикл проходження емульсії не забезпечується або повнота охоплення всього об'єму емульсії, або необхідна інтенсивність впливу. Залучення більшої частини жирових кульок під дію руйнуючих факторів при багатократній обробці необхідне внаслідок неоднорідної структури потоку у гомогенізаторах. Наприклад, у міксерах гідродинамічні умови пристінного шару емульсії істотно відрізняються від аналогічних умов центральної зони, де швидкість потоку менше. Градієнт швидкості в пристінних зонах в 2–3 рази вищий, ніж у центральній частині потоку [37].

На відміну від багатоступінчастої, при багатократній гомогенізації гідродинамічні умови в робочих органах не змінюються.

При багатократній обробці жирові частки, які при першому проходженні крізь клапанну щілину потрапили у зони, несприятливі для руйнування, при другому (і більше) проходженні можуть уникнути таких зон. Таким чином, при збільшенні кратності обробки підвищується вірогідність потрапляння жирових

кульок у зони робочих органів гомогенізаторів з достатніми для руйнування гідродинамічними умовами (високим градієнтом швидкості, зони кавітаційних мікро– і макрозбурювань, зони високого прискорення потоку і т.д.).

За експериментальними даними, отриманими Нужиним Є.В. [210] для клапанної гомогенізації, залежність ефективності гомогенізації від кратності (кількості проходжень через клапанну щілину гомогенізуючої головки) має параболічний характер (рис. 1.16).

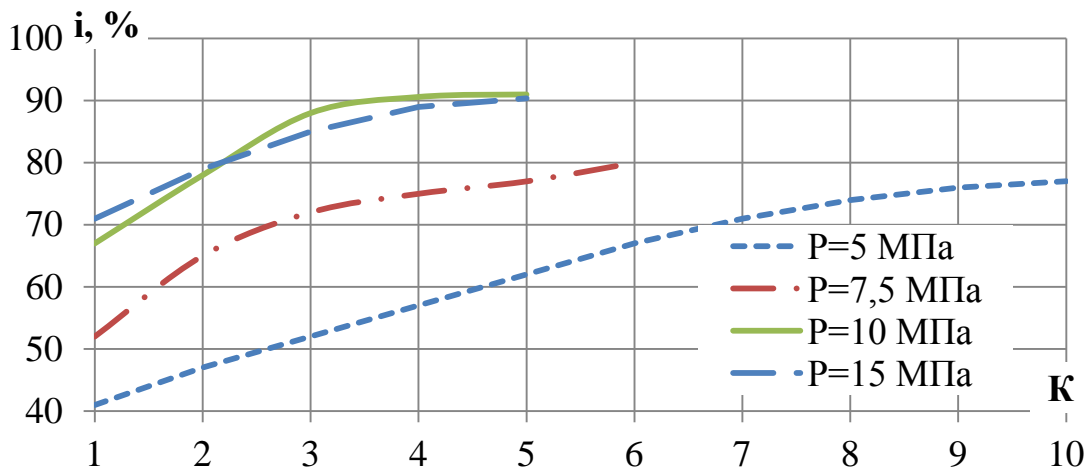


Рис. 1.16. Залежність ефективності гомогенізації (i) % від тиску гомогенізації (P) МПа та кратності проходження крізь клапанну головку K .

У додатку Г представлений аналіз досліджень впливу кратності на енерговитрати та прискорення потоку емульсії в клапанній щілині гомогенізатора. З цих даних було зроблено декілька висновків:

- при розробці або вдосконаленні гомогенізаторів з метою зменшення питомих енерговитрат, необхідно намагатися зменшити кратність проходження продукту крізь робочі органи машини;
- знизити питомі енерговитрати процесу гомогенізації за рахунок багатократної обробки можливо, якщо на другій (i більше) ступені використовувати режими з меншими енергетичними витратами, наприклад знижувати тиск гомогенізації;
- для зниження кратності обробки необхідно створювати максимально рівномірні умови гідродинамічного диспергування у робочих органах гомогенізаторів;

– тиск (та ефективність гомогенізації) можливо представити у вигляді залежності від прискорення потоку емульсії в клапанній щілині.

1.7. Перспективні напрями підвищення ефективності процесів гідродинамічного диспергування молочних емульсій

З проведеного аналізу та узагальнення гіпотез і механізмів диспергування, конструкцій гомогенізаторів, а також способів інтенсифікації процесу диспергування жирової фази молока можливо виділити такі вимоги до сучасних високоефективних гомогенізаторів [140]:

– для підвищення ефективності процесу гомогенізації та зниження його енерговитрат конструкція гомогенізатора повинна забезпечувати можливість отримання високого числа Вебера, а отже високого градієнту (прискорення) емульсії;

– для підвищення ефективності процесу гомогенізації та зниження його енерговитрат конструкція гомогенізатора повинна забезпечувати можливість збільшення часу обробки до необхідного для повного руйнування жирової кульки;

– сучасний високоефективний гомогенізатор повинен забезпечувати високу надійність роботи та невисоку вартість, а отже працювати при низькому тиску, не мати схильності до облітерації, піноутворення та повинен забезпечувати безперебійну роботу навіть при істотному забрудненні сировини;

– для подальшої розробки необхідно обирати гомогенізатор з високим потенціалом, тобто такий, що показує високий ступінь гомогенізації (не нижче за клапанний);

– для підвищення ефективності гомогенізації необхідно оптимізувати кратність обробки та застосовувати накладання коливань, резонансні явища та роздільну гомогенізацію [304].

Аналіз механізмів гомогенізації молочної емульсії дає підставу стверджувати, що визначальна роль в процесі диспергування молочного жиру належить різниці швидкості між жировою кулькою та плазмою – швидкості

ковзання жирової кульки. Найбільш простий та очевидний спосіб для створення виникнення ковзання жирової кульки – виділення молочного жиру з молока та подача його тонким струменем або плівкою у швидкісний потік продукту (рис. 1.17 а).

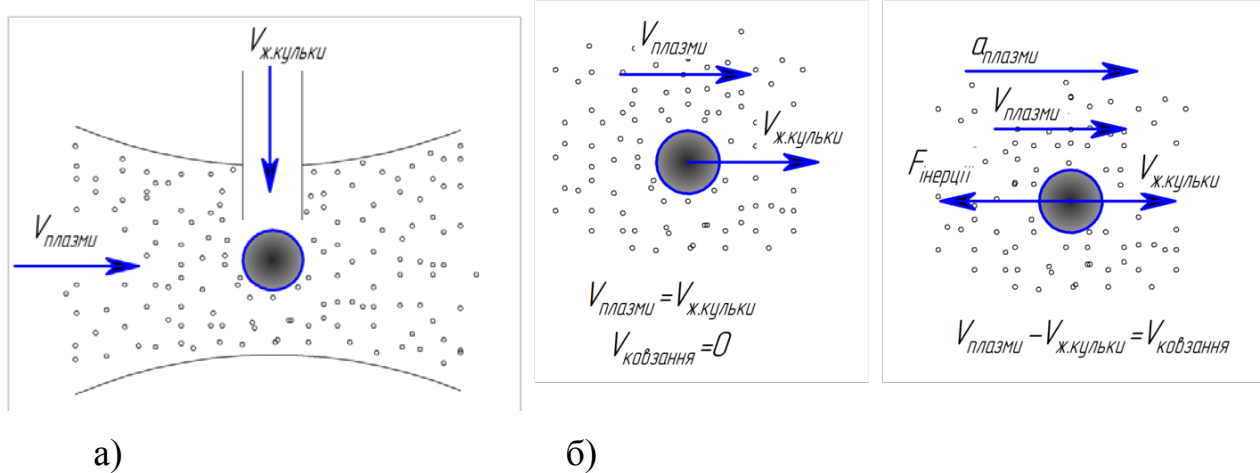


Рис. 1.17. Виникнення швидкості ковзання жирової кульки відносно оточуючої дисперсійної фази молока: а) при подачі жирової фази у струмінь знежиреного молока, б) при русі емульсії з прискоренням

При цьому відносна швидкість фаз пропорційна прискоренню потоку молочної емульсії, яке досить легко розрахувати для будь-якого типу гомогенізуючого пристрою, завдяки чому прискорення потоку може стати узагальнюючим ключовим фактором диспергування жирової фази молока (рис. 1.17 б).

Найрозповсюдженіші типи гомогенізаторів – клапанні та роторно-пульсаційні для досягнення необхідної швидкості ковзання жирової кульки використовують високий градієнт швидкості потоку емульсії. Закономірним недоліком цього є недостатність величини градієнту швидкості в центральній частині щілини або роторного зазору при підвищенні турбулентності потоку. Результатом є поява значного відсотка великих (незруйнованих) жирових кульок [322]. Методом вирішення подібної проблеми є накладання механічних коливань на середовище, що обробляється, в результаті чого дисипація потужності відбувається рівномірно у всьому об'ємі емульсії. При застосуванні механічних коливань з'являється можливість використовувати

високоєфективний метод підвищення амплітуди коливань і зниження енерговитрат процесу – резонанс.

З точки зору потенціалу збільшення швидкості ковзання жирової кульки та підвищення прискорення потоку емульсії виділено 3 групи перспективних диспергаторів: пульсаційні гомогенізатори з одним поршнем (ППГ), пульсаційні апарати з ротором, що вібрує (ПА з ВР) і струминні гомогенізатори з роздільним подаванням жирової фази (СГРЖФ) (рис. 1.18) [153, 182, 295, 304].



Рис. 1.18. Перспективні типи гомогенізаторів молока та їх основні ключові переваги

Додаткова інтенсифікація процесу гомогенізації в таких пристроях здійснюється за рахунок:

- концентрації енергії, що підводиться, на жировій фазі емульсії – використання роздільної гомогенізації: попереднє розділення молока на вершки та знежирене молоко і обробка лише жирової фази та подачі жирової фази у швидкісний потік знежиреного молока, чим досягається зменшення об'єму емульсії, яка оброблюється, що призводить до пропорційного скорочення енерговитрат;

- використання резонансних явищ при накладанні додаткових механічних коливань, що підвищує швидкість ковзання і знижує енерговитрати процесу;

- застосування багатократної обробки емульсії для мінімізації енерговитрат при підтриманні високого ступеня гомогенізації.

Принцип дії ПА з ВР, полягає у періодичному перекритті отворів ротора і статора при коливальних рухах (вібрації) ротора (рис. 1.19).

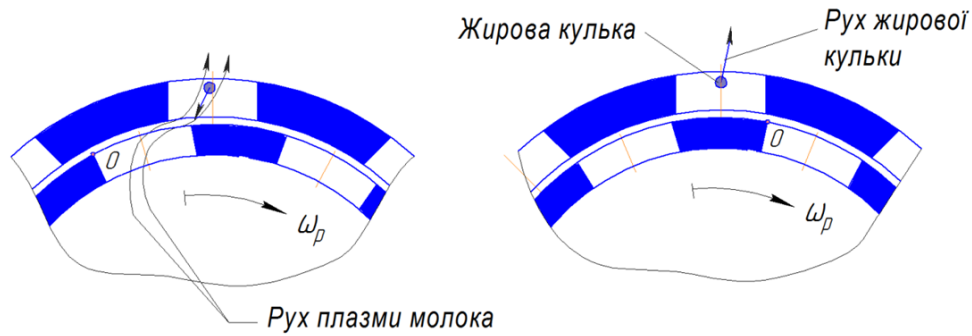


Рис. 1.19. Схема роторно-пульсаційного гомогенізатора молока

Внаслідок цього рух рідини стає нестационарним, виникають значні знакозмінні пульсації, високий градієнт швидкості у зазорі між ротором і статором, пульсуюча кавітація. Внаслідок узгодження коливань ротора з перекриттям отворів створюється резонанс пульсацій, що додатково підвищує ефективність гомогенізації. Але процеси диспергування, що відбуваються в пульсаційних апаратах з вібруючим ротором не досліджені.

При перекритті отворів переривника ПА 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 вважає 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 частки жирових кульок великої фракції [322]. 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 [167, 236, 330]. При цьому в момент початку відкриття отворів частина молока проходить крізь статор РПА, практично не піддаючись впливу

Принцип дії ППГ полягає у коливальних рухах його робочого органу з певною частотою та амплітудою [295] (рис. 1.21).

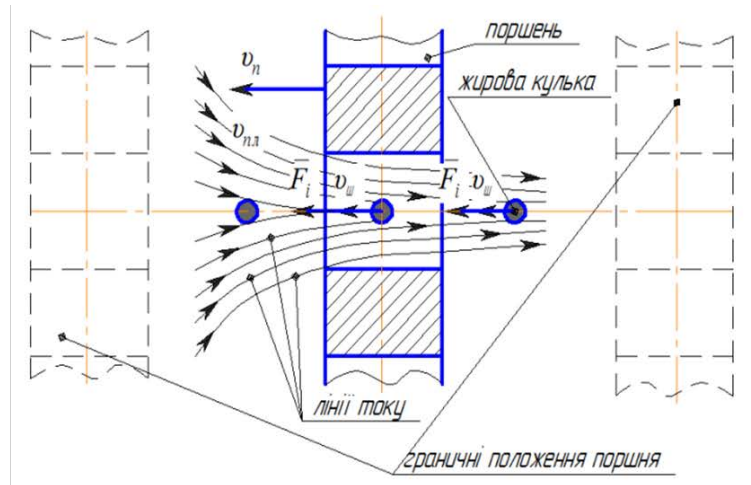


Рис. 1.21. Схема руху жирової кульки в пульсаційному поршневому гомогенізаторі молока

Відбувається рівномірна дисипація потужності, знакозмінні пульсації сприяють високому прискоренню потоку та швидкості ковзання жирової кульки. Крім того, кратність проходження об'єму емульсії крізь отвори поршня легко регулюється в широких межах, що додатково підвищує ефективність обробки.

Таким чином, для імпульсного та пульсаційного гомогенізатора основним гідродинамічним фактором диспергування молочного жиру є прискорення, а для струминного – швидкість потоку. Дослідження гомогенізації молока в таких конструкціях дозволить визначити вплив відносної швидкості фаз, прискорення потоку емульсії, кратності обробки та резонансних явищ на процеси диспергування жирової фази молока та підвищити ефективність процесу гомогенізації для зниження енерговитрат при високому ступені дисперсності молочної емульсії.

Висновки за розділом 1

1. Незважаючи на широке розповсюдження процесу гомогенізації в молочної промисловості, існує брак стандартів і нормативів, які регламентують

цей процес. На основі літературних даних і технологічної документації, які регламентують необхідний тиск найбільш розповсюджених – клапанних гомогенізаторів, визначена дисперсність молочної емульсії, достатня для існуючих технологій виробництва молочної продукції: 0,75–0,85 мкм.

2. Визначено, що внаслідок складності будови жирової кульки і її оболонки хибним є загальноприйнятий підхід вважати основною характеристикою міцності оболонок жирової кульки лише поверхневий натяг.

3. Відмічена значна кількість загальноприйнятих гіпотез і теорій гомогенізації, які заходять в суперечність одна до одної. Останні наукові дані дослідження процесу диспергування жирової фази в клапанних гомогенізаторах підтверджують справедливість турбулентної в'язкісної теорії, за якою руйнування відбувається в результаті дестабілізації Кельвіна–Гельмгольца та Рэлея–Тейлора. Спільними для цих механізмів є створення гідродинамічних умов в зоні руйнування, які сприяють підвищенню відносної швидкості руху дисперсної та дисперсійної фаз та прискорення потоку емульсії.

4. В результаті узагальнення уявлень процесу диспергування молочної емульсії розробників і дослідників гомогенізаторів, встановлені переважні гідродинамічні явища, які призводять до руйнування жирових кульок: турбулентність, градієнт потоку рідини (у повздовжньому і поперечному напрямках), обтікання жирової кульки і кавітація. Обґрунтовано, що зазначені явища можливо об'єднати такими гідродинамічними факторами як відносна швидкість дисперсної та дисперсійної фаз і прискорення потоку емульсії.

5. Незважаючи на широке поширення процесу отримання емульсій, відмічена відсутність єдиної методики розрахунку гомогенізаторів для отримання заданого ступеня дисперсності. Існуючі методики розрахунку отримані в основному емпіричним шляхом, не універсальні – використовуються лише для апаратів певного типу і мають спрощення, які суттєво викривляють результати. На основі узагальнення сучасних методик розрахунку дисперсності, встановлені переважні гідродинамічні показники, які визначають процес руйнування жирової кульки молока: відносна швидкість дисперсної та дисперсійної фаз і прискорення руху емульсії. Встановлено, що

відносна швидкість дисперсної та дисперсійної фаз виникає при русі емульсії з прискоренням за рахунок інерціальних сил. Тому для тих типів гомогенізаторів, для яких розрахунок відносної швидкості викликає суттєві труднощі (клапанних, струминних, імпульсних, пульсаційних, роторних, відцентрових і міксерів), величина прискорення руху потоку емульсії є більш універсальним і зручним для використання при визначенні ступеня дисперсності.

6. Аналіз методів інтенсифікації процесу диспергування молочних емульсій дозволив виділити перспективні напрями для підвищення енергоефективності гомогенізаторів: підвищення прискорення потоку емульсії при використанні знакозмінних пульсацій, накладання механічних коливань, створення умов для виникнення резонансних явищ та оптимізації кратності обробки емульсії та відносної швидкості фаз емульсії при реалізації способу подачі жирової фази молочної емульсії у потік знежиреного молока. Для розкриття потенціалу виділених напрямів підвищення ефективності обґрунтовані 3 принципові схеми перспективних диспергаторів: пульсаційний апарат з ротором, що вібрує, струминний гомогенізатор з роздільною подачею жирової фази та пульсаційний поршньовий гомогенізатор.

РОЗДІЛ 2

ОРГАНІЗАЦІЯ ТА МЕТОДИКА ПРОВЕДЕННЯ ДОСЛІДЖЕНЬ

2.1 Загальна структура та методи проведення наукових досліджень

У відповідності з метою дисертаційної роботи для вирішення задач дослідження використані теоретичні і експериментальні методи досліджень із застосуванням сучасних вимірювальних приладів, обладнання та програмного забезпечення.

Для проведення досліджень використовується класична схема, що включає аналітичні дослідження з розробкою моделі руйнування жирових кульок молока, розробка лабораторних установок та планування експериментів, в т.ч. багатофакторних, проведення експериментальних досліджень, знаходження експериментальних коефіцієнтів та корекція і уточнення моделі гомогенізації.

Теоретичні залежності параметрів гомогенізації молока визначались за допомогою класичних залежностей гідравліки та механіки, теорії дискретно-імпульсного введення енергії, коливань консервативних лінійних систем та комп'ютерного програмного комплексу ANSYS для дослідження гідродинаміки у віртуальному середовищі. Для знаходження оптимальних параметрів процесів використано графічні та аналітичні методи локальної оптимізації.

Експериментальні дані оброблялись за допомогою методів математичної статистики з використанням табличного процесора Microsoft Excel та програмного забезпечення Mathcad [166, 201, 327]. Фізико-хімічні методи використовувались при визначенні органолептичних показників молока. Дисперсні характеристики молочної емульсії визначались методом оптичної мікроскопії з використанням цифрової камери та комп'ютерних програм аналізу зображень [3, 116, 119, 294, 299]. Ефективність гомогенізації визначалась методом центрифугування.

Структурно-логічна схема етапів досліджень для досягнення поставленої мети дисертаційної роботи приведена на рис. 2.1.

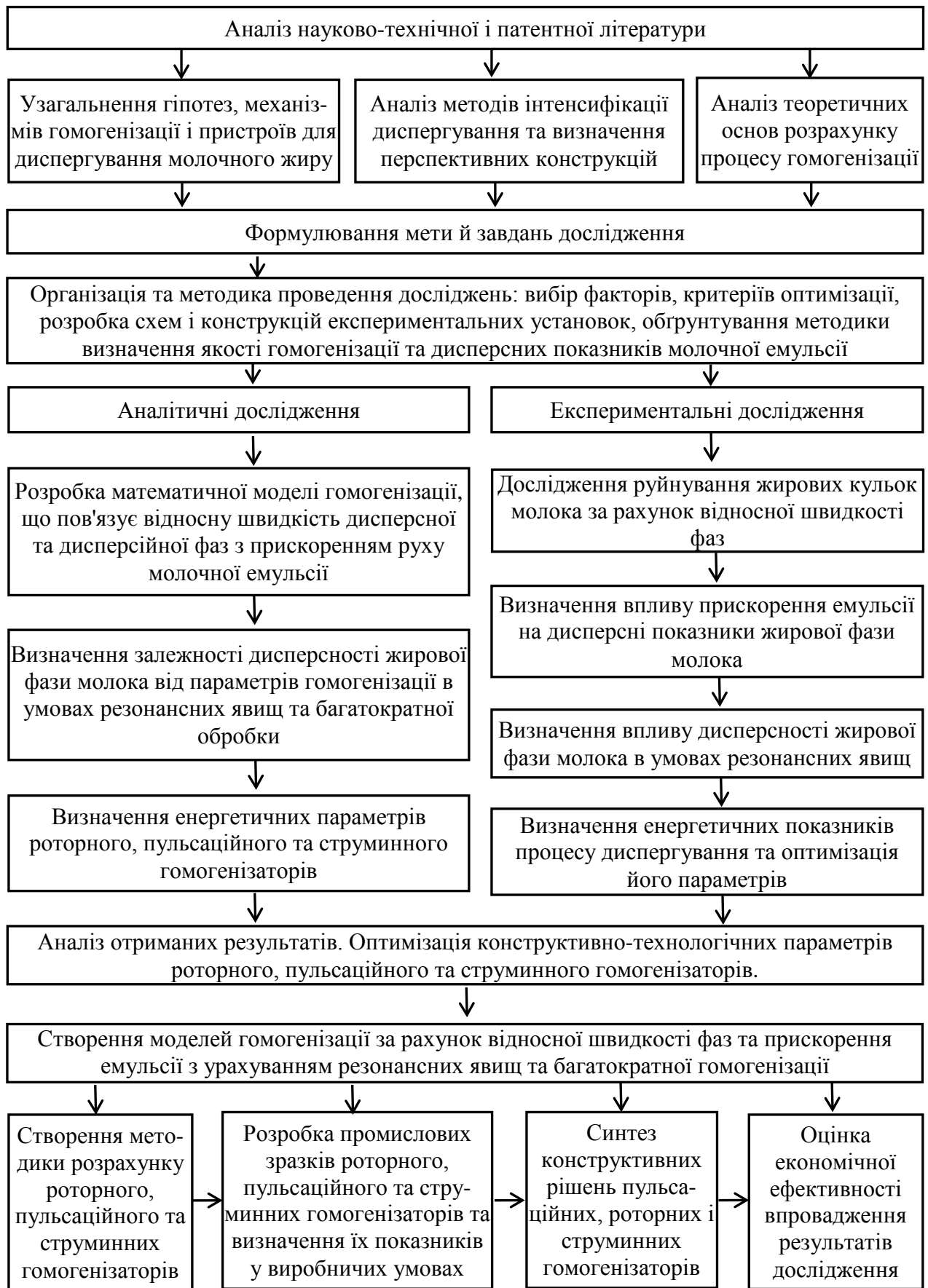


Рис. 2.1. Структурно-логічна схема етапів дослідження дисертаційної роботи

2.2. Методика комп'ютерного моделювання гідродинамічних показників емульсії

Значно скоротити обсяги експериментальних досліджень та підвищити їх точність дозволяють комп'ютерні програми моделювання фізичних процесів. Теоретичні дослідження процесу струминної гомогенізації молока показують осереднені значення факторів процесу. Більш повні та достовірні дані може надати комп'ютерне моделювання процесу. На сьогоднішній день існує велика кількість програм та комплексів, які дозволяють вирішувати різноманітні задачі. Однак функція розрахунку динаміки рідини присутня тільки в небагатьох з них. До таких систем відносяться COSMOSFloWorks, Ansys, SolidWorks, Gas Dynamics та FlowVision. Серед них виділяється програмний комплекс кінцево – елементного аналізу ANSYS завдяки в першу чергу можливості оперування великою кількістю параметрів, а також високій точності результатів. Крім того, ANSYS відображає значення показників продукту, таких як густина та в'язкість молока та вершків, максимально наближені до реальних значень [55].

Геометрична параметризована модель камери гомогенізації, потоку знежиреного молока та струменя вершків камери струминного гомогенізатора з роздільним подаванням вершків була створена в програмі Solid Works та інтегрована в програмний комплекс ANSYS. Як граничні умови були задані стінки, вхідні і вихідні отвори, параметри плинного середовища на них, параметри поверхонь твердих тіл, що контактують із плинним середовищем. Фактично, граничні умови визначають зв'язок фізичних процесів у розрахунковій області, яка в нашому випадку співпадає з розрахунковою сіткою, з фізичними процесами поза нею, при цьому деякі поверхні стінок можуть розглядатися як отвори, через які розрахункова область з'єднується із зовнішніми порожнинами, заповненими плинним середовищем. Всі умови, які задані на цих межах, точно виконуються при розв'язанні задачі. Для дискретизації диференціальних рівнянь використовували метод кінцевих

елементів. Результати розрахунку виводили на екран монітора у вигляді різнокольорового зображення, по якому і проводили аналіз співставленням з відповідною шкалою.

В результаті дослідження побудованих моделей були отримані лінії розподілу токів рідини, швидкості, тиску та дисипації потужності по камері струминного гомогенізатора, що дозволили визначити миттєві значення цих величин.

2.3. Основні фактори та критерії оптимізації теоретичних і експериментальних досліджень і їх взаємозв'язок

Для проведення експериментальних досліджень використовувалося молоко згідно ДСТУ 8553:2015 "Молоко-сировина та вершки-сировина. Правила приймання, відбирання та готування проб до контролювання", ДСТУ ISO 707:2002 "Молоко та молочні продукти. Настанови з відбирання проб", ДСТУ ISO 5538:2004 "Молоко та молочні продукти. Відбирання проб. Контроль за якісними ознаками" густиною $1027\text{--}1023\text{ кг/м}^3$, густиною плазми $1033\text{--}1038\text{ кг/м}^3$, поверхневим натягом $0,0424\text{--}0,051\text{ Н/м}$, жирністю $2,5\text{--}4,2\%$.

Середній діаметр жирових кульок емульсії, який повинен забезпечуватись в результаті гомогенізації, складає $0,8\text{--}1,2\text{ мкм}$, чого достатньо для сучасних технологічних процесів переробки молока.

Температуру гомогенізації молока забезпечували в межах $60\text{--}65^\circ\text{C}$. Як показують численні дослідження, ця температура є оптимальною для процесу диспергування. Забезпечується мінімальний поверхневий натяг жирової кульки та в'язкості молока, жирові фракції переходять у рідкий стан і не відбувається небажаних змін властивостей під дією високої температури [82, 326].

ПА з ВР. На основі аналізу літературних джерел були виявлені наступні фактори, які впливають на процесу гомогенізації молока в ПА з ВР (рис. 2.2):

– конструктивні: радіус кривошипу r , амплітуда коливання ротора вздовж вісі обертання s , частота коливання n_k , частота обертання ротора n_p , діаметр

ротора D , кількість отворів ротора та статора z_p, z_c , діаметр отворів ротора і статора d_p, d_c , довжина каналів відповідно статора і ротора l_c, l_p , зазор між ротором та статором δ , висота ротора H_p , маса ротора m .

– технологічні: подача молока Q , температура молока T , ступінь відкриття заслінки вихідного патрубку;

– фізико-хімічні властивості молока: густина молока ρ_m , густина плазми молока $\rho_{пл}$, густина молочного жиру $\rho_{жс}$, поверхневий натяг на межі розділу фаз жир-плазма $\sigma_{жс-п}$, кінематичний та динамічний коефіцієнти в'язкості молока, плазми та молочного жиру, відповідно $\mu, \nu, \mu_{пл}, \nu_{пл}, \mu_{жс}, \nu_{жс}$.

Критерії оптимізації: середній діаметр жирової кульки після гомогенізації d і питомі енерговитрати апарата $E_{пит}$.

Амплітуду коливання ротора вздовж вісі обертання змінювали в межах 1–3 мм, так як така амплітуда припустима для нормального режиму роботи клинопасової передачі приводу ротора.

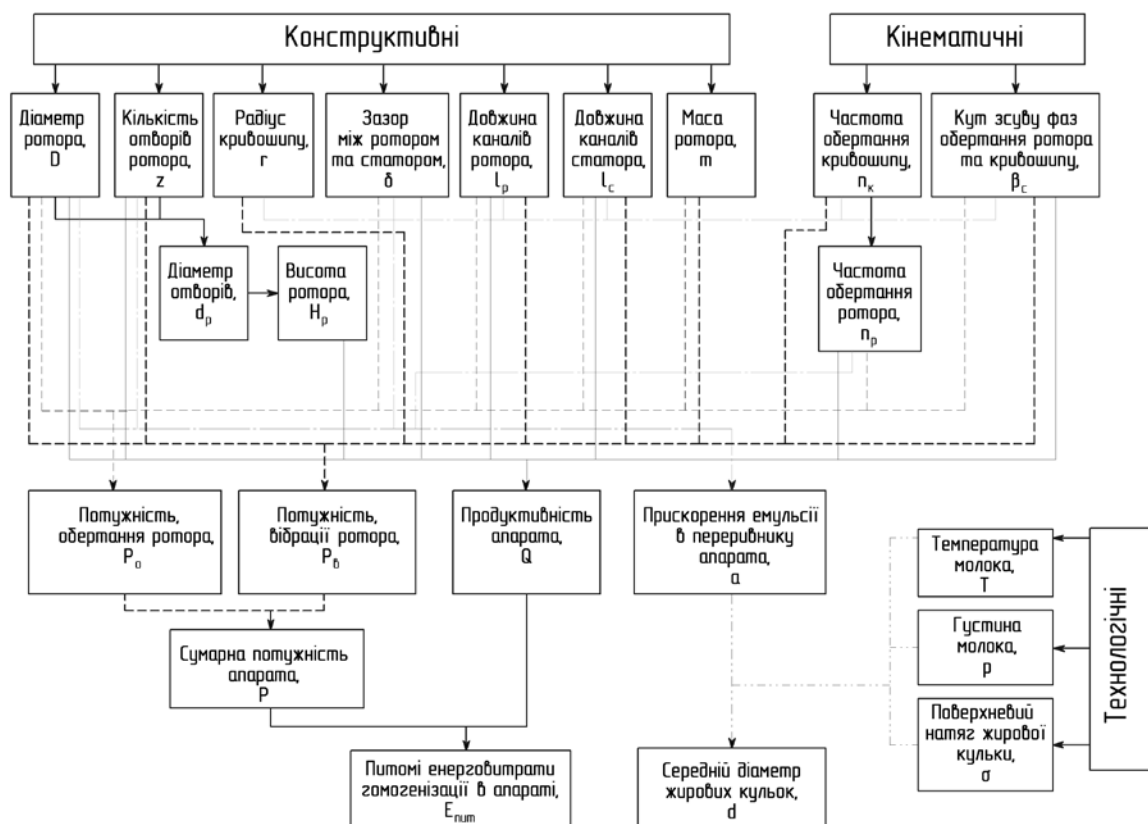


Рис. 2.2. Вплив факторів на критерії оптимізації ПА з ВР

Частоту обертання ротора змінювали у межах 300–3000 об/хв (дійсна частота 288–2880 об/хв) для уніфікації з сучасними електродвигунами для уникнення зайвих витрат на улаштування редукторів та передач.

Частоту коливання ротора вздовж вісі обертання плавно змінювали в межах 1000–3000 об/хв (дійсна частота 960–2880 об/хв) з використанням двигуна постійного струму.

Для дослідження впливу часу обробки на показники ПА з ВР змінювали ступінь відкриття заслінки вихідного патрубку апарата в межах 40–70%.

При проведенні експериментальних досліджень, якщо не оговорене інше, у дослідах приймалось, що $n_p = n_k / z$ і кут зсуву фаз $\beta = 270^\circ$.

ППГ. На основі аналізу літературних джерел були виявлені наступні фактори, які впливають на процес гомогенізації молока в ППГ (рис. 2.3).

Кінематичні:

- кут повороту кривошипу, α ,
- прискорення емульсії в отворах поршня, a ,
- амплітуда коливання поршня s ,
- частота коливання поршня n ,
- кратність проходження емульсії крізь отвори поршня (кратність обробки), K .

Конструктивні:

- діаметр поршня D_n ,
- радіус кривошипу r ,
- кількість отворів поршня N ;
- діаметр отворів поршня d_o ,
- товщина поршня h_n ,
- форма отворів поршня (коефіцієнт швидкості φ і подачі μ отвору),
- щільність матеріалу поршня ρ_n .

Технологічні:

- подача молока (продуктивність гомогенізатора) Q ,

– температура молока t ,

Фізико-хімічні властивості молока:

– середній діаметр жирових кульок молока до гомогенізації, d_m ,

– густина молока ρ_m , плазми $\rho_{пл}$, молочного жиру $\rho_{жс}$,

– поверхневий натяг на межі розділу фаз "жир-плазма" $\sigma_{жс-п}$,

Критерії оптимізації:

– середній діаметр жирової кульки після гомогенізації d ,

– потужність, що споживається P ,

– питомі енерговитрати, $E_{пит}$.

Амплітуду коливання поршня вздовж осі обертання можливо безступінчасто змінювати в межах 0–30 мм.

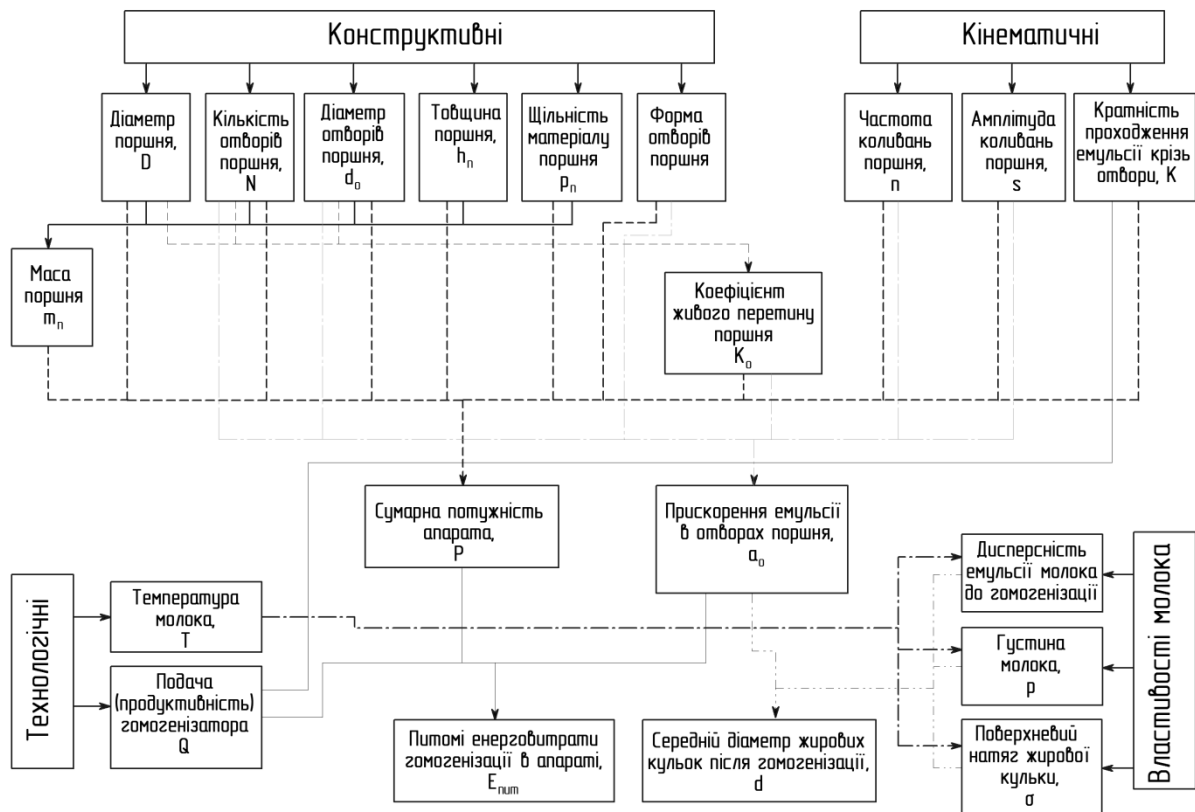


Рис. 2.3. Вплив факторів на критерії оптимізації ППГ

Середній діаметр жирових кульок до гомогенізації було прийнято рівним 2,8 мкм.

Частота обертання кривошипу – коливання поршня безступінчасто змінювали у межах 1000–10000 хв⁻¹ (16,7–167 с⁻¹).

СГРЖФ. Для струминного гомогенізатора з роздільним подаванням жирової фази визначено такі фактори процесу гомогенізації молока (рис. 2.4):

- конструктивні: діаметр каналу подавання жиру $d_{омс}$, відстань між направляючими у найбільш вузькому перетині a , висота камери h ;
- технологічні: надлишковий тиск гомогенізації Δp , продуктивність гомогенізації Q , ступінь гомогенізації H_m , середній діаметр жирової кульки після гомогенізації D , температура гомогенізації T , подача вершків.;
- фізико-хімічні властивості молока: густина молока ρ , густина плазми молока $\rho_{пл}$, густина молочного жиру $\rho_{жс}$, поверхневий натяг на межі розділу фаз жир-плазма $\sigma_{жс-п}$, в'язкість молока відповідно μ та ν , в'язкість плазми молока, що оцінюється динамічним та кінематичним коефіцієнтами, відповідно $\mu_{пл}$ та $\nu_{пл}$, в'язкість молочного жиру, що оцінюється динамічним та кінематичним коефіцієнтами, відповідно $\mu_{жс}$ та $\nu_{жс}$.

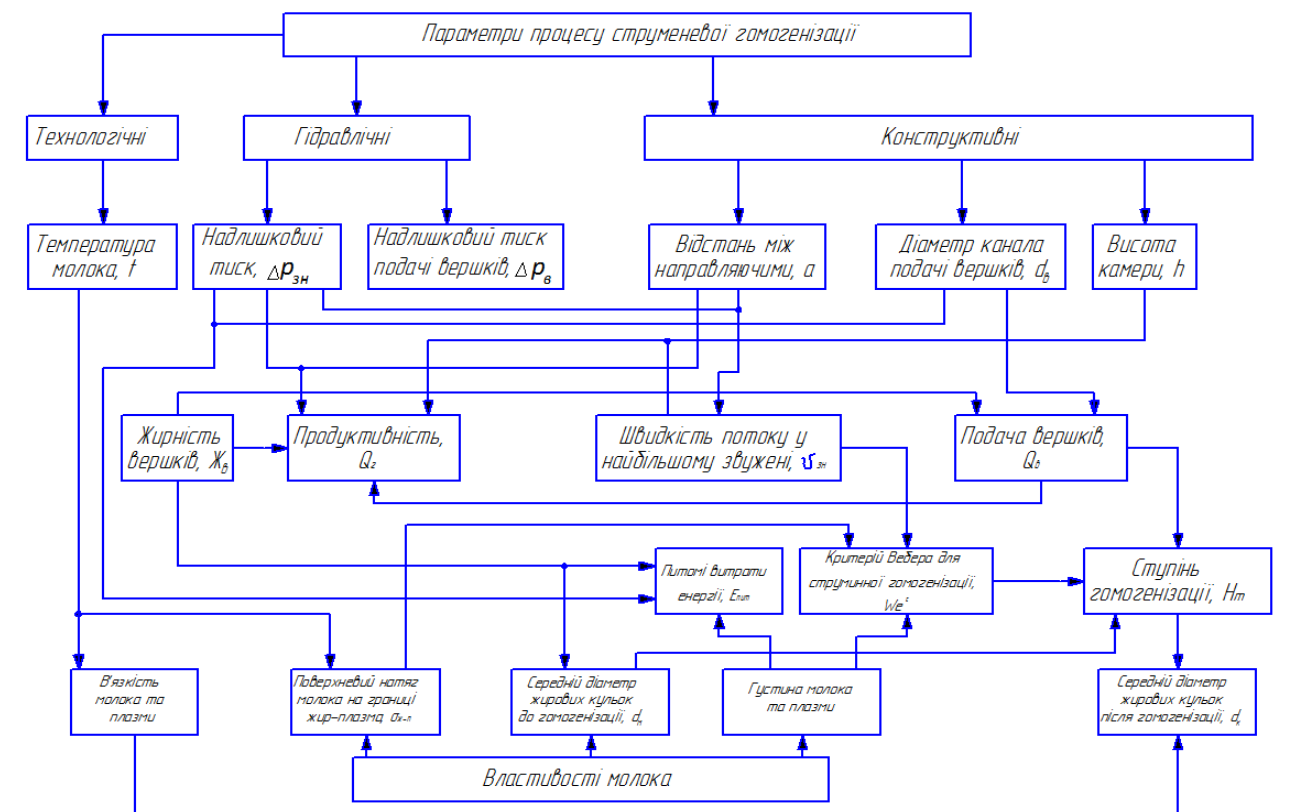


Рис. 2.4. Вплив факторів на критерії оптимізації СГРЖФ.

Тиск гомогенізації змінювали в межах 3–9 МПа, так як в цьому діапазоні значень досягається необхідний ступінь гомогенізації, згідно теоретичних досліджень.

Діаметр отворів подавання вершків приймали у межах 0,6–0,8 мм. Ці значення технологічно достатні для забезпечення продуктивності установки до 2000 кг/год, при цьому канали такого малого діаметра є технологічним для виконання і дозволяють подавати вершки достатньо тонким струменем, що необхідно для підвищення швидкості обтікання жирових кульок і підвищення дисперсності емульсії молока. При необхідності підвищення продуктивності можливе застосування декількох каналів подачі вершків.

Висоту камери приймали 4 мм зумови забезпечення міцності направляючих потоку в камері СГРЖФ. Відстань між направляючими змінювали від 1 до 3 мм. Нижнє значення фактору обмежене розміром каналу подавання вершків та забезпеченням необхідної продуктивності на рівні промислових значень. Верхнє – зниженням швидкості потоку, що призводить до зниження ступеня диспергування.

2.4. Програма теоретичних і експериментальних досліджень

ПА з ВР. Основною задачею проведення експериментальних досліджень є: обґрунтування параметрів та режимів роботи ПА з ВР для отримання достатнього ступеня гомогенізації при мінімальних енерговитратах на процес.

Програмою експериментальних досліджень передбачалось дослідити:

– вплив часу обробки, частоти обертання ротора, кратності обробки та вібрації на розміри жирових кульок та енерговитрати.

– вплив встановленого теоретично оптимального варіанту синхронізації фаз руху ротора та кривошипу: відношення частоти обертання ротора та кривошипу і кута зсуву фаз на середній розмір жирових кульок молока.

– вплив амплітуди коливань ротора та частоти обертання ротора та кривошипу на середній розмір жирових кульок молока та перевірити його відповідність аналітичній моделі.

– вплив амплітуди коливань ротора та частоти обертання ротора та кривошипу на продуктивність ПА з ВР та встановити адекватність знайденої аналітичної залежності.

– вплив амплітуди коливань ротора та частот обертання ротора та кривошипу на енерговитрати ПА з ВР та встановити адекватність знайденої аналітичної залежності.

– характеристики дисперсності та стабільності жирової фази молока до та після гомогенізації у ПА з ВР і порівняти їх з дисперсністю жиру в молоці після його обробки в клапанному гомогенізаторі.

ППГ. Основною задачею проведення теоретичних досліджень є: обґрунтування параметрів та режимів роботи пульсаційного гомогенізатора для отримання необхідної за технологічними вимогами дисперсності молочної емульсії при мінімальних енерговитратах.

Програмою теоретичних досліджень передбачалась розробка аналітичної моделі гомогенізації коров'ячого молока у пульсаційному гомогенізаторі з одним поршнем, яка оснований на прискоренні потоку емульсії, як основного фактору диспергування жирової фази молочної емульсії і яка пов'язує основні конструктивно-кінематичні, режимні, технологічні та енергетичні показники ППГ з дисперсністю жирової емульсії молока. Для цього необхідно:

– обґрунтувати механізм руйнування жирових часток молока під час пульсаційної гомогенізації та виявити параметри, які впливають на цей процес;

– визначити прискорення руху емульсії в отворах поршня ППГ як основного фактору диспергування жирової фази молока;

– визначити вплив кратності проходження емульсії крізь отвори поршня на якісні та енергетичні показники гомогенізатора;

– визначити вплив форми отворів поршня на якісні та енергетичні показники гомогенізатора;

– отримати формули для розрахунку дисперсності й енерговитрат гомогенізатора та їх зв'язок з конструктивно-кінематичними, режимними та технологічними параметрами гомогенізатора (математичну модель ППГ);

– шляхом аналізу отриманої математичної моделі гомогенізації визначити раціональні значення факторів ППГ для досягнення необхідного ступеня диспергування при мінімальних енерговитратах.

Основною задачею проведення експериментальних досліджень є: обґрунтування параметрів та режимів роботи ППГ для отримання необхідної за технологічними вимогами дисперсності молочної емульсії при мінімальних енерговитратах. З цією метою проводилась перевірка, уточнення і за необхідності коригування отриманих аналітично даних [91, 102].

Програмою експериментальних досліджень передбачалось дослідити:

- вплив амплітуди і частоти коливання поршня на дисперсність молочної емульсії та перевірити адекватність встановленої аналітично залежності між ними;

- вплив кратності проходження емульсії крізь отвори поршня на дисперсність молочної емульсії та перевірити адекватність встановленої аналітичної залежності між ними;

- вплив форми отворів та коефіцієнта живого перетину поршня на дисперсність молочної емульсії та перевірити адекватність встановленої аналітичної залежності між ними;

- вплив конструктивно-кінематичних, технологічних та режимних параметрів ППГ на енерговитрати та перевірити адекватність встановленої аналітично залежності між ними;

- характеристики дисперсності жирових кульок молока до та після пульсаційної гомогенізації і порівняти їх з дисперсністю жиру в молоці після його обробки в клапанному гомогенізаторі;

- скоригувати отриману аналітично модель гомогенізації у ППГ.

Для того, щоб виконати вказану програму експериментальних досліджень, необхідно:

- обрати метод оцінювання якості гомогенізації в пульсаційному гомогенізаторі;

- розробити конструктивну схему та лабораторну установку для вивчення процесу пульсаційної гомогенізації.

СГРЖФ. Задачами експериментальних досліджень визначено: обґрунтування параметрів та режимів СГРЖФ для досягнення необхідної якості гомогенізації за мінімальних енерговитрат.

Програмою експериментальних досліджень було заплановано:

- виявити вплив подачі вершків, відстані між направляючими та діаметра каналу подавання жирової фази молока на показники якості гомогенізації молока та модифікований критерій Вебера;
- перевірити адекватність аналітичної залежності між продуктивністю гомогенізатору та швидкістю подавання жирової фази та привести її у відповідність при необхідності;
- перевірити адекватність аналітичної залежності між продуктивністю гомогенізатора та швидкістю подавання знежиреного молока та привести її у відповідність при необхідності;
- оцінити показники якості до та після гомогенізації та порівняти їх з найбільш розповсюдженими промисловими зразками.

Для виконання програми досліджень треба:

- визначити основні характеристики процесу СГРЖФ та діапазон їх коливання;
- запропонувати конструктивну схему та розробити установку для дослідження СГРЖФ;
- на основі аналізу обрати метод оцінювання якості гомогенізації.

2.5. Обґрунтування схем та конструкцій лабораторних установок для проведення експериментальних досліджень

ПА з ВР. Роторно-пульсаційні апарати радіального типу з циліндричним ротором і радіальними пазами використовують частіше завдяки більш високій ефективності та створенню насосного ефекту [192, 306, 330], тому було обрано цей тип РПА.

Розроблена схема та експериментальна установка ПА з ВР (рис. 2.5, 2.6), яка складається з гомогенізуючого вузла 7 (рис. 2.5), привода вібрації ротора (що включає кривошипний механізм 9 і електродвигун 10) і привода обертання ротора (що включає електродвигун 2 і клинопасову передачу 1. [64, 259].

Гомогенізуючий вузол ПА з ВР має лопатки 8 для підвищення насосного ефекту, що дозволяє працювати без додаткових насосів.

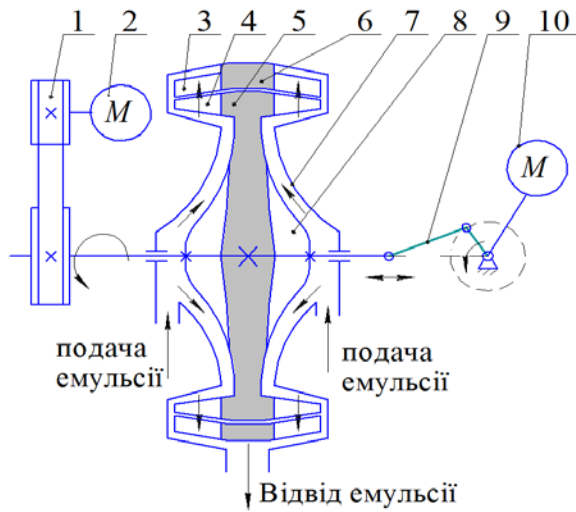


Рис.2.5. Схема експериментальної установки ПА з ВР:

1 – пасова передача; 2 – електродвигун приводу обертання ротора, 3 – отвори статора; 4 – отвори ротора; 5 – ротор; 6 – статор; 7 – гомогенізуючий вузол; 8 – лопатки; 9 – кривошипний механізм приводу вібрації ротора; 10 – електродвигун приводу вібрації ротора.



Рис. 2.6. Експериментальна установка для дослідження ПА з ВР:

1 – гомогенізуючий вузол; 2 – електродвигун приводу вібрації ротора; 3 – кривошипний механізм; 4 – клинопасова передача; 5 – електродвигун обертання ротора.

Конструкція та геометрія апарата виконувалась у відповідності з останніми дослідженнями та рекомендаціями для проектування РПА, призначених для диспергування та гомогенізації жирових емульсій (рис. 2.7) [330, 331].

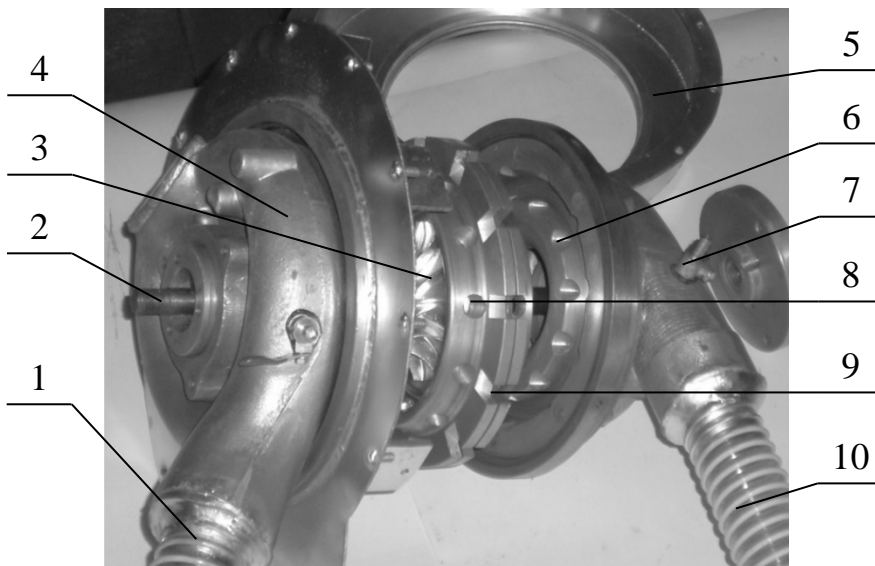


Рис. 2.7. Гомогенізуючий вузол ПА з ВР:

1 – патрубок відведення продукту; 2 – вісь ротора; 3 – лопатки; 4 – корпус; 5 – кришка; 6 – статор; 7 – перепускний вентиль; 8 – отвори ротора; 9 – розгонні пази ротора; 10 – патрубок подачі продукту.

Прототипом для створення робочої камери ПА з ВР є турбіна ТКР-12. Гомогенізуючий вузол ПА з ВР має лопатки 3 для підвищення насосного ефекту та розгонні пази, що дозволяє такому РПА працювати без додаткових насосів. В порожнині створюється надлишковий тиск рідини, під дією якого продукт відводиться з апарата через патрубок 1. Радіальні отвори ротора 8 та статора 6 створюють необхідну пульсацію рідини, формуючи модулятор ПА. В пазах 9 здійснюється зіткнення цих потоків емульсії, що додатково підвищує ефективність емульгування продукту. Перепускний вентиль 7 необхідний для заповнення продуктом робочого простору гомогенізуючого вузла при його пуску.

IIIГ. Для проведення експериментальних досліджень процесу пульсаційної гомогенізації молока розроблена лабораторна установка, схема якого представлена на рис. 2.8 [298].

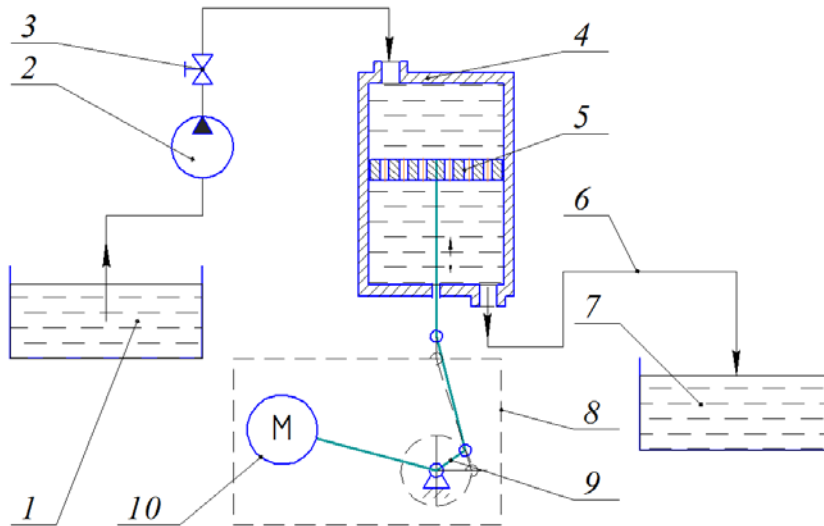


Рис. 2.8. Схема лабораторної установки для дослідження ППГ:

1, 7 – технологічні ємності відповідно для подачі та збирання молока; 2 – насос; 3 – вентиль; 4 – робоча камера гомогенізатора; 5 – поршень; 6 – трубопроводи; 8 – привід руху робочого органу; 9 – кривошипний механізм з регулятором амплітуди; 10 – електродвигун з електричним регулятором частоти обертання валу.

Установка складається з ємностей для подачі молока у гомогенізатор 1 і накопичення обробленого молока 7, насоса подачі молока 2, вентиля 3 і робочої циліндричної прозорої камери імпульсного гомогенізатора 4, всередині якої розташований поршень 5 з отворами. Поршень приводиться в коливальні рухи приводом 8, який складається з електродвигуна 10 з електричним регулятором частоти обертання валу та кривошипного механізму 9 з можливістю регулювання радіусу кривошипу.

Установка працює таким чином. В ємність 1 заливали незбиране молоко, підігріте до необхідної температури, звідки насосом 2 подавали його у камеру гомогенізатора 4 через вентиль 3, який служить для регулювання подачі продукту. При коливальних рухах поршня 5 відбувалось диспергування жирової фази молока, після чого оброблений продукт зливався в ємність 7.

На рис. 2.9 представлений загальний вид лабораторної установки для пульсаційної гомогенізації молока.

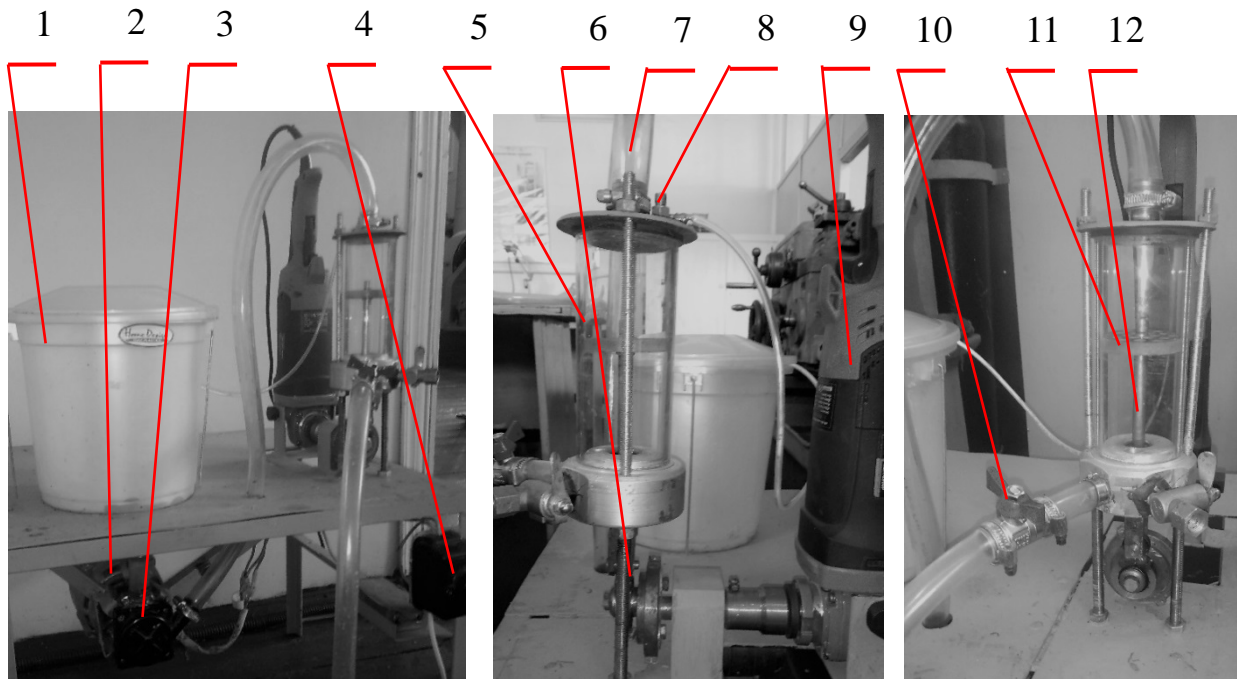


Рис. 2.9. Будова лабораторної установки пульсаційної гомогенізації молока: а) загальний вид установки, б) будова камери гомогенізатора.

1 – приймальна ємність; 2 – перепускний вентиль; 3 – насос; 4 – пульт керування; 5 – робоча камера; 6 – кривошипний механізм; 7 – патрубок подачі продукту в камеру; 8 – перепускний вентиль; 9 – електродвигун приводу обертання кривошипу; 10 – випускний вентиль; 11 – поршень; 12 – шток.

Розроблена експериментальна установка дає можливість регулювати:

- подачу молока у камеру гомогенізатора;
- частоту коливань поршня;
- амплітуду коливань поршня;
- матеріал поршня і його товщину;
- кількість, діаметр, розташування і форму отворів поршня.

СГРЖФ. Для проведення експериментальних досліджень СГРЖФ, була розроблена установка, схема якої представлена на рис. 2.10 [290].

З ємності 2 знежирене молоко через насос 1 по трубопроводах надходить до камери гомогенізації 4. З ємності для вершків 12, насосом 7 через канал 11 жирова фаза подається до центральної зони камери гомогенізації у потік знежиреного молока, де відбувається процес диспергування.

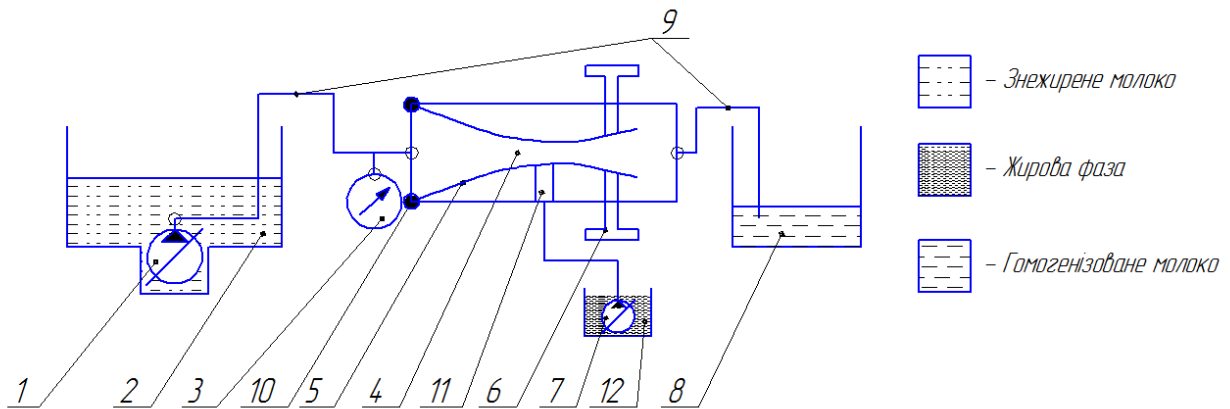


Рис. 2.10. Схема лабораторної установки СГРЖФ: 1 – насос роторного типу; 2 – ємність для знежиреного молока; 3 – манометр; 4 – камера гомогенізації; 5 – направляючі; 6 – регулювальні тяги; 7 – насос подачі жирової фази; 8 – ємність для приймання готового продукту; 9 – трубопроводи; 10 – шарніри; 11 – канал подачі вершків; 12 – ємність для вершків.

Для підвищення потоку знежиреного молока в камері гомогенізації встановлені направляючі потоку 5, виготовлені з нержавіючої сталі, які закріплені шарнірами 10 та мають регулювальні тяги для можливості регулювання відстані між направляючими. Корпус камери гомогенізації виготовлено з органічного скла для можливості спостереження за процесом. Манометр 3 необхідний для контролю значень тиску рідини. У ємності 2 передбачено отвір для зливу залишків продукту. Готовий продукт зливається в ємність 8.

До подачі в СГРЖФ молоко розділяється на знежирене молоко і вершки. Знежирене молоко подається під тиском з певною швидкістю, яка збільшується у центральній зоні пристрою за рахунок звуження потоку, величину якого можливо регулювати тягами. У місці найбільшого звуження подаються вершки по тонкому каналу, діаметр якого складає $d_e=0,6-0,8$ мм [291]. Канал такого малого діаметра створює мінімальний опір потоку і дозволяє подавати вершки тонким струменем. Змінюючи швидкість потоку у зоні подачі вершків, відстань від торця каналу подачі вершків до краю каналу звуження і подачу вершків можливо досліджувати їх вплив на якість і енерговитрати процесу диспергування молочного жиру.

На рис. 2.11 представлений загальний вид лабораторної установки для дослідження СГРЖФ.

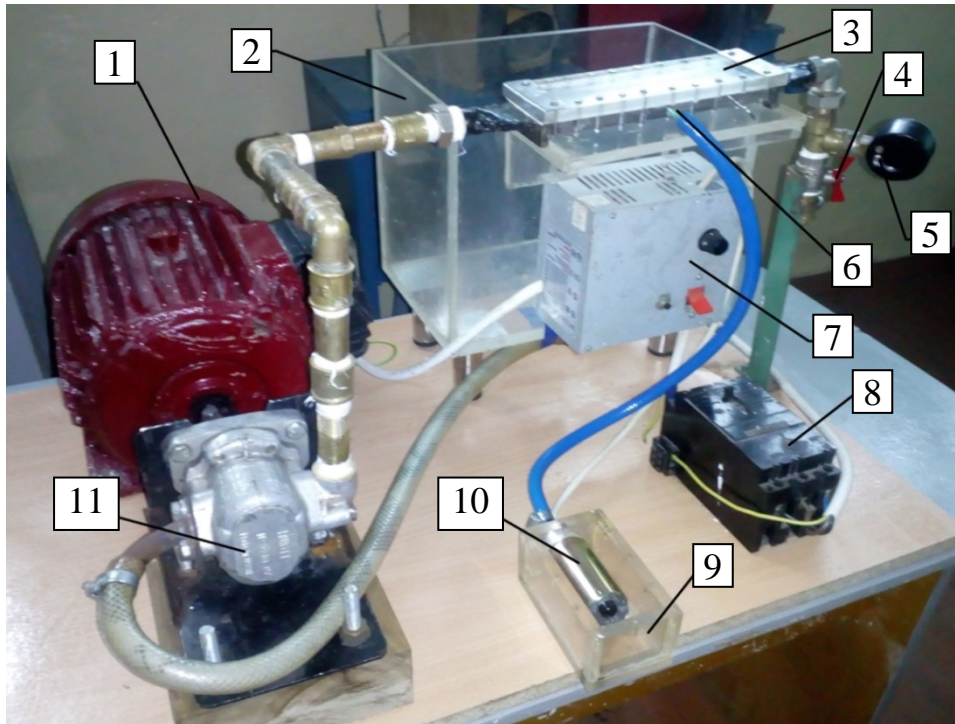


Рис 2.11. Будова лабораторної установки для дослідження СГРЖФ:

1 – електродвигун; 2 – ємність для знежиреного молока; 3 – камера гомогенізації; 4 – дроселюючий вентиль; 5 – манометр; 6 – канал подачі вершків; 7 – блок керування насосом подачі вершків; 8 – електричний пускач основного двигуна; 9 – ємність для вершків; 10 – насос для подачі вершків; 11 – насос подачі знежиреного молока.

В центральній частині камери (рис. 2.12), в місці максимального звуження виконані радіальні канали для подавання жирової фази 3.

Таким чином, тонкі струмені вершків подаються у швидкісний потік знежиреного молока, завдяки чому створюються умови для високоефективного диспергування молочного жиру – висока різниця швидкості фаз (швидкість ковзання жирової кульки відносно дисперсійного середовища), яка за критерієм Вебера є основним параметром руйнування жирових кульок молока.

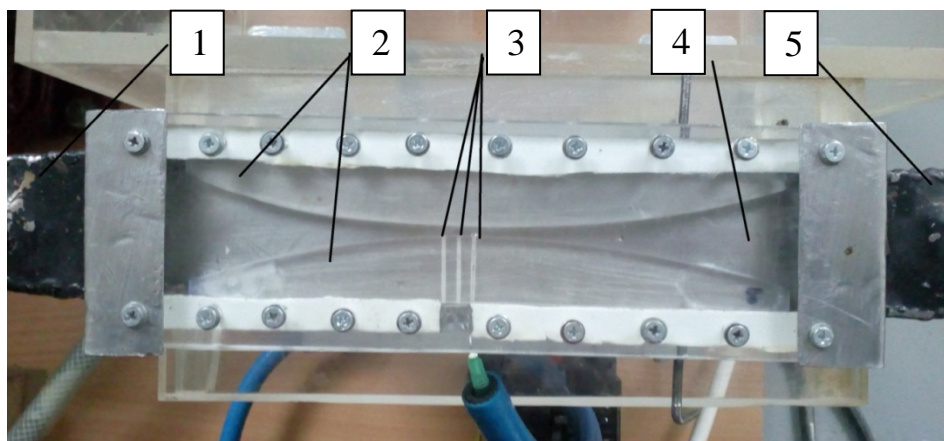


Рис. 2.12 – Камера гомогенізації СГРЖФ:

1 – патрубок подачі знежиреного молока; 2 – направляючі; 3 – канали подачі вершків; 4 – кришка; 5 – патрубок відводу гомогенізованого молока.

Основними задачами досліджень є: обґрунтування параметрів та режимів роботи СГРЖФ для отримання максимального ступеня диспергування при мінімізації енерговитрат.

2.6. Методика планування повнофакторного експерименту

Метою проведення повнофакторного експерименту було визначення впливу частоти обертання ротора, часу обробки, кратності обробки і впливу вібрації на середній розмір жирової кульки після диспергування та енерговитрати на процес гомогенізації.

Час обробки в проведеному дослідженні регулювали за допомогою перекриття заслінки на виході з апарата. В якості емульсії використовували рослинну олію у воді з концентрацією 4%, як найбільш близьку до природної молочної емульсії. Критеріями оптимізації обрано питомі енерговитрати (відношення енерговитрат до продуктивності апарата) і середній розмір жирових часток емульсії. Енерговитрати визначали вимірюванням потужності, що споживалась електродвигунами установки, продуктивність – відношенням об'єму обробленої емульсії до часу обробки, середній діаметр жирових часток емульсії – мікрофотографуванням цифровою камерою.

Суть повнофакторного експерименту полягає в одночасному варіюванні усіх факторів при його проведенні по певному плану, представленні

математичної моделі (функції відгуку) у вигляді лінійного полінома і дослідженні останнього методами математичної статистики [91]. При неможливості описати область оптимуму лінійними рівняннями регресії через крутизну площин факторного простору і значущості коефіцієнтів взаємодії чинників і квадратичних ефектів, область оптимуму описували поліномами вищих порядків, серед яких найпоширеніші рівняння другого порядку [91, 102, 201].

Унаслідок попередніх досліджень виділені фактори:

X_1 - частота обертання ротора, об/хв.,

X_2 - ступінь відкриття заслінки, %.

Для кожного фактору виконано кодування для заданих інтервалів варіювання, нульових рівнів. Кожен фактор варіює на двох рівнях: верхньому (+) і нижньому (-) (табл. 2.1).

Таблиця 2.1

Рівні варіювання факторів

Фактор	Одиниця виміру	Рівні варіювання чинників				Позначення
		-1	0	+1	Δ_i	
Частота обертання ротора	об/хв	1000	1500	2000	500	X1
Ступінь відкриття заслінки	відсотки	40	70	100	30	X2

Був складений план відсіюючого експерименту на основі стандартної матриці і здійснювалась його реалізація. Досліди проводились трьохкратно для підвищення достовірності експеримента.

Алгоритм розрахунку математичної моделі повного факторного експерименту представлений на рис. 2.12.



Рис. 2.12. Алгоритм розрахунку математичної моделі повного факторного експерименту.

Кожний повнофакторний експеримент проводився для 4 випадків:

- однократна обробка без вібрації,
- двократна обробці без вібрації,
- однократна обробки з вібрацією,
- двократна обробка з вібрацією.

Температура продукту під час проведення досліджень становила 60-65⁰С, параметри коливань ротора: частота – 1500 хв⁻¹, амплітуда – 1,0 мм.

Отримані за результатами дослідів матриці обробляли на персональному комп'ютері за допомогою програм Mathcad [166] та Microsoft Office Excel 2010 за класичною методикою [201].

2.7. Засоби контролю при проведенні експериментальних досліджень

Температуру молока, яке подавалось в гомогенізатор контролювали за допомогою термомпари за ДСТУ 2857-94.

Амплітуду коливання контролювали за допомогою штангенциркуля ЩЦ II-250-0,5 ГОСТ 166-89.

Частоту коливань вимірювали цифровим безконтактним лазерним тахометром DT-2234C+ з шагом вимірювань 1 хв^{-1} , максимальною похибкою $\pm (0,05\% + 1 \text{ цифра})$.

Для реєстрації потужності використовували електровимірювальний ватметр McBrain VA 318 ГОСТ 22261–94 з абсолютною похибкою 0,1 В.

Тривалість досліду визначали секундоміром СОПрр-2а-2-010 ГОСТ 5072-79 з абсолютною помилкою не більше 0,2 с.

Масу молока визначали на вагах електронних SCL-150 ГОСТ 24104-2001 з абсолютною помилкою не більше 5 мг.

2.8. Методика оцінювання якості гомогенізації

Виходячи з визначення терміну "гомогенізація", під якістю гомогенізації слід розуміти три показника:

- показник зменшення розмірів жирових кульок;
- показник рівномірності розподілу жирових кульок по об'єму дисперсійного середовища (гомогенності);
- показник стабільності знов утворених більш дрібних жирових кульок, відсутність їх коалесценції та утворення агломератів протягом певного часу, після диспергування.

Перший з них характеризує "ступінь гомогенізації", другий "гомогенність" і третій – "стабільність емульсії". Дуже часто ці вирази ототожнюють.

Комплексним показником якості емульсії служить стійкість емульсії. Стійкість характеризується часом, протягом якого емульсія руйнується, і обсягом дисперсної фази, що відокремилася в процесі коалесценції на фоні емульсії. Комплексність показника якості емульсії полягає в тому, що стійкість емульсії залежить не тільки від ступеня диспергування фази, вона також визначається складом і структурно-механічними властивостями сорбційного шару на межі розділу фаз, котрий запобігає подальшій коалесценції дисперсної фази.

Не зупиняючись детально на існуючих методах оцінки якості гомогенізації та способах їх здійснення, перелічимо їх і вкажемо основні їх властивості [116, 119, 189, 197, 243, 294, 309].

Електричні: (кондуктометричні - вимірювання опору електроліту в мікроотворах при проходженні через них непровідних, наприклад, масляних часток; діелькометричні - вимірювання тривалості імпульсів струму внаслідок зміни ємності плоского конденсатора при русі частинок між обкладками плоского конденсатора).

Оптичні, в тому числі: мікроскопічний, електронно-мікроскопічний, телевізійний, ультрамікроскопічний, дифракційний, нефелометричний, за характером розсіяного світла [99];

Акустичні: по вимірюванню коефіцієнта поглинання ультразвуку, за резонансною кривою поглинання на необхідному інтервалі частоти ультразвуку, які дозволяють визначити експериментально криву розподілу частинок.

Седиментаційні – вимірювання швидкості розшарування емульсії на складові компоненти.

З перерахованих способів практично всі визначають характеристики дисперсійного складу емульсій опосередковано, що призводить до неточностей

та похибок. Безпосереднім способом визначення розмірів жирових кульок є оптичний спосіб – вимірювання під мікроскопом, або «мікроскопування». Цей спосіб завдяки високій точності і було використано в даній роботі [294].

При мікроскопуванні емульсію після гомогенізації ретельно перемішують, неодноразово переливаючи із судини в судину, уникаючи піноутворення [116, 119, 294]. У мірну колбу ємністю 250 мл наливали до половини дистильовану воду, потім 1 мл емульсії. Вміст колби перемішували, доводячи водою до мітки, та знову перемішували. З кожного зразка емульсії готували 3 розведення, а з кожного розведення – 2 препарати. З кожної проби емульсії отримували 6 препаратів. Для збільшення контрастності жирових кульок використовували мочевиноу. При нанесенні краплі розбавленого молока на предметне скло її покривали покривним склом, краї якого тонко змащували. При накриванні препарату покривне скло легко придавлювали, утворюючи закритий об'єм препарату, товщина якого складала близько 70 мкм.

При мікроскопуванні можна отримати чітке зображення тільки верхнього шару жирових кульок, тому після приготування препарат залишали стояти протягом 20–30 хвилин, щоб жирові кульки сплили. Заміри проводили за допомогою мірного окуляра та об'єктмікрометра.

Так як жирові кульки постійно знаходяться у русі під дією Броунівських сил, для їх фіксації і подальших підрахунків використовували лічильну камеру Горяєва. Для підвищення продуктивності, полегшення вимірювань і підрахунків та зменшення похибок використовували мікрофотографування з комп'ютерним аналізом отриманих зображень [116, 119, 294, 171]. Для отримання мікрофотографій використовували оптичний мікроскоп МИКРОМЕД-1 з пристосованою веб-камерою, яку було під'єднано до персонального комп'ютера (рис. 2.13).

Для того, щоб отримати оптимальне поле зору та більш якісне зображення, об'єктив веб-камери прикріплювали до місця на мікроскопі, яке призначене для приєднання фотонасадки. Кратність збільшення становила 640 разів при отриманні фотографії розмірами 10,8×8,1 см (при розрішальній здатності камери 640×480 пікселів).

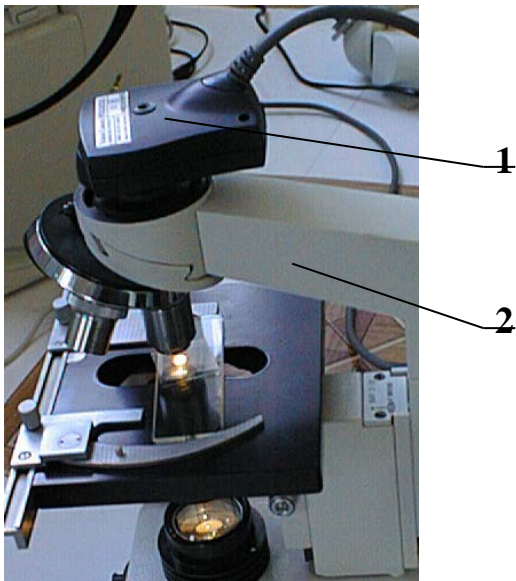


Рис. 2.13. Загальний вигляд мікроскопа з під'єднаною цифровою камерою: 1 – цифрова камера (Web камера), 2 – оптичний мікроскоп.

Крім ступеня подрібнення та рівномірності розподілу дисперсних часток по об'єму емульсії, якість гомогенізації визначається здатністю жирової фази залишатись стабільною протягом певного часу після гомогенізації. Стабільність жирової фази перевіряли способом седиментаційного аналізу [119, 173, 309]. Сутність способу заснована на залежності швидкості відстоювання жирової фази внаслідок спливання часток жиру від їх розміру [190]. Для цього 250 см³ молока наливали у циліндр та вистоювали 24 або 48 год. при температурі 4...8 °С. Визначали масову концентрацію жиру c_H у нижніх шарах емульсії об'ємом 150 см³ в циліндрі.

Показник стабільності жирової молочної емульсії або показник відстоювання жиру визначали з виразу [190]

$$\chi = \frac{c_0 - c_H}{c_0 - \frac{3c_H}{5}}, \quad (2.1)$$

де c_0 - концентрація жирової фази в початковій емульсії, %.

Вміст жиру у молоці визначався за ДСТУ ISO 488:2007 "Молоко. Визначання масової частки жиру", ДСТУ ISO 11870:2007 "Молоко і молочні продукти. Визначення масової частки жиру. Загальні рекомендації щодо використання методів із застосуванням жиромірів". Жирова емульсія має високу стабільність, якщо відсоток відстоювання жиру в ній не перевищує 10%, тобто $\chi \leq 0,1$.

2.9. Статистична обробка результатів експериментального дослідження для визначення дисперсних показників жирової емульсії

Для визначення дисперсних характеристик молочної емульсії з отриманих мікрофотографій застосовувана методика аналізу геометричних характеристик жирових кульок на основі технологій аналізу цифрових зображень. З цією метою розроблено програмного модуль, який реалізовано в середовищі Microsoft Visual Studio на базі C# з застосуванням набору бібліотек OpenCV Sharp. Алгоритм визначення геометричних характеристик та класифікації об'єктів:

1. Попередня обробка цифрового зображення:
 - перетворення зображення у «відтінки сірого»;
 - бінаризація зображення;
 - виконання морфологічних операцій;
2. Виділення контурів об'єктів за допомогою технології детектора Кені;
3. Визначення геометричних характеристик об'єктів (площа, периметр, діаметр);
4. Експорт отриманих числових даних у Microsoft Office Excel та розрахунок статистичних даних вибірки.

Досліджувані об'єкти мають однотипну форму (наближену до форми круга), в результаті чого запропоновано у якості класифікаційної ознаки використовувати саме геометричні інваріантні характеристики (площа, периметр, діаметр). Тут, під периметром об'єкту мається кількість пікселів, які належать виділеному контуру, під площею об'єкту – кількість пікселів, розташованих всередині області, яка обмежена цим контуром. Діаметр об'єкту визначається за формулою

$$d_k = \frac{4S_k}{P_k}, \quad (2.2)$$

де S_k - площа об'єкту,

P_k - периметр об'єкту.

5. Класифікація об'єктів за ознаками геометричних характеристик;

На рис.2.14 показано етапи попередньої обробки зображення, визначення площі та периметра виділеного об'єкту.

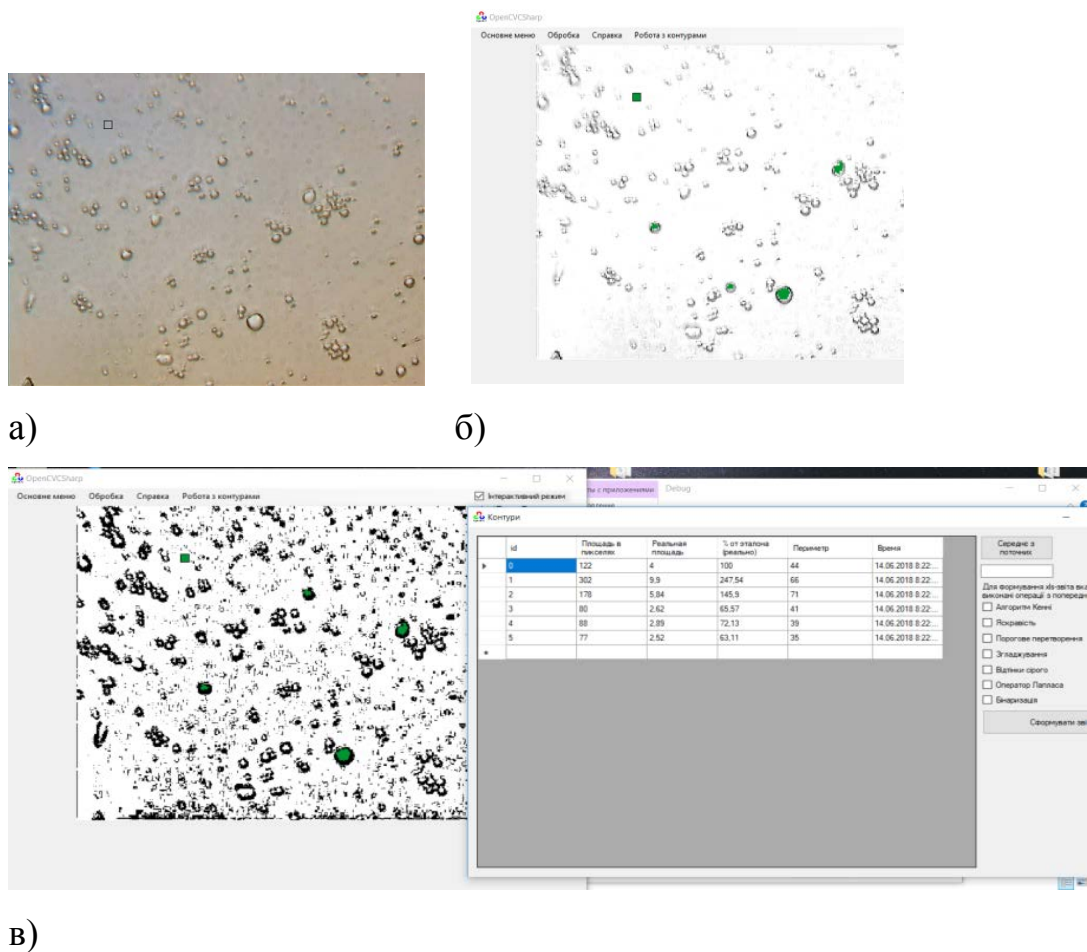


Рис. 2.14. Етапи цифрової обробки зразків мікроемульсії для визначення її дисперсних показників: а) вихідне зображення зразка мікроемульсії, б) зображення після цифрової обробки, в) розрахунок дисперсних показників емульсії в Microsoft Visual Studio з застосуванням OpenCV Sharp

Для визначення характеристик об'єкту необхідно, по-перше, внести дані про еталонний об'єкт (площа якого відома). По-друге, визначити площу еталонного об'єкту у пікселях, по-третє, визначити кількість пікселів об'єкту дослідження та площа об'єкту дослідження (здійснюється розробленим програмним модулем).

В процесі розрахунків визначали кількість жирових кульок та їх діаметр, які потрапили у полі зору мікроскопа. Величину інтервалів груп жирових кульок приймали рівною 0,5 мкм. Кількість інтервалів n_i розраховували за виразом

$$n_i = \sqrt{N}, \quad (2.3)$$

де N – кількість підрахованих жирових кульок.

Грубі помилки вимірів виключали за методом, який заснований на оцінці максимальних розбіжностей результатів дослідів [263, 318].

В результаті проведеної обробки був отриманий розподіл розмірів жирових кульок молока за їх кількістю шляхом обробки вибірки даних. Підрахунок основних параметрів вибірки, здійснювали за допомогою засобів програми Microsoft Office Excel 2010 [201, 263]. У ході обробки визначали [207, 263]:

– середній діаметр жирових кульок

$$d_k = \frac{\sum_{i=1}^m d_i N_i}{\sum_{i=1}^m N_i}, \quad (2.4)$$

де d_i , N_i – відповідно середній діаметр жирових кульок у групі та кількість жирових кульок;

– середньоквадратичне відхилення

$$\bar{\sigma} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^m (d_i - d)^2 N_i}{N}}; \quad (2.5)$$

– коефіцієнт варіації

$$V = \frac{\bar{\sigma}}{d}. \quad (2.6)$$

Дійсну продуктивність ПА визначали за формулою

$$Q = \frac{m}{\tau}, \quad (2.7)$$

де m - маса обробленого молока, кг;

τ - час обробки, с.

Кожен дослід повторювали 3 рази, після чого визначали середнє арифметичне, здійснювали перевірку на грубі похибки (методом оцінки

максимальних розбіжностей результатів дослідів [318]). Якщо дослід виявлявся помилкою, то результати перераховувалися.

Отримані дані заносили у журнал та порівнювались зі значеннями, отриманими за теоретичними формулами. Для кількісного порівняння розраховували коефіцієнт детермінації R^2 . Коефіцієнт детермінації визначався згідно методу квадратів Пірсона за допомогою Microsoft Excel

$$R^2 = 1 - \frac{\sum_{i=1}^M (y_{Ti} - y_{Ei})^2}{\sum_{i=1}^M (y_{Ei} - \bar{y}_{Ei})^2}, \quad (2.8)$$

де M – кількість точок експерименту;

y_{Ti}, y_{Ei} – відповідно теоретичне та експериментальне значення функції відгуку;

\bar{y}_{Ei} - середньоарифметичне значення експериментальних даних функції відгуку.

Рахували, що теоретична залежність задовільно описує процес, якщо коефіцієнт детермінації є більшим за 0,90 [318].

Висновки за розділом 2

1. Розроблено структурно-логічна схема здійснення дисертаційних досліджень процесів диспергування молочної емульсії, яка включає аналітичні дослідження з побудовою моделей руйнування жирових кульок молока, розробку лабораторних установок та проведення експериментальних досліджень, корекцію і уточнення отриманих математичних моделей, їх аналіз і оптимізацію параметрів дослідних процесів.

2. Встановлено конструктивно-кінематичні, технологічні та режимні фактори та критерії оптимізації процесів гомогенізації молока в ПА з ВР, СГРЖФ та ППГ та взаємозв'язок між ними. Розроблені лабораторні установки для проведення експериментальних досліджень.

3. Для дослідження миттєвих гідродинамічних показників емульсії обґрунтовано використання комп'ютерного програмного продукту ANSYS

сумісно з програмою геометричного проектування SolidWorks.

4. Для визначення дисперсних показників молочної емульсії обрано метод прямого вимірювання жирових кульок під мікроскопом з комп'ютерним аналізом мікрофотографій проб молока в програмному забезпеченні Microsoft Visual Studio з застосуванням бібліотек OpenCV Sharp.

РОЗДІЛ 3

РОЗРОБКА МАТЕМАТИЧНОЇ МОДЕЛІ ГІДРОДИНАМІЧНОГО ДИСПЕРГУВАННЯ МОЛОЧНОГО ЖИРУ ЗА РАХУНОК ВІДНОСНИХ ШВИДКОСТЕЙ РУХУ ДИСПЕРСНОЇ ТА ДИСПЕРСІЙНОЇ ФАЗ МОЛОЧНОЇ ЕМУЛЬСІЇ

3.1. Визначення дисперсності жирової фази молока в струминному гомогенізаторі

При дослідженні процесів диспергування крапель в безперервному середовищі важливо враховувати стійкість краплі до дії сил, що прагнуть її зруйнувати. Аналіз таких сил наданий у [256]. Їх наслідком є поява зон статичного тиску всередині рідини, зони підвищеного та зниженого тисків, які призводять до деформації та руйнування краплі [287, 293]. Критерієм руйнування таких крапель або жирових кульок в умовах затопленого струменя є критерій Вебера, формула якого для струминної гомогенізації We^c [279]

$$We^c = \frac{\rho_{пл} \cdot u^2 \cdot D_{max}}{\sigma_{ж-п}}, \quad (3.1)$$

де u – швидкість ковзання жирової кульки відносно молочної плазми, м/с;

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

D_{max} – максимальний діаметр краплі, стійкої у даному потоці, м;

$\sigma_{ж-п}$ – поверхневий натяг на границі "жир-плазма", Н/м.

Для забезпечення процесу якісного подрібнення жирових кульок в струминному гомогенізаторі молока з роздільною подачею жирової фази, необхідно створити максимальну різницю швидкостей фаз між жировою кулькою, що надходить у потік знежиреного молока, та швидкістю дисперсійного середовища u (рис. 3.1) [280, 282].

$$\vec{u} = \vec{v}_{zn} - \vec{v}_g, \quad (3.2)$$

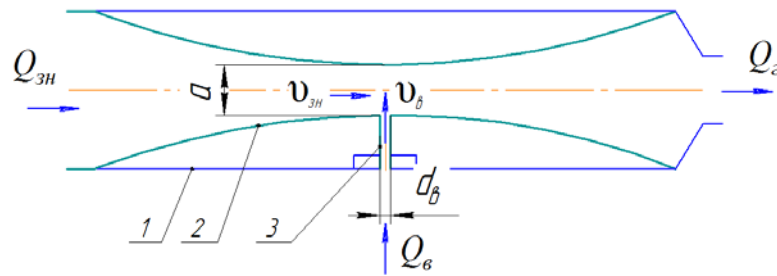


Рис. 3.1. Схема струминного гомогенізатора з роздільною подачею жирової фази:

1 – камера струминного гомогенізатора молока; 2 – внутрішні стінки профілю для потоку знежиреного молока; 3 – канал подавання вершків; a – ширина центрального каналу в місці найбільшого звуження камери гомогенізації, м d_v – діаметр каналу подачі вершків; $Q_{зж}$, Q_v , Q_z – подача знежиреного молока, вершків і продуктивність гомогенізатора; $v_{зж}$, v_v – швидкість знежиреного молока і вершків

При перпендикулярному розташуванні каналу підведення жирової фази по відношенню до напрямку швидкості руху знежиреного молока рівняння (3.2) перетворюється на

$$u = v_{зж}. \quad (3.3)$$

Для створення найкращих умов для подрібнення жирової фази необхідно підвищувати швидкість знежиреного молока. Такі умови створюються на осі камери за місцем максимального звуження.

Формула (3.2) визначена з умови подавання по каналу 3 поодинокі жирові кульки. В струминному гомогенізаторі по каналу 3 подаються вершки (емульсія жирової фази в плазмі молока), тому визначення дійсної відносної швидкості u залежить від діаметра каналу подачі вершків, вмісту жиру в вершках і швидкості потоку вершків. Тому при подаванні дисперсної фази перпендикулярно потоку знежиреного молока швидкість ковзання буде дорівнювати

$$u = k_c v_{зж}, \quad (3.4)$$

де $v_{зж}$ – швидкість потоку знежиреного молока у місці подавання жирової фази, м/с;

k_c – коефіцієнт струминного диспергування з поперечним подаванням жирової фази.

Коефіцієнт k_c враховує:

- жирність вершків, які подаються в гомогенізатор \mathcal{J}_6 ;
- діаметр каналу подачі вершків d_6 ;
- швидкості потоку вершків v_6 на виході з каналу подачі вершків.

$$k_c = k_{cж} k_{cш} k_{cd}, \quad (3.5)$$

де $k_{cж}$, $k_{cш}$, k_{cd} – коефіцієнти впливу жирності, швидкості та діаметра каналу (струменя) подачі вершків відповідно.

Діаметр каналу подачі вершків має суттєвий вплив на показники якості процесу [147]. Ідеальний умови для створення максимальної швидкості обтікання жирової кульки створюються при подачі в потік знежиреного молока поодинокі жирової кульки. В цьому випадку внутрішній діаметр каналу подачі вершків повинен дорівнювати діаметру жирової кульки, що неможливо здійснити на практиці. Тому зі зменшенням діаметра каналу подачі вершків дисперсність молочної емульсії підвищується. В іншому випадку висока швидкість обтікання жирових частинок буде створюватися лише для периферійної частини струменя вершків (рис. 3.2). В центральній частині струменя вершків швидкість обтікання жирових кульок буде нижче.

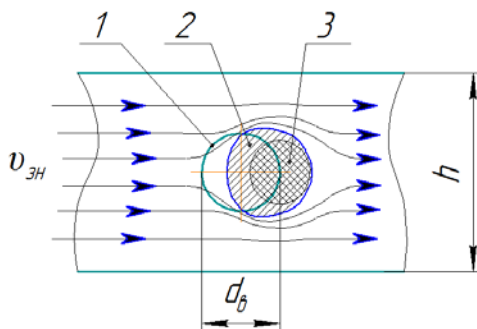


Рис. 3.2. Схема до визначення впливу діаметра каналу подачі вершків на ступінь диспергування: 1 – канал подачі жирової фази; 2 – зона високої швидкості ковзання жирової кульки відносно плазми знежиреного молока; 3 – зона низької швидкості ковзання жирової кульки.

Отже при збільшенні діаметра каналу вершків збільшуються розміри зони з низькою швидкістю ковзання жирових кульок відносно плазми, що призводить до зниження ступеня диспергування молочного жиру. Виготовлення каналу, внутрішній діаметр якого відповідає мінімальному діаметру струменя вершків, буде обумовлювати більш якісне подрібнення, за рахунок забезпечення рівномірного впливу потоку знежиреного молока на центральну та периферійну частини струменя вершків.

З іншого боку, зменшення розмірів внутрішніх частин каналів підвищує ступінь облітерації, при цьому зростають втрати тиску, що призводить до зменшення коефіцієнта витрат. Наслідком цього є підвищення необхідного тиску подавання жирової фази та підвищення енерговитрат.

Жирність вершків. При підвищенні жирності вершків, наприклад з 20% до 40% відбувається:

- зростання кількості жирових кульок в одиниці об'єму та зменшення відстані між ними, що підвищує щільність жирових кульок як на периферійній так і в центральній частині струменя вершків (див. рис. 3.2);

- зменшення необхідної швидкості подачі вершків з умови забезпечення необхідної жирності готового продукту згідно рівняння матеріального балансу жиру в молоці;

- зростання вірогідності коалесценції жирових кульок при зіткненні подрібнених жирових кульок, не вкритих білковою оболонкою.

Зменшення необхідної швидкості подачі вершків у камеру гомогенізації призводить до зниження енерговитрат насосу подачі жирової фази.

Попередити явище коалесценції можливо шляхом додавання емульгаторів, які забезпечать достатню кількість білкової речовини для покриття знов утворених вільних поверхонь подрібнених жирових крапель.

Швидкість подачі вершків. Запропонований спосіб дозволяє подавати вершки по каналах, площа яких обумовлює якість процесу, виходячи з умови забезпечення певної жирності з рівняння матеріального балансу. Діаметр каналу подавання жирової фази, площа перетину камери гомогенізації та

надлишкові тиски подавання знежиреного молока та вершків визначають співвідношення між знежиреним молоком та вершками – вихідну жирність продукту.

Залежність $k_c = f(\mathcal{J}_v, d_v, v_v)$ визначається експериментально.

Враховуючи статистичне розподілення розмірів жирових кульок у молоці [264]

$$D_{max} = 2d_k, \quad (3.6)$$

де d_k – середній діаметр жирових кульок молока, м.

З урахуванням формул (3.4), (3.5) і (3.6) формула критерія Вебера (3.1) для струминної гомогенізації буде мати вигляд

$$We^c = \frac{2\rho_{zn} \cdot k_c^2 v_{zn}^2 d_k}{\sigma_{жс-п}}, \quad (3.7)$$

Для руйнування жирових кульок необхідно досягнення значення критерію Вебера We^c рівним (або більшим) за критичне We_k

$$We^c = \frac{2\rho_{zn} \cdot k_c^2 v_{zn}^2 d_k}{\sigma_{жс-п}} \geq We_k, \quad (3.8)$$

Критичні значення чисел Вебера для руйнування крапель в потоці повітря визначені експериментально $We_k \geq 8-12$ [156]. Однак для руйнування жирових кульок в потоці знежиреного молока його значення буде вищим, враховуючи більшу залученість до потоку сусідніх шарів плазми. Діапазон критичних значень критерію Вебера (We_k) для різних типів гомогенізуючих пристроїв має істотні відмінності, так як для руйнування у потоці рідини його значення буде більшим внаслідок включення в потік сусідніх шарів рідини. Найближчим за механізмом гомогенізації до дослідної є протитечійно-струминна гомогенізація, для якої експериментально підтверджені значення We_k знаходяться в межах 500–600 [264]. Але ці значення відносяться до "модифікованого критерія Вебера" (в якому замість відносної швидкості фаз емульсії використана швидкість потоку молока), тому значення We_k будуть меншими. Для подальших розрахунків прийемо значення $We_k=100$.

З виразу (3.8) отримаємо теоретичні значення середнього діаметра жирової кульки після гомогенізації

$$d_k = \frac{We_k \sigma_{ж-п}}{2\rho_{зн} \cdot k_c^2 v_{зн}^2} \quad (3.9)$$

Мінімального середнього розміру жирових кульок (1 мкм) при $k_c=0,4$ можна досягти лише при швидкості подачі знежиреного молока 85 м/с (рис. 3.3).

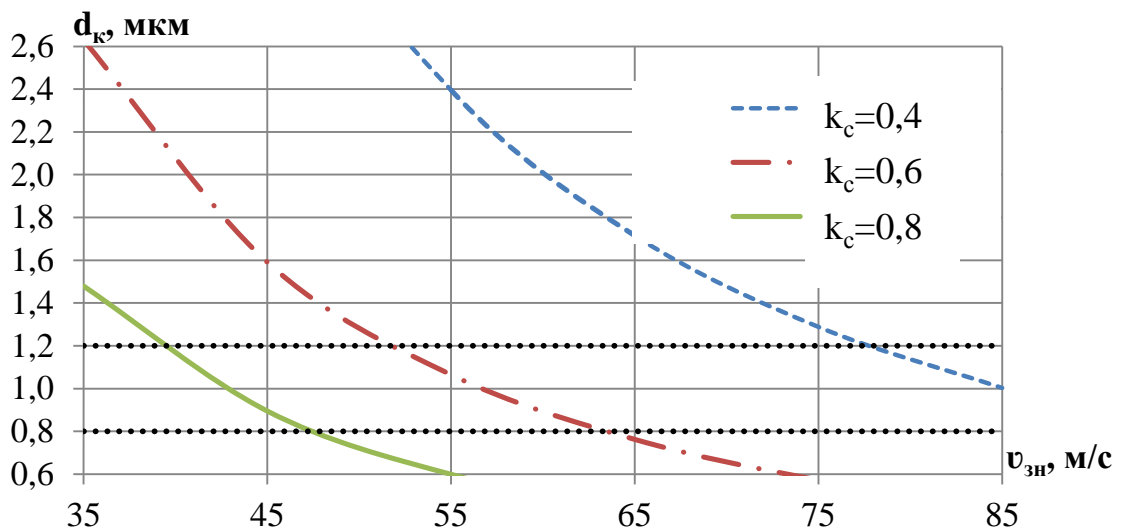


Рис. 3.3 – Графік залежності середнього діаметра жирових кульок d_{cp} від швидкості знежиреного молока $v_{зн}$ і коефіцієнта струминного диспергування k_c (при $We_k=100$)

Збільшення коефіцієнта струминного диспергування призводить до розширення діапазону швидкостей (55–85 м/с), при яких можна отримати жирові кульки з середнім діаметром на рівні 0,8–1,2 мкм. При $k_c=0,8$ високий ступінь диспергування забезпечується в усьому діапазоні швидкостей.

З формули (3.9) слідує, що визначальним параметром, від якого залежить дисперсність жирової фази, є швидкість знежиреного молока $v_{зн}$ в місці подачі жирової фази. Її значення можна визначити з подачі знежиреного молока $Q_{зн}$, враховуючи внутрішні розміри камери СГРЖФ

$$v_{зн} = \frac{Q_{зн}}{\varepsilon_k a h} \quad (3.10)$$

де h – висота камери по внутрішньому розміру, м;

a – ширина центрального каналу в місці найбільшого звуження камери гомогенізації, м;

ε_k – коефіцієнт стиснення потоку для центральної частини камери.

Площа внутрішнього перерізу камери в місці найбільшого звуження

$$s_k = ah. \quad (3.11)$$

За урахуванням (3.10) і (3.11) формула (3.9) приймає вигляд

$$d_k = \frac{We_k \sigma_{ж-п} \varepsilon_k^2 s_k^2}{2 \rho_{zn} k_c^2 Q_{zn}^2}. \quad (3.12)$$

При підвищенні $Q_{zn}, s_k(a, h)$ середній розмір жирових кульок збільшується (рис. 3.4).

Форма внутрішньої поверхні камери гомогенізатора визначає коефіцієнти витрат та швидкості потоку знежиреного молока. Найбільш характерними типами камер можуть бути:

- циліндричні ($\varphi_{ш}=0,82; \mu=0,82; \varepsilon=1$),
- конічні, що зходяться з кутом конусності (12 – 15) ($\varphi=0,96; \mu=0,95; \varepsilon=0,98$);
- коноїдальні насадки з ($\varphi=0,98; \mu=0,98; \varepsilon=1$) [83, 172].

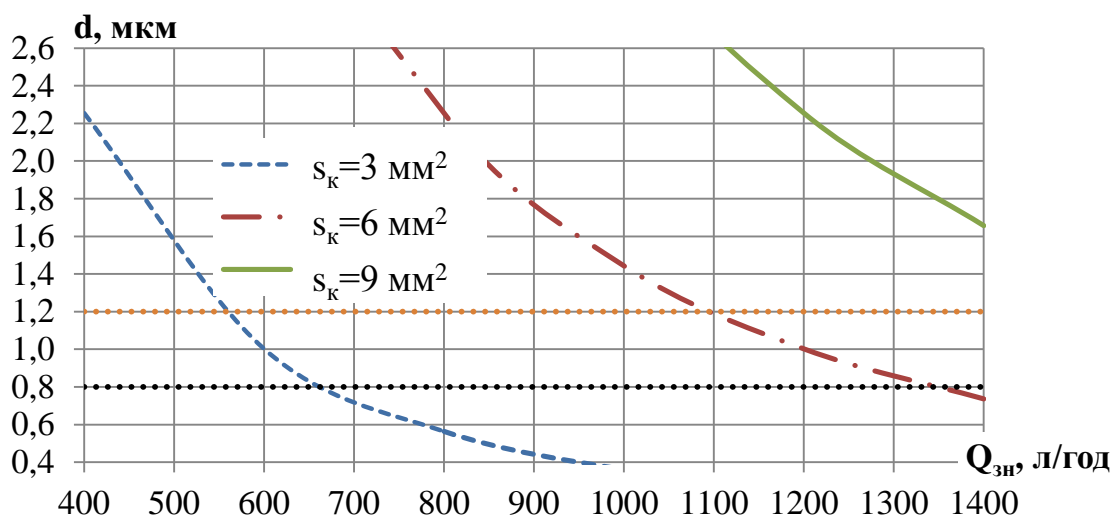


Рис. 3.4 – Залежність середнього діаметра жирових кульок $d_{ср}$ від подачі знежиреного молока $Q_{зн}$ і перерізу найбільшого звуження центрального каналу камери СГРЖФ s_k (при $We_k=100, k_c=0,6, \mu_k=0,7$).

Найбільш високі значення швидкості, а отже і дисперсності можливо отримати при використанні камери конічної форми (рис. 3.5), але в цілому вплив форми камери на дисперсність незначний.

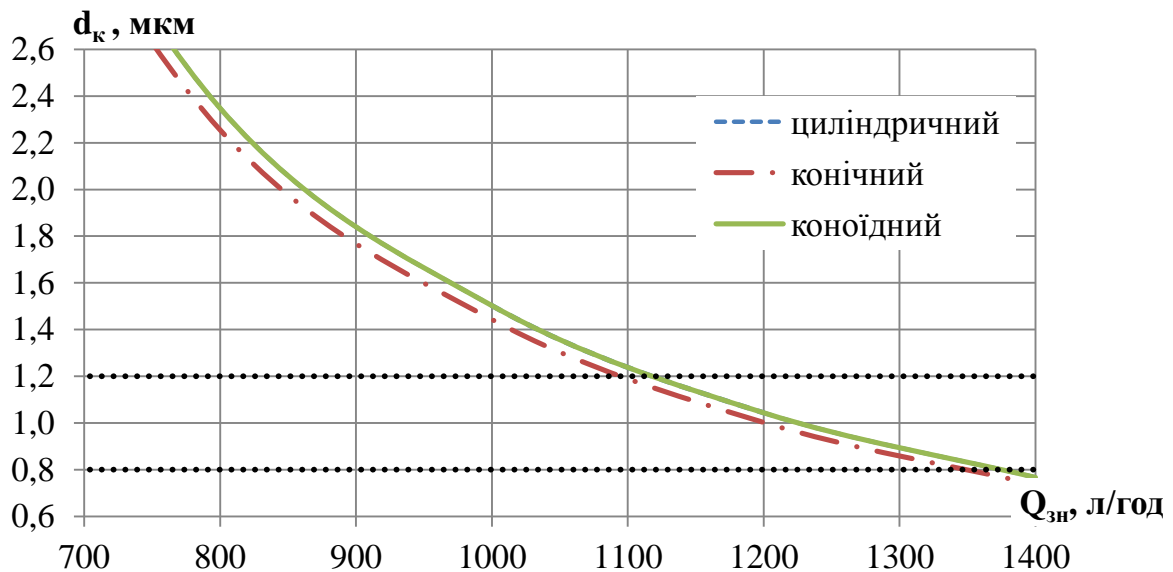


Рис. 3.5 – Залежність середнього діаметра жирових кульок d_k від подачі знежиреного молока $Q_{зн}$ і коефіцієнта витрат для центральної частини камери μ_k для типових форм поверхонь (при $We_k=100$, $k_c=0,6$, $s_k=6$ мм²)

Отже, для підвищення дисперсності жирової фази при гомогенізації молока в струминному апараті з роздільним подаванням жирової фази (зменшення d_{cp}) необхідно виконання умов

$$\begin{aligned} (We_k, \sigma_{ж-п}, \varepsilon_k, s_k) &\rightarrow \min ; \\ (k_c, Q_{зн}) &\rightarrow \max . \end{aligned} \quad (3.13)$$

Знизити поверхневий натяг на границі "жир-плазма" $\sigma_{ж-п}$ можливо за рахунок підвищення температури гомогенізації, а коефіцієнт витрат μ_k – за рахунок профілювання внутрішніх поверхонь робочої камери. Підвищити значення коефіцієнта струминного диспергування k_c можливо за рахунок оптимізації діаметра та кількості каналів подачі вершків, вмісту жиру в вершках і швидкості потоку вершків.

Таким чином, для отримання середнього розміру жирових кульок

0,8 мкм необхідна швидкість знежиреного молока становить 60–90 м/с ($We_k=100$, $k_c=0,5-0,7$), що забезпечується при $Q_{zn}=800-1050$ л/год ($s_k=6$ мм²).

3.2 Комп'ютерне моделювання гідродинамічних параметрів струминної гомогенізації

Проведені теоретичні дослідження процесу струминної гомогенізації молока показують осереднені значення параметрів процесу. Більш повні та достовірні миттєві значення дослідних даних може надати комп'ютерне моделювання, для чого використовували програмний комплекс кінцево-елементного аналізу ANSYS. Геометрична параметризована модель камери гомогенізації СГРЖФ була створена в програмі Solid Works та інтегрована в програмний комплекс ANSYS.

Для моделювання в ANSYS в якості змінних факторів, які визначають якість процесу, були виділені: тиск подавання знежиреного молока Δp_{zn} (який визначає швидкість потоку знежиреного молока), діаметр каналу подавання вершків d_g та ширина камери гомогенізації в місці подавання вершків a [278].

Серед великої кількості параметрів, які можна визначити та моделювати в ANSYS, найбільший інтерес представляють розподіл полів швидкості молока та вершків в центральній частині камери, де відбувається процес гомогенізації.

Згідно теоретичних досліджень процесу СГРЖФ для забезпечення ступеня дисперсності на рівні клапанних гомогенізаторів, необхідно забезпечити швидкість знежиреного молока 55–85 м/с, якому відповідає діапазон тиску подачі знежиреного молока Δp_{zn} 3–9 МПа.

Аналіз полів швидкостей (рис. 3.6) свідчить, що в тонкому пристінному шарі центрального каналу плин рідини має ламінарний характер та створюється високий градієнт швидкостей фаз, завдяки чому можна прогнозувати ефективне подрібнення жирових кульок в цій зоні. Деякі дослідники надавали цьому градієнту визначальне значення в процесі диспергування жирової фази в щілинному гомогенізаторі, де розмір щілини між сідлом та клапаном складає

каналу подачі вершків до протилежної поверхні. Таким чином розташування цієї зони залежить від тиску подавання знежиреного молока. Умовою високої ефективності диспергування в СГРЖФ є подача вершків в зону високої швидкості знежиреного молока за формулою (3.9) [280, 285]. На схемі (рис. 3.6 б) точкою **O** позначена центральна точка головного каналу, а координатами S_1 и h_1 – розташування зони локалізації максимальної швидкості. Згідно отриманих в результаті моделювання даних, знайдені залежності для визначення цих координат (рис. 3.7).

$$S_1 = 0,05\Delta p_{zn} + 0,6, \quad (3.14)$$

$$h_1 = 0,02\Delta p_{zn} + 0,28. \quad (3.15)$$

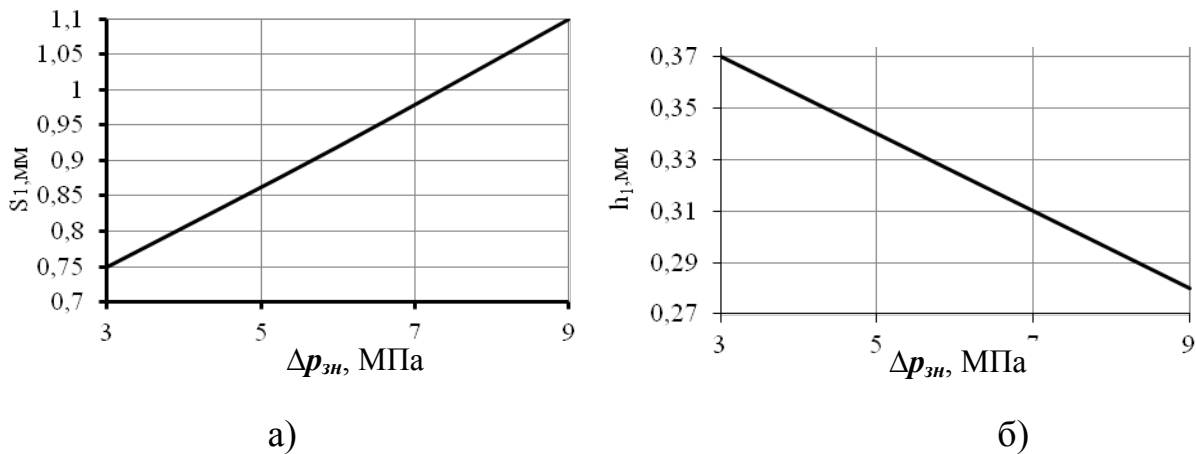


Рис. 3.7. Залежність між координатами подавання жирової фази до потоку знежиреного молока а) S_1 і б) h_1 від тиску подавання знежиреного молока Δp_1 .

Відстань між направляючими (ширина центрального каналу) в місці найбільшого звуження a , згідно теоретичних розрахунків, становить 1–3 мм [285]. Крім того, за великих значень a та розвиненої турбулентності збільшується шлях змішування жирової частки, що негативно впливає на якість диспергування жирової фази [195, 286].

При збільшенні ширини центрального каналу (рис. 3.8) від 1 до 3 мм швидкість в каналі подавання знежиреного молока знижується з 105 до 60 м/с. При цьому збільшується площа зони локалізації максимальної швидкості, що

мінімально можливі діаметри каналу подавання вершків при збільшенні тиску подавання жирової фази. При збільшенні діаметра каналу подавання вершків за однакової продуктивності необхідно забезпечити більший тиск гомогенізації, при цьому будуть зростати енергетичні витрати. Тому, впливати на енерговитрати подачі вершків можливо зміною коефіцієнта витрат каналу подавання жирової фази.

При аналізі даних рис. 3.9 можна констатувати більш високі показники швидкості при $d_g=0,5\text{мм}$ (рис. 3.12 а) та їх збільшення при $d_g=0,8\text{мм}$ (рис. 3.12 б) від 60 до 55 м/с.

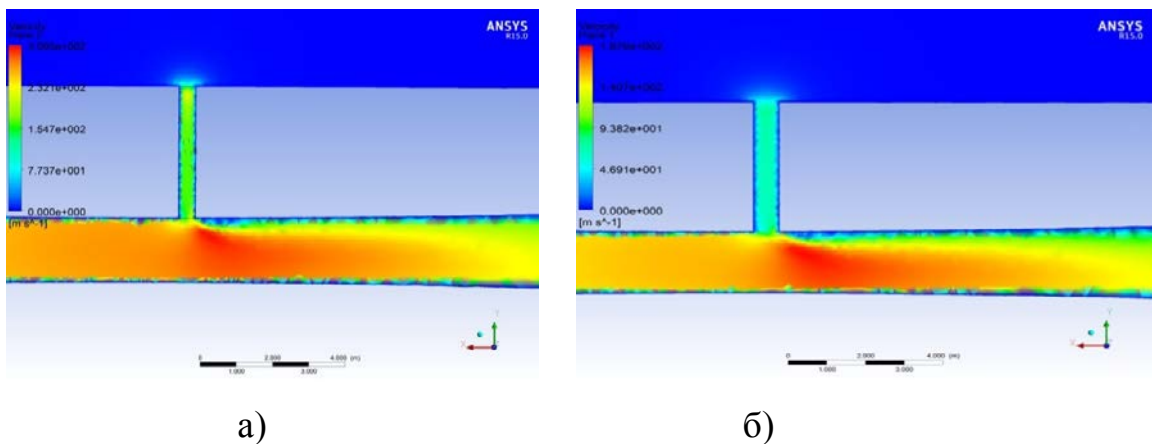


Рис. 3.9. Поле швидкостей молока при діаметрі каналу подавання жирової фази а) $d_g=0,5\text{мм}$; б) $d_g=0,8\text{мм}$ (при $\Delta p_{zn}=6\text{МПа}$, $d_g=2\text{мм}$).

Перевага використання каналу меншого діаметра полягає в забезпеченні більш рівномірного впливу на струмінь вершків як з точки зору меншої товщини потоку, так і з точки зору створення більш рівномірного поля швидкостей. При збільшенні діаметра каналу подавання вершків площа зони локалізації максимальної швидкості знежиреного молока збільшується, що веде до розсіювання енергії потоку. Таким чином, результати комп'ютерного моделювання підтверджують характер впливу d_g на дисперсність емульсії, отриманий у підрозділі 1.3: для підвищення якості гомогенізації необхідно зменшувати діаметр каналу подавання вершків.

Висновки за розділом 3

1. Розроблена математична модель гідродинамічного диспергування молочного жиру за рахунок відносних швидкостей руху дисперсної та дисперсійної фаз молочної емульсії в струминному гомогенізаторі молока з роздільною подачею жирової фази, яка пов'язує конструктивно-технологічні та гідравлічні показники гомогенізатора з критерієм Вебера і дисперсністю жирової емульсії.

2. Введено показник струминного диспергування, який визначає дисперсність молочної емульсії в залежності від швидкості струменя, діаметра каналу і жирності вершків. Прогнозовано ступінь гомогенізації підвищується при збільшенні жирності та зменшенні швидкості струменя та діаметра каналу подачі вершків.

3. Для отримання середнього розміру жирових кульок молока 0,8 мкм необхідна швидкість знежиреного молока становить 60–90 м/с (при значенні $We_k=100$, $k_c=0,5-0,7$), що можливо забезпечити при $Q_{zn}=800-1350$ л/год і площі перерізу камери $s_k=6$ мм².

4. Дані, отримані в програмному комплексі кінцево-елементного аналізу ANSYS для процесу струминної гомогенізації молока з роздільною подачею вершків, дозволили встановити, що градієнт швидкості потоку емульсії, кавітаційні явища та турбулентність в СГРЖФ недостатні для руйнування жирових кульок молока до заданого ступеня дисперсності.

Визначені координати зони локалізації максимальної швидкості центрального потоку для подачі жирової фази, що дозволяє підвищити ступінь диспергування молочної емульсії в СГРЖФ.

РОЗДІЛ 4

РОЗРОБКА МАТЕМАТИЧНОЇ МОДЕЛІ ГІДРОДИНАМІЧНОГО ДИСПЕРГУВАННЯ МОЛОЧНОГО ЖИРУ ПІД ВПЛИВОМ ПРИСКОРЕННЯ РУХУ МОЛОЧНОЇ ЕМУЛЬСІЇ В УМОВАХ БАГАТОКРАТНОЇ ОБРОБКИ І РЕЗОНАНСНИХ ЯВИЩ

4.1. Розробка математичної моделі руйнування жирової кульки молока, що пов'язує відносну швидкість дисперсної та дисперсійної фаз з прискоренням руху молочної емульсії

Аналіз механізмів диспергування з виділенням основного параметра руйнування краплі свідчить про те, що майже всі механізми базуються на визначенні швидкості потоку рідини. З огляду на це стає зрозумілим, чому універсальним критерієм деформації і руйнування жирової кульки є критерій Вебера. За цим критерієм, діаметр кульки зворотно пропорційний квадрату швидкості її ковзання відносно оточуючої плазми, тому такий механізм диспергування близький до більшості існуючих. Для розрахунку ступеня диспергування емульсії за критерієм Вебера необхідно визначити швидкість ковзання жирової кульки, що викликає значні труднощі для переважної більшості гомогенізаторів.

Примусити жирову кульку рухатися з відмінною від оточуючої рідини швидкістю можливо при раптовій зміні швидкості потоку, що визначається прискоренням потоку емульсії. При появі прискорення за рахунок різниці густини між нею та оточуючою плазмою виникають інерціальні сили, які викликають появу швидкості ковзання.

Прискорення руху молочної емульсії і критерій Вебера (визначальним параметром якого є відносна швидкість жирової кульки) пов'язані. Один з механізмів руйнування, Релея–Тейлора, базується на визначенні прискорення потоку емульсії, але при великих числах Бонда також визначається критерієм Вебера [205]. При досить великих числах We руйнування відбувається із-за

розвитку нестійкості Кельвіна – Гельмгольца. За твердженнями Хінце, значні тангенційні напруження, які виникають у турбулентному потоці, пов'язані з числом Вебера [205, 340].

Для визначення залежності між прискоренням руху молочної емульсії і швидкістю жирової кульки відносно оточуючої її плазми, припустимо, що деякий об'єм молочної емульсії рухається з прискоренням a_e (рис. 4.1) [265].

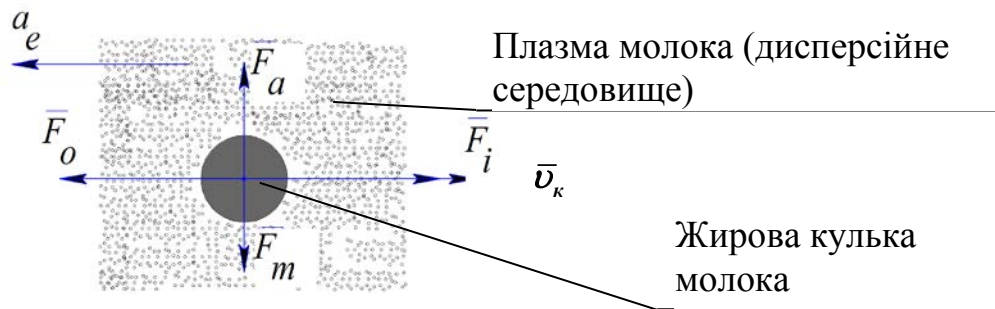


Рис. 4.1. Розрахункова схема руху емульсії з жировою кулькою з прискоренням.

При цьому на жирову кульку діють: архімедова сила F_a , сила тяжіння F_m , сила інерції F_i та сила опору F_o . За рахунок різниці густини між жировою кулькою та молочною плазмою виникає швидкість ковзання v_k . Сили F_a і F_m близькі за значеннями і при великих значеннях a_e , F_a (F_m) \ll F_i (F_o), тому їх впливом нехтуємо. Складемо рівняння руху жирової кульки в проекції на горизонталь:

$$F_o = F_i. \quad (4.1)$$

$$c \frac{\rho_{пл} v_k^2}{2} S_x = \rho_{жс} V_{жс} a_k, \quad (4.2)$$

де c – коефіцієнт опору руху тіла;

$\rho_{пл}$, $\rho_{жс}$ – густина плазми молока і жирової кульки відповідно, кг/м^3 ;

S_x – характеристична площа перерізу жирової кульки, перпендикулярна напрямку її руху, м^2 ;

V_k – об'єм жирової кульки, м^3 ;

a – прискорення руху жирової кульки, м/с^2 .

Враховуючи, що для подовжених тіл (кулька перед руйнуванням деформується)

$$S_x = V_k^{2/3}. \quad (4.3)$$

$$V_k = \frac{\pi d_{kmax}^3}{6}. \quad (4.4)$$

де d_{kmax} – максимальний діаметр жирової кульки, який зберігає стійкість у даних гідродинамічних умовах, м.

Прискорення руху жирової кульки $a_k = a_e$. Таким чином, рівняння (4.2) набуває вигляду

$$c \frac{\rho_{пл} v_k^2}{2} = \rho_k a_e d_{kmax} \sqrt[3]{\frac{\pi}{6}}. \quad (4.5)$$

Звідки прискорення руху емульсії буде рівним

$$a_e = v_k^2 \frac{c \rho_{пл}}{2 \rho_k d_{kmax}} \sqrt[3]{\frac{6}{\pi}}. \quad (4.6)$$

Вираз критерія Вебера для жирової кульки виглядає таким чином

$$We = \frac{d_{kmax} \rho_{пл} v_k^2}{\sigma_{ж-н}}, \quad (4.7)$$

де $\sigma_{ж-н}$ – поверхневий натяг жирової кульки, Н/м.

Швидкість жирової кульки діаметром d_k , необхідна для її руйнування

$$v_k = \sqrt{\frac{We_{кр} \cdot \sigma_{ж-н}}{d_{kmax} \rho_{пл}}}, \quad (4.8)$$

З урахуванням формули (4.8), визначимо прискорення руху молочної емульсії, необхідне для руйнування жирової кульки (4.6)

$$a_e = \frac{We_{кр} \sigma_{ж-н} c}{2 \rho_k d_{kmax}^2} \sqrt[3]{\frac{6}{\pi}}. \quad (4.9)$$

Розрахуємо мінімальне значення a_e , при якому відбувається руйнування жирових кульок молока, приймаючи густину жирової кульки рівною густині молочного жиру: $\rho_k = 923$ кг/м³. Поверхневий натяг жирової кульки, яка знаходиться у плазмі молока, $\sigma_{ж-н} = 0,024$ Н/м [241, 322].

Різні автори, виходячи з результатів теоретичних і експериментальних досліджень, пропонують різні чисельні значення для критичного числа Вебера. Наприклад, Прандтль, вважаючи краплю кулею і порівнюючи силу аеродинамічного опору, що виникає при русі краплі в потоці, з внутрішнім тиском в краплі, обумовленим силами поверхневого натягнення, на підставі результатів дослідів знайшов, що $We_{кр} = 3,76$. По Волинському і Лишевському, $We_{кр} = 6-7$, за даними Бухмана $We_{кр} = 1,3-1,8$. Дослідні дані [205] показують, що $We_{кр} = 6$, а за експериментальними даними [113, 156] $We_{кр} = 12-14$ і більше. Коефіцієнт опору руху жирової кульки, враховуючи, що режим руху рідини – турбулентний і розміри жирової кульки малі, приймаємо рівним $c=0,1$.

Залежність a_e від максимального діаметра жирової кульки d_k (рис. 4.2) показує, що для зменшення розміру жирових кульок молока від 2,8 мкм (середнього розміру у незбираному молоці) до 1,2–1,4 мкм (яке досягне для будь-якого типу гомогенізатора) необхідно підвищити прискорення емульсії приблизно в 3,5 рази. Для подальшого зменшення розмірів кульки від 1,2–1,4 мкм до 0,8 мкм (яке досягається в клапанних гомогенізаторах) необхідно збільшити прискорення емульсії ще в 3,5 рази.

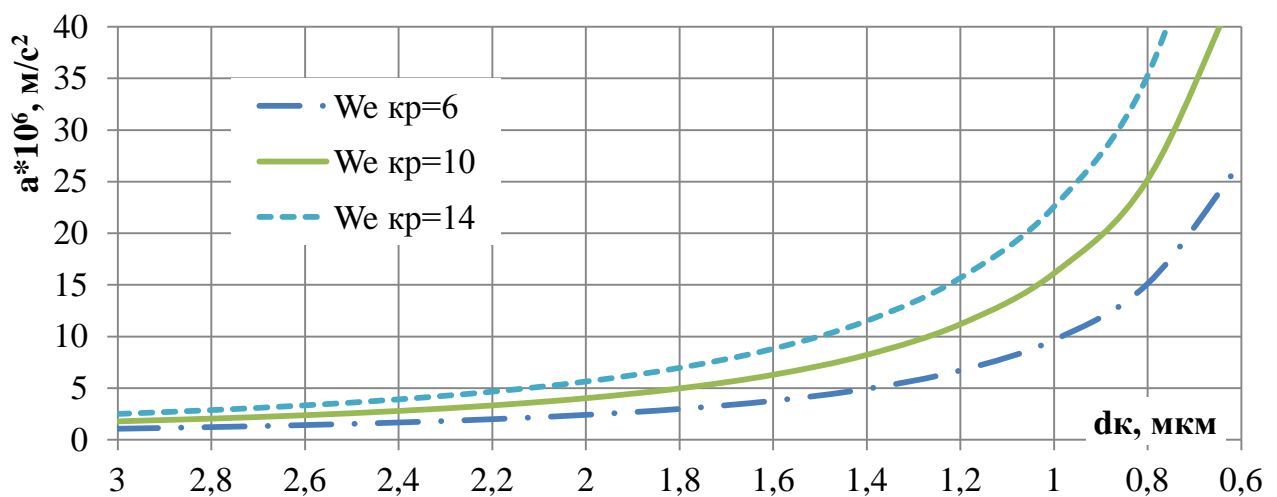


Рис. 4.2. Графік залежності прискорення руху емульсії a_e від максимального діаметра жирової кульки d_k , яка зберігає стійкість у даному потоці, і критичного значення критерію Вебера $We_{кр}$.

Якщо необхідно визначити максимальний діаметр жирової кульки після гомогенізації d_{kmax} в залежності від прискорення емульсії, формула (4.6) набуває вигляду

$$d_{kmax} = \sqrt{\frac{We_{кр} \sigma_{ж-н} c}{2 \rho_k a_e}} \sqrt[3]{\frac{6}{\pi}}. \quad (4.10)$$

Враховуючи, що розподілення жирових кульок за розмірами підпорядковується нормальному закону [263], середній діаметр жирової кульки d_k можна визначити з залежності

$$d_k = \sqrt{\frac{We_{кр} \sigma_{ж-н} c}{8 \rho_k a_e}} \sqrt[3]{\frac{6}{\pi}}. \quad (4.11)$$

Тобто дисперсність емульсії молока не залежить від густини дисперсійного середовища. Характер залежності – статичний, характерний для клапанної гомогенізації (рис. 4.3).

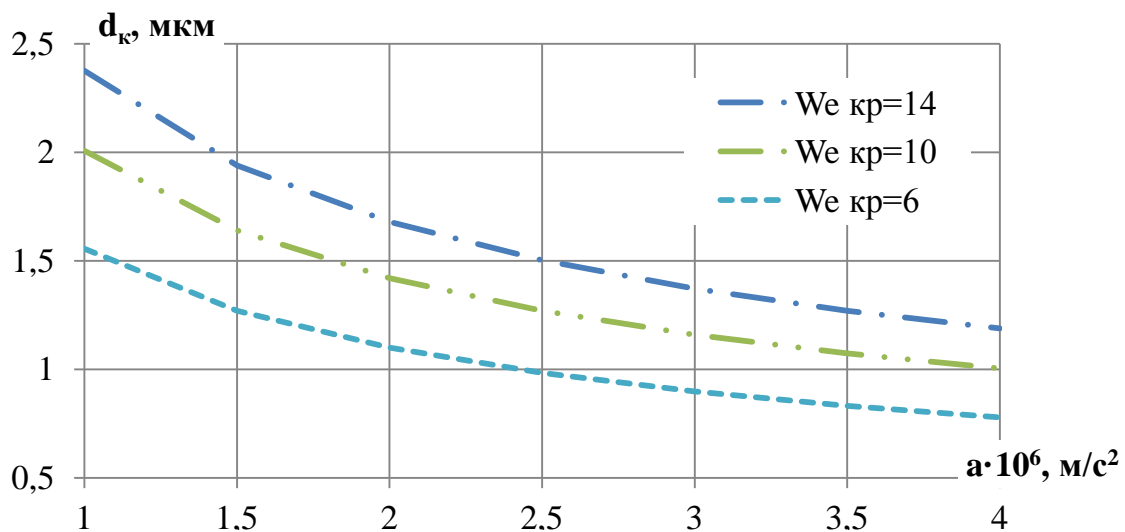


Рис. 4.3. Графік залежності середнього діаметра жирової кульки d_k після диспергування в потоці від прискорення руху емульсії a_e та критичних значень критерія Вебера $We_{кр}$.

Характер залежності $d_k = f(a_e)$, якщо виключити константи формули (1.7), має вигляд

$$d_k = \frac{K_h}{\sqrt{a_e}}, \quad (4.12)$$

де K_h – коефіцієнт гомогенізації, який пов'язує прискорення руху емульсії з середнім діаметром жирової частки молочної емульсії, $\text{м}^{3/2}/\text{с}$ і дорівнює [258]

$$K_h = \sqrt{\frac{We_{кр} \sigma_{ж-п} c}{8 \rho_k}} \sqrt[3]{\frac{6}{\pi}}. \quad (4.13)$$

Для жирової фази молока коефіцієнт гомогенізації можна визначити як

$$K_h = \sqrt{\frac{14 \cdot 0,024 \cdot 0,1}{8 \cdot 923}} \sqrt[3]{\frac{6}{3,14}} = 0,0024 \text{ м}^{3/2}/\text{с}.$$

Слід зауважити, що при розрахунку K_2 значення констант $We_{кр}$, $\sigma_{ж-п}$ і c є орієнтовними. Коефіцієнт опору руху рідини залежить від:

- форми жирової кульки, яка істотно змінюється перед руйнуванням, що змінює коефіцієнт c ;
- критерія Рейнольдса, що залежить від швидкості руху дисперсної частки та розміру каналів (отворів), де вона рухається, значення якого може суттєво відрізнитись;
- відстані від стінок каналів (отворів), де режим руху може відрізнитися, враховуючи, що товщина в'язкого ламінарного пристінного шару може набувати істотних значень у порівнянні з перерізом вузьких каналів (отворів).

Критичне значення критерія Вебера $We_{кр}$ може істотно відрізнитися від встановлених експериментально для в'язких рідин внаслідок:

- мікроскопічних розмірів жирових кульок;
- складної структури оболонки жирової кульки;
- малої різниці густини між жировою кулькою та плазмою молока.

Коефіцієнт поверхневого натягу на границі жирова кулька-плазма молока внаслідок складної структури оболонки жирової кульки може взагалі мати інший фізичний зміст. Його можна уявляти не як силу, що прикладена до одиниці довжини контуру поверхні між жировою кулькою та плазмою, а як питому поверхню енергії, що приходить на одиницю поверхні жирової кульки, подібно до поверхневої теорії подрібнення тіл П.Р. Рітінгера [191]. Як

відомо, поверхнева теорія руйнування добре узгоджується з експериментальними даними при великих площах утворених поверхонь – дрібнодисперсному дробленні, що відбувається при гомогенізації молока. Тому значення $\sigma_{ж-н}$ може суттєво відрізнятись від коефіцієнта поверхневого натягу на границі "молочний жир-плазма", яке використане при розрахунку K_2 .

Залежність (4.12) близька до формули руйнування крапель, отримана Релеєм-Тейлором [209], що передбачає зв'язок між цими механізмами диспергування.

Найбільш популярними та найбільш дослідженими гомогенізаторами є клапанні. Для цього типу гомогенізаторів отримані теоретичні та емпіричні залежності, які пов'язують їх якісні та конструктивно-технологічні параметри (додаток В) [199, 208, 210].

Отримані формули для визначення середнього розміру жирових кульок, d_k , мкм, середнього прискорення емульсії a_e , м/с², швидкості емульсії v , м/с мають вигляд [92, 210]

$$d_k = 3,8 \cdot 10^3 / \sqrt{P_{кл}}, \quad (4.14)$$

$$a_e = v^2 / L, \quad (4.15)$$

$$v = \varphi_{ш} \sqrt{2P_{кл} / \rho_m}, \quad (4.16)$$

де $P_{кл}$ – тиск клапанної гомогенізації, Па;

$\varphi_{ш}$ – коефіцієнт швидкості клапанної щілини;

ρ_m – густина молока, кг/м³;

L – довжина клапанної щілини, мм.

З цих формул можна отримати вираз, який пов'язує середній розмір жирової кульки з прискоренням емульсії

$$d_k = \frac{5,37 \cdot 10^3}{\sqrt{a_e}} \sqrt{\frac{\varphi_{ш}}{\rho_m L}}. \quad (4.17)$$

Формула (4.17) показує, що дисперсність емульсії після обробки в клапанному гомогенізаторі визначається прискоренням руху емульсії в клапанній щілині. Це підтверджує припущення про можливість визначення

дисперсності через прискорення потоку емульсії для цього типу гомогенізаторів.

Як видно з останньої формули, крім прискорення на дисперсність жирової фази впливає довжина клапанної щілини та коефіцієнт швидкості каналу. Але, згідно з експериментальними дослідженнями Н.В. Барановського, L не впливає на ступінь гомогенізації. Для вирішення цього протиріччя розглянемо розподіл тиску по довжині клапанної щілини [177, 322] (рис. 4.4).

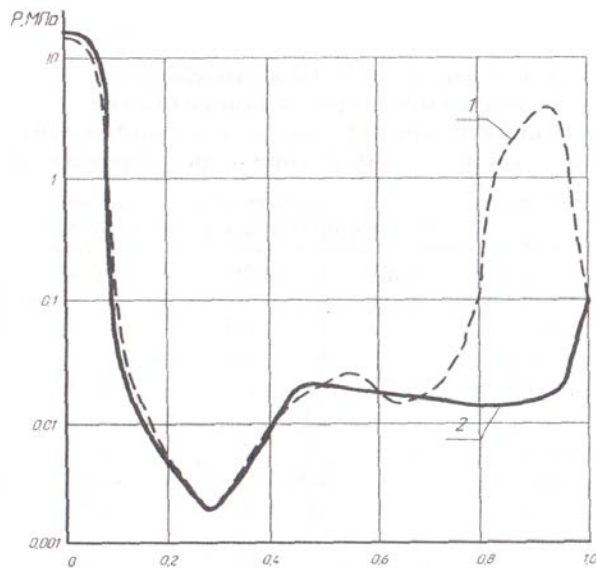


Рис. 4.4. Розподіл тиску в клапанній щілині гомогенізатора при початковому тиску 15 МПа.

Величина тиску, а отже і швидкості емульсії, падає до мінімуму на довжині $0,3L$. Саме до цієї ділянки клапанної щілини відбувається зростання прискорення потоку. За результатами експериментів F.Innings [37], саме на початку клапанної щілини відбувається максимальна деформація жирової кульки. Отже, основна стадія в руйнуванні жирової частки відбувається в вхідній частині клапана, а подальше збільшення L не приводить до підвищення прискорення (та, як наслідок, збільшення відносної швидкості дисперсної та дисперсійної фаз). Цим можна пояснити несуттєву залежність дисперсності жирових часток від довжини клапанної щілини.

Таким чином, в формулах (4.15) і (4.17) замість довжини клапанної щілини необхідно використовувати довжину ділянки, на якій відбувається

розгін емульсії від максимального тиску p_0 в клапані до мінімального тиску (рис. 4.5).

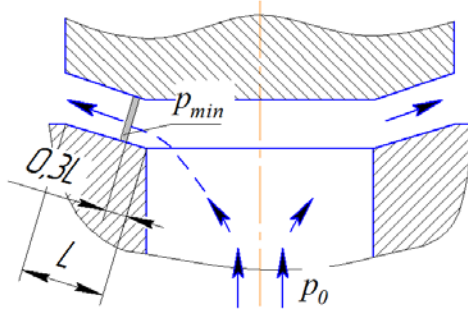


Рис. 4.5. Схема визначення довжини розгінної зони в клапанній щілині.

В роботі [343] розраховані лінії току та їх довжина на вході в клапанну щілину з використанням формул Кристофеля-Шварца. Для типових умов клапанного гомогенізатора ($L=5$ мм, висота щілини 250 мкм) довжина розгінної зони (виділено штриховою лінією) дорівнює 6–12 мм. В такому разі формула (4.17) для випадку гомогенізації молока перетворюється до виду

$$d_k = \frac{1,7 \cdot 10^3 \sqrt{\varphi_w}}{\sqrt{a}}. \quad (4.18)$$

Коефіцієнт швидкості, що оказує вплив на d_k , залежить від форми клапанної щілини та шорсткості робочих поверхонь клапана і сідла [92]. Згідно з результатами досліджень Н.В. Барановського до чистоти обробки клапана та сідла висуваються жорсткі вимоги, що узгоджується з отриманими результатами згідно формули (4.18).

У відповідності до формули (4.18), побудований графік залежності середнього розміру жирових кульок від прискорення руху емульсії для $\varphi=0,85$ [210], (рис. 4.6).

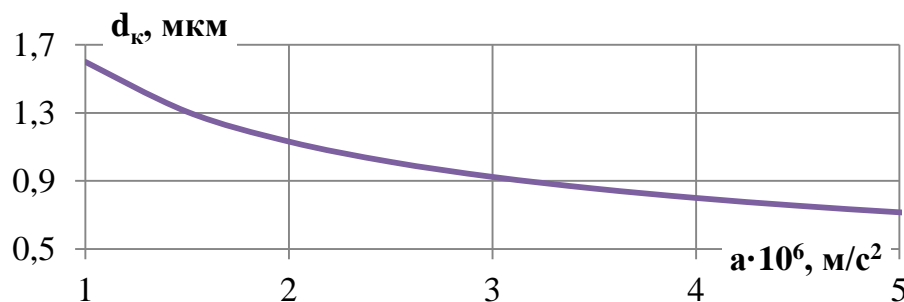


Рис. 4.6. Залежність між середнім розміром жирових кульок d_k і середнім прискоренням потоку емульсії a для клапанного гомогенізатора

Графік апроксимується формулою (4.12) з коефіцієнтом гомогенізації $K_h = 1,6 \cdot 10^{-3} \text{ м}^{3/2}/\text{с}$. Порівнюючи це значення з розрахованим за формулою (4.13) $K_h = 2,4 \cdot 10^{-3} \text{ м}^{3/2}/\text{с}$, можна зробити висновок, що обидва значення досить близькі, враховуючи невизначеність значення коефіцієнта поверхневого натягу у формулі критерія Вебера й орієнтовне значення довжини розгінної зони в клапанній щілині. В клапанному гомогенізаторі відбувається однократний вплив гідродинамічних факторів на жирову кульку. Крім прискорення чинниками, здатними суттєво змінити K_h , є кавітація та турбулентність.

Експериментально доведена наявність кавітаційних кілець у зоні між клапаном і сідлом [199]. Ширина цієї зони складає 15–25% від довжини клапанної щілини. Гіпотези про визначальний вплив кавітації на руйнування жирових кульок в такому типі гомогенізаторів не підтвердилася на практиці в досліджах Н.В. Барановського [92].

Вплив розвинутого турбулентного режиму руху емульсії в клапанній щілині вважають визначальним для руйнування [32]. За іншими даними [78] при досліджах вібраційних масообмінних апаратів встановлено, що турбулентність може приводити до зниження ефективності диспергування емульсій, внаслідок високої дисипації енергії на створення мікрозавихрень, які не призводять до руйнування дисперсних часток.

Суттєво змінити експериментальне значення K_h може нерівномірність розподілу швидкості між клапаном і сідлом як у поперечному, так і в повздовжньому напрямках. За розрахунками [322], зважаючи на малу висоту клапанної щілини (0,13–0,5 мм) [210, 322] і режим розвиненої турбулентності, графік швидкості у поперечному напрямку досить нерівномірний (рис. 1.3).

Така нерівномірність свідчить про істотну різницю у прискоренні в центрі та поблизу стінок клапана (сідла). В центральній частині потоку, де різниця швидкості коливається у невеликих межах ($\pm 20\%$), але через цю центральну частину проходить до 90% витрат потоку емульсії. Близько 10% жирових часток піддаються впливу швидкості (та прискорення) на 20% меншому, ніж решта.

Завдяки сукупному впливу цих факторів значення коефіцієнта гомогенізації клапанного гомогенізатора менше у порівнянні з теоретично отриманим.

Таким чином, знайдено залежності, що пов'язують прискорення руху молочної емульсії, швидкість ковзання жирової кульки (її швидкість відносно оточуючої плазми), середній діаметр жирової кульки після гідродинамічного диспергування та критерій Вебера. Отримана аналітична модель базується на визначенні прискорення руху емульсії – параметра, який легко визначити для будь-якого типу гомогенізатора, який здатен стати універсальним – об'єднуючим фактором руйнування жирових часток емульсій для більшості типів гомогенізаторів (клапанних, струминних, імпульсних, роторних, відцентрових і міксерів) [258].

На прикладі найбільш дослідженої – клапанної гомогенізації можна стверджувати, що:

– дисперсність молочної емульсії визначається прискоренням потоку емульсії та коефіцієнтом швидкості клапанної щілини;

– орієнтовне значення коефіцієнта гомогенізації при умові однократної обробки, яке можна прийняти для подальших розрахунків, дорівнює $2,4 \cdot 10^{-3} \text{ м}^{3/2}/\text{с}$.

4.2. Механізм руйнування і визначення дисперсності жирової фази молока за рахунок прискорення емульсії в пульсаційних апаратах

4.2.1. Визначення дисперсності жирової фази молока в процесі пульсаційної гомогенізації в умовах багатократної обробки

4.2.1.1. Механізм диспергування жирової фази молока при пульсаційній гомогенізації

Для ППГ одним з найважливіших завдань є визначення взаємозв'язку його конструктивно-кінематичних параметрів з інтенсивністю впливу на

жирову кульку, що оцінюється ступенем гомогенізації або дисперсними показниками емульсії після гомогенізації. У дослідженнях процесу гомогенізації у пульсаційних апаратах розкриттю цій задачі приділено недостатньо уваги [212, 215]. Як правило, існуючі рішення представлені у вигляді емпіричних рівнянь і лише для випадку використання двохпоршньового гомогенізатора [120, 221–224]. Тому метою наших теоретичних досліджень є побудова математичної моделі процесу диспергування жирової емульсії молока під час пульсаційної гомогенізації в класичному апараті з одним поршнем [230].

Механізм подрібнення жирових часток під час пульсаційної гомогенізації відбувається наступним чином [154]. Внаслідок коливальних рухів поршня, який рухається зі змінною швидкістю v_n (рис. 4.7), дисперсійне середовище захоплює в рух жирову частку й з урахуванням цього формується відносний рух середовища і частки $v_{ш}$, який сягає максимальних значень при проходженні через отвори поршня.

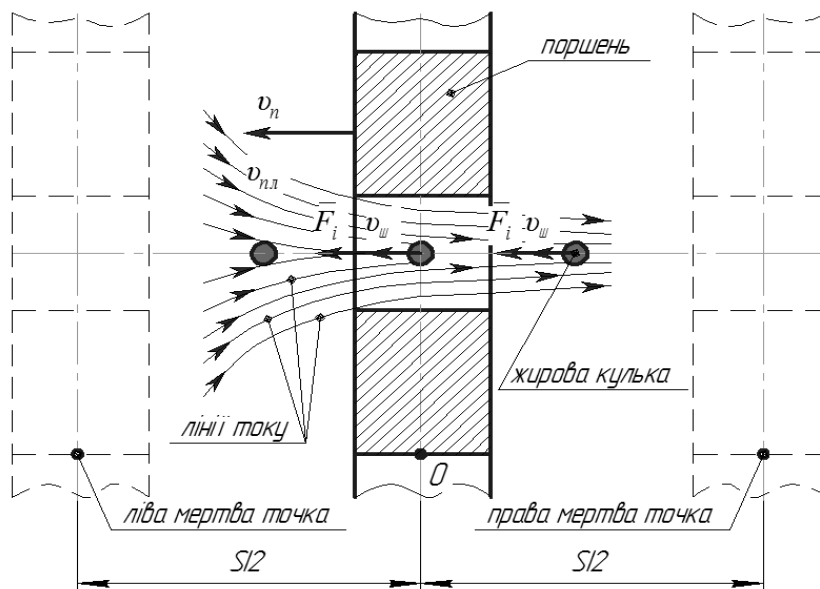


Рис. 4.7. Схема руху поршня та жирової кульки під час пульсаційної гомогенізації

Середовище, рухаючись відносно поверхні жирової кульки, впливає на її поверхню за рахунок декількох факторів: гідростатичного тиску, дотичних і

нормальних напружень, сил інерції та, ймовірно, кавітаційних ефектів. Аналіз можливих руйнуючих сил наданий у роботах [256, 281]. Найбільш суттєвий вплив на жирову кульку в процесі пульсаційної гомогенізації мають сили інерції F_i , оскільки вони сприяють виникненню швидкості ковзання жирової кульки як різниці швидкості між жировою кулькою та оточуючою плазмою $u = v_{nl} - v_{in}$. Основними чинниками інерціальних сил є частота n та амплітуда s коливання поршня.

В ППГ процес диспергування молочної емульсії відбувається в два етапи:
 – у отворах і каналах поршня-ударника (по типу клапанної гомогенізації);
 – при виході струменів з отворів і кільцевого каналу поршня за рахунок утворення градієнту швидкості (по типу струминної гомогенізації).

Таким чином, для пульсаційної гомогенізації застосовною є теорія руйнування за критерієм Вебера, We , що визначає співвідношення гідродинамічних сил і сил поверхневого натягу частки дисперсної фази за виразом [48, 210, 263, 297]

$$We = \frac{\rho_{nl} \cdot u^2 \cdot d}{\sigma}, \quad (4.19)$$

де ρ_c – густина оточуючого середовища, кг/м³;

u – відносна швидкість дисперсної частки та оточуючого середовища, м/с;

d_k – діаметр частки, м;

σ – поверхневий натяг частки, Н/м.

В ППГ швидкість потоку молока головним чином залежить від амплітуди і частоти коливань поршня. Тільки визначення залежності швидкості від параметрів пульсаційного гомогенізатора дасть можливість перейти до визначення ефективності гомогенізації.

Емульсія, що витісняється поршнем при його коливальних рухах Q_n , проходить крізь отвори поршня Q_o (рис. 4.8) [277]. Тоді на основі умови нерозривності потоку:

$$Q_n(\tau) = Q_o(\tau), \quad (4.20)$$

де $Q_o(\tau)$ – витрата емульсії крізь отвори поршня за рахунок вібрації поршня, м³/с;

$Q_o(\tau)$ – об'єм рідини, що витісняється поршнем при його рухах за одиницю часу, м³/с;

τ – тривалість процесу, с.

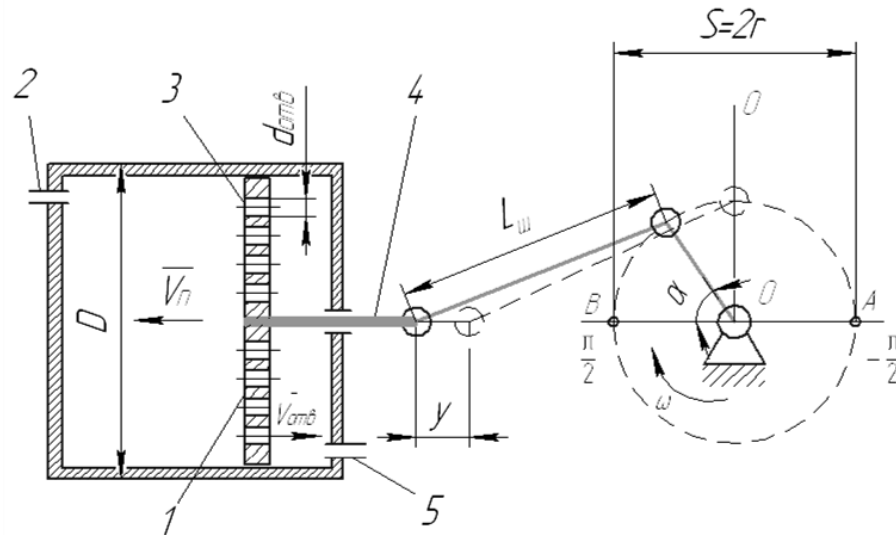


Рис. 4.8. Розрахункова схема ППГ: 1 – поршень; 2 – патрубок для відведення емульсії; 3 – отвори поршня; 4 – регульований кривошип; 5 – патрубок подачі емульсії. V_n – швидкість поршня; $V_{оме}$ – швидкість руху емульсії в отворах поршня; $d_{оме}$ – діаметр отворів; D_n – діаметр камери (поршня); $L_{ш}$ – довжина шатуна; r – радіус кривошипа; α – кут повороту кривошипа.

При постійній частоті обертання кривошипу $n = \text{const}$ останнє рівняння можна представити у вигляді залежності від кута повороту кривошипу α

$$Q_n(\alpha) = Q_o(\alpha). \quad (4.21)$$

За відомою формулою

$$Q_o(\alpha) = v_o(\alpha) \cdot F_o, \quad (4.22)$$

де $v_o(\alpha)$ – швидкість руху емульсії крізь отвори поршня, м/с;

F_o – площа отворів поршня, м².

Площа отворів поршня дорівнює

$$F_0 = N \frac{\pi d_o^2}{4}, \quad (4.23)$$

де N – кількість отворів в поршні;

d_o – діаметр отвору, м.

Витрата емульсії при русі поршня на величину y (рис. 4.9) у будь-який момент часу

$$Q_n(\tau) = v_n(\tau) \frac{\pi D_n^2}{4}, \quad (4.24)$$

де $v_n(\tau) = dy / d\tau$ – швидкість руху поршня вздовж осі обертання, м/с.

D_n – діаметр поршня, м.

Для простих синусоїдальних коливань при $r / L_m \rightarrow 0$ (довжина шатуна кривошипного механізму L_m набагато більша за радіус кривошипу r) можна записати:

$$\frac{dy}{d\tau} = \pi n s \cdot \sin \alpha, \quad (4.25)$$

де s – амплітуда коливань поршня, м;

n – частота обертання кривошипу (коливання поршня), s^{-1} .

$$s = 2r. \quad (4.26)$$

З урахуванням рівнянь (4.21–4.25), умову нерозривності потоку (4.20) запишемо у вигляді

$$2\pi r n \cdot \sin \alpha \frac{\pi D_n^2}{4} = v_o N \frac{\pi d_o^2}{4}. \quad (4.27)$$

Таким чином, швидкість руху емульсії крізь отвори поршня, як функція від кута повороту кривошипу, має вигляд

$$v_o = \frac{2\pi r n D_n^2}{N d_o^2} \sin \alpha. \quad (4.28)$$

Кількість отворів поршня пов'язана з діаметром поршня та діаметром отворів співвідношенням, яке випливає з очевидних геометричних перетворень

$$\frac{\pi D_n^2}{4} K_o = N \frac{\pi d_o^2}{4}. \quad (4.29)$$

або

$$K_o = \frac{Nd_o^2}{D_n^2}, \quad (4.30)$$

де K_o – коефіцієнт живого перетину отворів поршня

$$K_o = \frac{F_o}{F_n}, \quad (4.31)$$

де F_n – площа поршня, м².

З урахуванням рівняння (4.31) швидкість руху емульсії в отворах поршня (4.28) дорівнює

$$v_o = \frac{2\pi rn}{K_o} \sin \alpha. \quad (4.32)$$

Формула (4.32) не враховує вплив форми отворів поршня (в осьовій площині перерізу отвору). За урахуванням цього, швидкість потоку, який виходить з отворів поршня, буде рівна

$$v_o = \varphi \frac{2\pi rn}{K_o} \sin \alpha. \quad (4.33)$$

де φ – коефіцієнт швидкості.

На основі отриманої нами формули (4.33) побудований графік швидкості емульсії для радіусів кривошипу 5 і 15 мм та частот коливання поршня 3000–9000 хв⁻¹, який представлений на рис. 4.9.

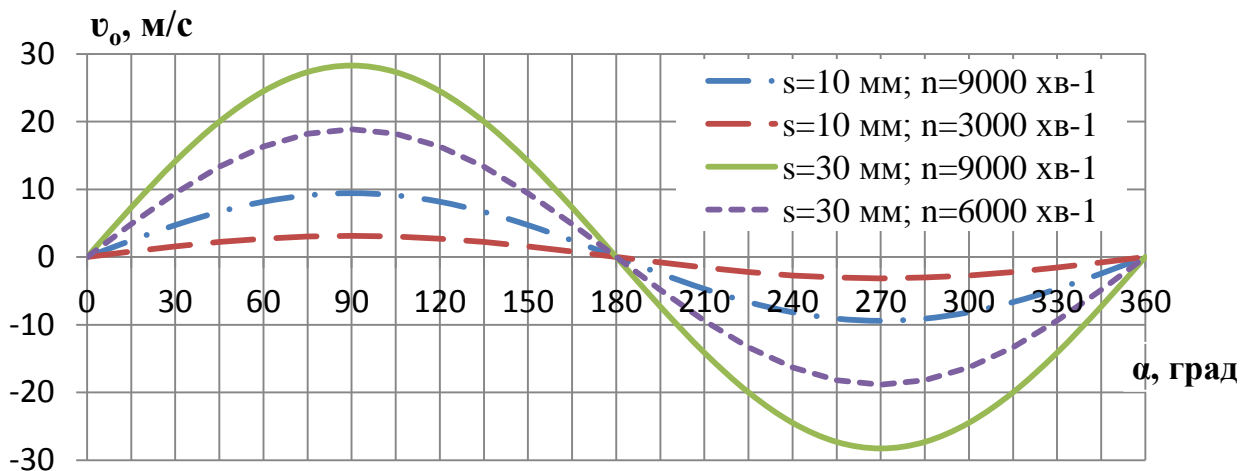


Рис. 4.9. Графік залежності швидкості емульсії v_o від кута повороту α і амплітуди коливання поршня s ($K_o=0,5$, $\varphi=0,94$).

Залежність між v_o і r та n є лінійною. Найбільшого значення функція приймає при максимальних радіусах кривошипу і частоти коливань при кутах повороту 90 і 270° .

За критерієм Вебера (4.7), ступінь диспергування жирової фази пропорційна швидкості ковзання жирової кульки. Розрахунок швидкості ковзання – досить складна задача, тому в роботах [48, 231, 264] запропоновано використовувати так званий модифікований критерій Вебера We_m , в якому замість швидкості ковзання використовують швидкість потоку емульсії. Такий підхід призводить до викривлення фізичного змісту критерія Вебера та до втрати універсальності застосування критичних модифікованих значень критерію для різних типів гомогенізаторів [262]. Більш універсальною (для більшості конструкцій диспергаторів) і досить простою методикою для розрахунку швидкості ковзання жирової кульки, є визначення прискорення потоку емульсії. Шляхом диференціювання за часом, знайдемо миттєве прискорення руху емульсії в отворах поршня

$$a_m = \frac{dv_o}{d\tau} = \frac{d(2\pi r n \sin(\omega\tau))}{K_o d\tau} = \frac{2\pi r n}{K_o} \omega \cos \omega\tau = \frac{2\pi^2 n^2 s}{K_o} \cos \alpha. \quad (4.34)$$

З урахуванням форми отворів формула прискорення потоку на виході з отворів поршня (4.34) набуває вигляду

$$a_m = 4\pi^2 \varphi_m \frac{n^2 r}{K_o} \cos \alpha. \quad (4.35)$$

Для останнього рівняння графік прискорення емульсії виглядає наступним чином (рис. 4.10).

Прискорення руху емульсії в отворах поршня має найбільші значення при максимальних r і n і більш суттєво збільшується при зростанні n ніж r .

Таким чином, з формули (4.35), максимальні умови для подрібнення жирових кульок молока створюються при $(n, r, \varphi_m) \rightarrow \max$ і $K_o \rightarrow \min$.

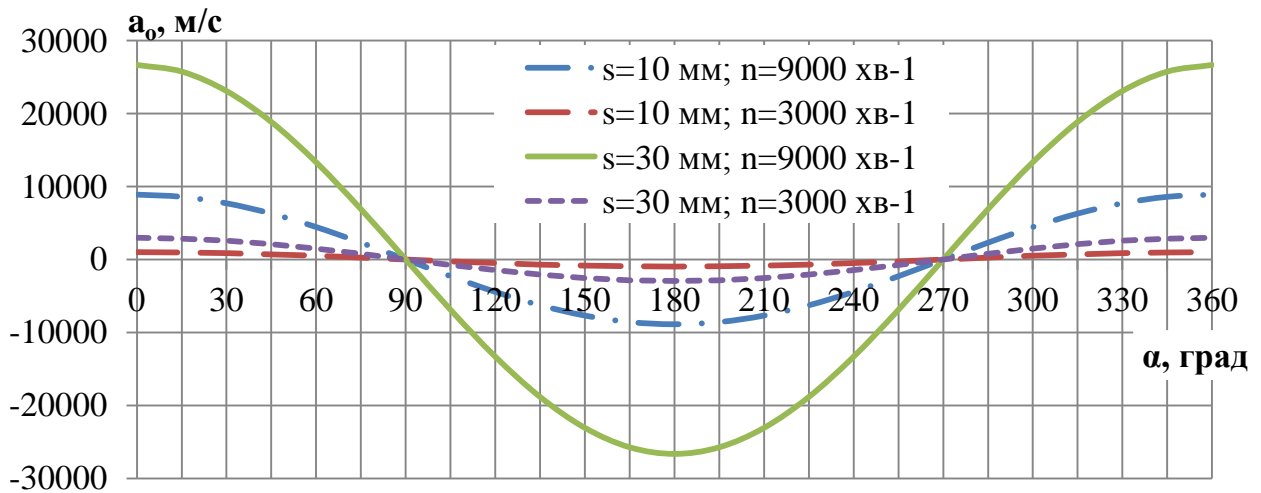


Рис. 4.10. Графік залежності прискорення емульсії a_m від кута повороту кривошипу α і амплітуди коливання поршня s ($K_o=0,5$, $\varphi_{ш}=0,94$).

4.2.1.2. Аналітичне визначення впливу подачі емульсії та кратності обробки на параметри пульсаційної гомогенізації

Важливим показником процесу ППГ є подача емульсії Q , м³/с. Це незалежний фактор, який впливає як на якісні, так і на енергетичні показники апарата [155]. При збільшенні подачі зменшуються питомі енерговитрати E_{num} процесу

$$E_{num} = \frac{P}{Q\rho_m}, \quad (4.36)$$

де P – потужність, необхідна для здійснення процесу гомогенізації, Вт;
 ρ_m – густина молока, кг/м³.

Разом з цим при зміні Q (при незмінних інших параметрах) змінюється кількість проходів молочної емульсії крізь отвори поршня – кратність обробки K . Було проаналізовано вплив конструктивно-кінематичних показників ППГ на величину K [151], для чого була складена схема (рис. 4.11). В робочу камеру пульсаційного гомогенізатора діаметром D подається емульсія, яка проходить крізь отвори поршня, який здійснює коливання з амплітудою s і частотою n .

Кратність обробки визначається співвідношенням середніх швидкостей емульсії v_Q (припускаючи, що подача продукту відбувається рівномірно і

швидкість кожного елементу шару емульсії товщиною dS однакова) і поршня v_{nc} :

$$K = \frac{v_{nc}}{v_Q} \quad (4.37)$$

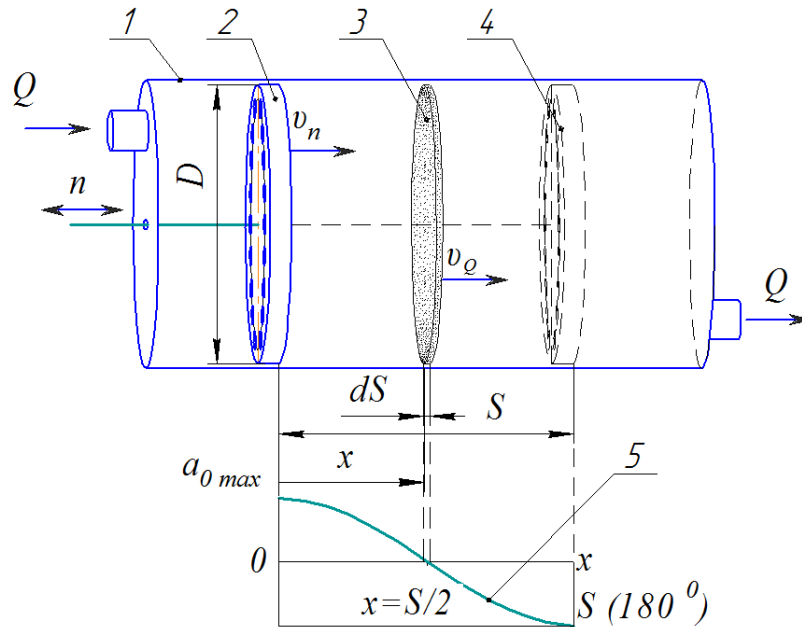


Рис. 4.11. Схема визначення кратності обробки: 1 – камера; 2 – поршень; 3 – циліндричний шар емульсії товщиною dS ; 4 – крайнє положення поршня; 5 – графік залежності середнього прискорення емульсії в отворах поршня a_0 від положення поршня (кута повороту кривошипу).

Середня швидкість поршня дорівнює

$$v_{nc} = 2Sn. \quad (4.38)$$

Середню швидкість потоку емульсії визначали за формулою

$$v_Q = \frac{Q}{F_n} = \frac{4Q}{\pi D_n^2}. \quad (4.39)$$

Тоді вираз для знаходження K з формули (4.37) з урахуванням (4.38) і (4.39) буде мати вигляд

$$K = \frac{\pi D_n^2 sn}{2Q}. \quad (4.40)$$

Аналізуючи останнє рівняння, можна зробити висновки, що для

підвищення ступеня гомогенізації (збільшення K) необхідно зменшувати подачу емульсії у апарат та збільшувати діаметр поршня (робочої камери), частоту й амплітуду коливання поршня.

Для найбільш вивченої – клапанної гомогенізації – залежність ефективності гомогенізації від кратності обробки має параболічний характер [210, 257, 261] (рис. 4.12), причому при збільшенні кратності обробки темпи підвищення ефективності гомогенізації знижуються.

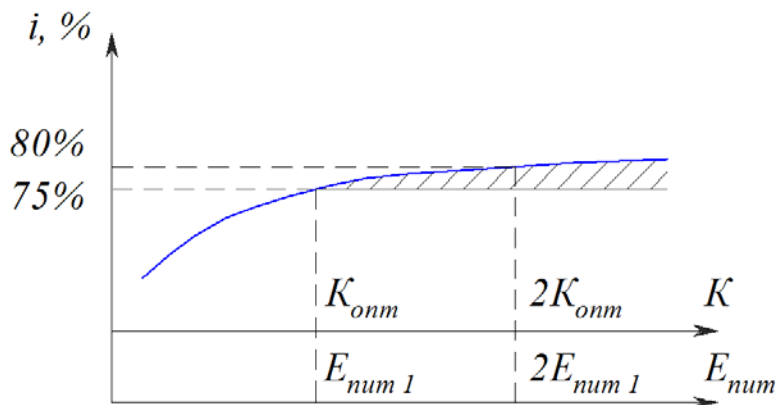


Рис. 4.12. Характер залежності ефективності гомогенізації від кратності обробки K і питомих енерговитрат E_{num} .

Для пульсаційної гомогенізації можливо прогнозувати аналогічний характер залежності $i=f(K)$.

Виходячи з формул (4.40) і (4.36)

$$K \sim E_{num} \quad (4.41)$$

Логічно припустити, що існує таке оптимальне значення кратності K_{opt} нижче за яке ефективність гомогенізації не відповідає вимогам якості ($i < 75\%$), а вище за яке темпи підвищення питомих енерговитрат випереджають темпи підвищення i . Отже режими, при яких $K > K_{opt}$, енергетично неефективні.

Кратність проходження продукту крізь отвори поршня визначає ймовірне мінімальне прискорення a_{min} емульсії в отворах поршня. При $K \leq 1$ емульсія однократно проходить крізь отвори поршня. В залежності від кута повороту кривошипу (відстані від крайньої мертвої точки поршня) вхід емульсії до отворів поршня може бути у будь-якому положенні поршня від 0 до 180°

кута повороту кривошипу (від 0 до S відстані від початкового положення поршня) (рис. 4.13).

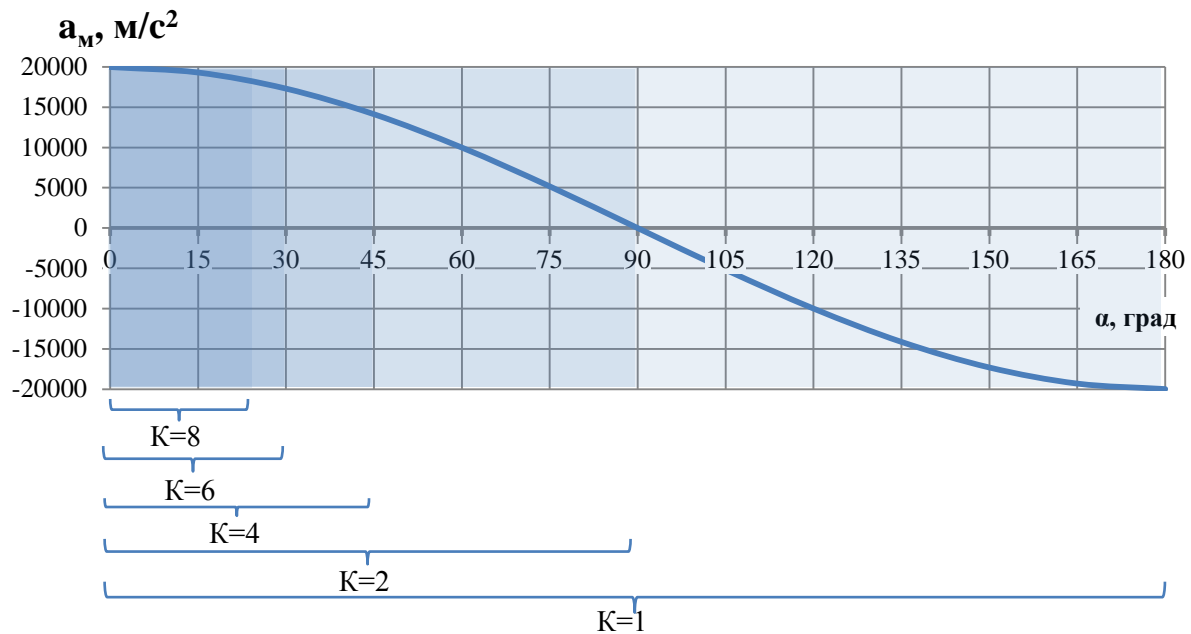


Рис. 4.13. Залежність прискорення емульсії в отворах поршня ППГ a_m від кута кривошипу α та кратності K ($n=9000$ хв⁻¹; $K_o=0,5$; $s=22$ мм).

Положення поршня x (рис. 4.13) визначає значення миттєвого прискорення емульсії (рис. 4.10). При $K \leq 1$ частина емульсії, яка пройде крізь отвори поршня при куті повороту кривошипу 90° або 270° , буде мати прискорення $a_m=0$. Диспергування жирової фази у цьому об'ємі не відбудеться і емульсія після гомогенізації буде містити частину жирових кульок, які не подрібнились, а продукт – уявлятиме собою нерівномірний дисперсний склад емульсії, що неприпустимо. Таким чином найгірші умови гомогенізації будуть мати місце при $K \leq 1$ та $a_{min}=0$.

При $K=2$ емульсія двократно проходить крізь отвори поршня. Можливий випадок, коли шар емульсії dS , який пройде крізь отвори поршня при кутах повороту кривошипу 90° і 270° , буде мати прискорення $a_m=0$.

При $K=4$ найгірші умови для емульсії створюються при входженні її в отвори поршня при $\alpha=45^\circ$, 135° , 225° і 315° , прискорення при цьому дорівнює $a_{0max} \cdot \cos 45^\circ = 0,71 a_{0max}$. У загальному випадку a_{min} визначається з формули

$$a_{min} = a_{0max} \cos \frac{180}{K}, \quad (4.42)$$

де a_{0max} – максимальне значення миттєвого прискорення емульсії в отворах поршня.

$$a_{0max} = 4\pi^2 \varphi_{ш} \frac{n^2 r}{K_o}. \quad (4.43)$$

За вимогами [173], не більше 15% жирових кульок можуть мати розміри більші за обумовлений вимогами середній діаметр. Для цього визначимо мінімальне миттєве зниження прискорення емульсії в отворах поршня при обробці в ППГ [257]

$$a_{0min} = 0,85^2 a_{0max}^c = 0,72 a_{0max}^c.$$

З формули (4.42) знайдемо мінімальну кратність обробки в ППГ

$$K = \frac{180}{\arccos \frac{a_{min}}{a_{0max}}}. \quad (4.44)$$

$$K = \frac{180}{\arccos 0,72} = 4,1.$$

У роботах [257, 261] знайдені емпіричні формули середнього прискорення емульсії в клапанній щілині a_e від максимальної кратності обробки K_{max} , при якій досягається ефективність гомогенізації 90%:

$$a_e = (7,3693 - 0,6381 \cdot K_{max}) 10^6. \quad (4.45)$$

$$K_{max} = 11,56 - \frac{a_e}{0,6381}. \quad (4.46)$$

Користуючись даними [210], визначимо залежність прискорення потоку a емульсії від ступеня підвищення ефективності гомогенізації при кратності 4 і 1 для клапанної гомогенізації i (при $K=4$) / i (при $K=1$) для досягнення необхідної за технологічними вимогами ефективності гомогенізації $i=75\%$ (рис. 4.14).

Емпіричне рівняння (при $7,6 \cdot 10^6 \leq a \leq 1,9 \cdot 10^6$) має вигляд

$$\frac{i_{K=4}}{i_{K=1}} = 1,9133 - 7,651 \cdot 10^{-15} a^2 - 1,2433 \cdot 10^{-7} a_e. \quad (4.47)$$

Дійсна кратність обробки молочної емульсії в ППГ, знаходиться у діапазоні 7–10 і більше. Отже, для отримання дисперсного складу емульсії в ППГ належної якості, виходячи з формули (4.40), подача продукту повинна визначатися з виразу

$$Q \leq \frac{\pi D_n^2 s n}{2K}. \quad (4.48)$$

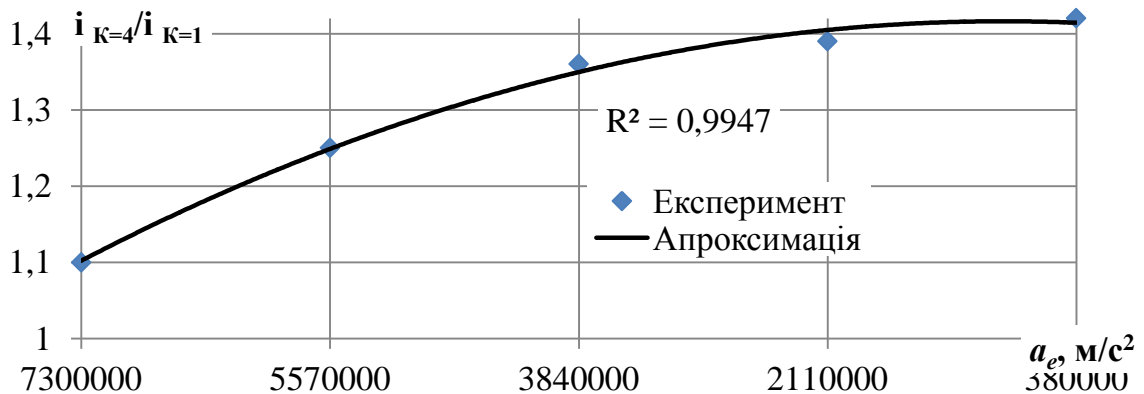


Рис. 4.14. Залежність ступеня підвищення ефективності гомогенізації при кратності 4 і 1 для клапанної гомогенізації i (при $K=4$)/ i (при $K=1$) від прискорення потоку a_e емульсії.

Технічним завданням на проектування гомогенізатора зазвичай регламентується його продуктивність. В такому випадку необхідний внутрішній діаметр камери необхідно визначати з формули

$$D_n \geq \sqrt{\frac{2KQ}{\pi s n}}. \quad (4.49)$$

Отримана формула дозволяє розрахувати мінімальний діаметр камери ППГ, що при сталих s і n забезпечує необхідну кратність обробки.

4.2.1.3. Аналітичне визначення дисперсності молочної емульсії при пульсаційній гомогенізації

За результатами наших досліджень, викладених у підрозділі 4.1, встановлено зв'язок між прискоренням емульсії молока та середнім діаметром жирової кульки d_k

$$d_k = \frac{K_h}{\sqrt{a_e}}, \quad (4.50)$$

де K_h – коефіцієнт гомогенізації.

Коефіцієнт гомогенізації K_h визначений аналітично для умов клапанної гомогенізації в підрозділі 4.1 і враховує його особливості, такі як однократний вплив на жирову кульку. Дослідний пульсаційний гомогенізатор здійснює багатократний вплив на емульсію, тому очікуване значення K_h для пульсаційної гомогенізації буде меншим.

З формул (4.35) і (4.50) можливо знайти залежність, що пов'язує середній діаметр жирової кульки молочної емульсії після гомогенізації з конструктивно-кінематичними показниками ППГ

$$d_k = \frac{K_h}{\pi n} \sqrt{\frac{K_o}{2\varphi_{us}}}, \quad (4.51)$$

Аналізуючи останню формулу, можна зробити висновок, що для підвищення дисперсності емульсії необхідно виконання умов

$$\{K_o, K_h\} \rightarrow \min; \{n, s, \varphi_{us}\} \rightarrow \max. \quad (4.52)$$

Враховуючи, що ефективність гомогенізації (як відношення ступеня диспергування до питомих енерговитрат процесу) підвищується при збільшенні частоти коливань поршня, і задаючись діапазоном значень K_2 можливо визначити мінімальний радіус кривошипу ППГ для початку диспергування жирової фази молока

$$s = \left(\frac{K_h}{d\pi n} \right)^2 \frac{K_o}{2\varphi_{us}}. \quad (4.53)$$

В сучасних умовах максимальна частота обертання електродвигунів (без використання малопоширених і тому коштовних моделей) зазвичай становить $n=9000$ об/хв. В ППГ планується уникнути використання механізмів для підвищення частоти обертання робочого органу (мультиплікаторів) для зниження вартості та металомісткості гомогенізатора.

Таким чином згідно останньої формули при $K_h=100$, $K_o=0,4$, $\varphi_{us}=0,98$ і $n=150 \text{ с}^{-1}$ початок гомогенізації ($d_k = 2,5$ мкм) відбувається при $s = 1,4$ мм, а

необхідний ступінь дисперсності ($d_k = 0,8-1,2$ мкм) досягається при $s=6,5-14,5$ мм.

При збільшенні амплітуди коливання поршня (радіуса кривошипу) та частоти коливання підвищується дисперсність жирової фази молока (рис. 4.15).

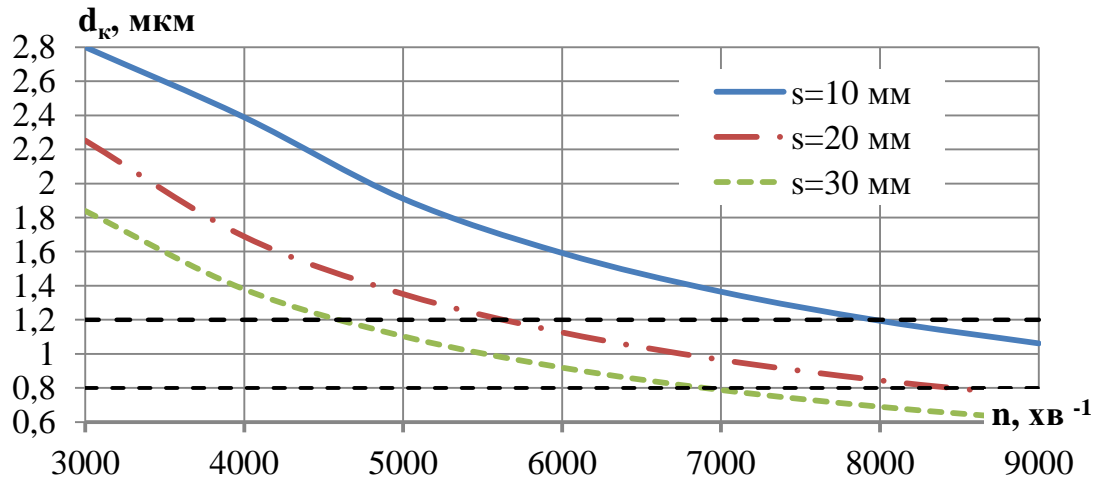


Рис. 4.15. Залежність середнього діаметра жирових кульок d від амплітуди s і частоти коливань поршня n (при $K_h=100$, $K_0=0,4$, $\varphi=0,98$).

Для досягнення середнього розміру жирових кульок емульсії 0,8 мкм необхідно забезпечити $n=7600-9000$ хв⁻¹ і $s=14-20$ мм.

При підвищенні n діаметр жирових кульок зменшується більш суттєво, ніж при збільшенні r . Оптимальний діапазон дисперсності молочної емульсії після гомогенізації на рис. 4.15 показаний штриховими лініями.

При пульсаційній гомогенізації використовується багатократна обробка, при якій ефективність гомогенізації підвищується. Зниження коефіцієнта гомогенізації при $K=4,1$ (4.51) може бути розраховане як

$$\frac{K_h}{K_{hmax}} = \sqrt{\frac{a_e}{a_{max}}}, \quad (4.54)$$

Або ступінь зменшення розмірів жирових кульок d_k / d_{max}

$$\frac{d_k}{d_{max}} = \frac{K_h}{K_{hmax}} = \sqrt{\frac{a_e}{a_{max}}}, \quad (4.55)$$

$$\frac{d_k}{d_{max}} = \frac{K_h}{K_{hmax}} = \sqrt{0,72} = 0,85.$$

Таким чином, при чотирикратному проходженні молока крізь отвори поршня необхідне прискорення емульсії можливо знизити на 15%. Або при використанні прискорення, що відповідає однократній обробці, середній розмір жирових кульок при чотирикратній обробці знижується на 15% у порівнянні з однократною обробкою.

4.2.2. Визначення дисперсності жирової фази молока в процесі пульсаційної гомогенізації в роторному апараті в умовах резонансних явищ

Для ПА з ВР швидкість ковзання жирової кульки 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 частки часу пульсацій і є енергонеєфективним (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 енерговитрати у клапанних гомогенізаторах).

Прискорення потоку молока викликає різницю швидкості (ковзання) 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.

Конструювати РПА, призначені для гомогенізації молока, для

максимального збільшення кавітаційного ефекту, на наш погляд, недоцільно за доводами, наведеними при розгляді кавітаційної теорії диспергування. Диспергуючий ефект таких пристроїв, на нашу думку, пов'язаний зі збігом факторів, що підвищують кавітацію, та факторів, що збільшують швидкість ковзання. При зменшенні зазору між ротором та статором і профілювання поверхонь каналів ротора і статора інтенсифікуються не тільки процеси кавітації, а і збільшуються пульсації тиску, що підвищує в свою чергу швидкість ковзання жирової кульки і, відповідно, ступінь диспергування.

Для визначення середнього розміру жирової кульки після гомогенізації, за формулою (4.12) необхідно розрахувати величину середнього прискорення молочної емульсії. Для цього необхідно визначити миттєве значення швидкості потоку молока та рівняння зміни площі перерізу модулятора ПА з ВР.

4.2.2.1. Аналітичне визначення зміни площі прохідного перетину модулятора пульсаційного апарата з ротором, що вібрує

Рівняння зміни площі прохідного перерізу модулятора РПА справляє значний вплив на вивчення закономірностей нестационарного плинуща середовища в каналах ротора та статора. Воно формує величину миттєвих значень швидкості та прискорення, що в свою чергу впливає на величину миттєвої швидкості рідини [17].

У класичних РПА закон зміни площі прохідного перерізу модулятора за часом $S(t)$ головним чином визначає величину імпульсів тиску і, як наслідок, інтенсивність кавітації, що вважається головною причиною руйнування дисперсної фази в роторно–пульсаційних диспергаторах. Для створення розрідження в каналах статора РПА, що необхідне для виникнення кавітації, необхідне раптове (швидке) закриття модулятора. За цієї причини отвори РПА мають прямокутну форму і зазор δ намагаються зробити якомога меншим. Крім того, найважливішим проміжком часу в роботі РПА є закриття отворів модулятора. Неточності при описі функції $S(t)$ на цьому проміжку призводять

до істотних помилок у визначенні величини імпульсів тиску, а отже і ефективності роботи РПА в цілому.

Для отворів статора і ротора прямокутної форми рівняння $S(t)$ представляє собою трапецію на інтервалі процесу відкривання та закривання отворів [86]. Отвори овальної форми приводяться до прямокутної за допомогою відповідних виразів. Внаслідок малих зазорів, що необхідні в РПА, які проектуються для отримання максимальної кавітації, проміжком між ротором і статором нехтують. Для ПА з ВР немає необхідності у створенні мінімального зазору, тому його величиною зневажати неможна.

В роботах [87, 342] функція $S(t)$ для початку процесу закривання отворів має розрив похідної, що неприпустимо. Основна причина цього – представлення функції $S(t)$, у вигляді кускової функції. Цикл зміни площі переривника розбивають на 4 ділянки: відкривання отворів модулятора, повністю відкриті отвори, закривання отворів і повністю закриті отвори – для кожної з яких визначають свою функцію $S(t)$. В роботі [330] запропонована модель зміни $S(t)$ яка враховує течію через зазори модулятора не тільки за шириною, але і за висотою каналу модулятора, але використання її обмежено РПА з малими δ .

Таким чином, до теперішнього часу розроблені достатньо інформативні математичні моделі зміни площі прохідного перетину модулятора РПА. Основними недоліками цих моделей є громіздкість і обмеженість – застосування рівнянь для розрахунку РПА тільки з великими або тільки з малими зазорами між ротором і статором.

Для ПА з ВР визначальним фактором гомогенізації є прискорення руху емульсії в отворах модулятора, тому немає необхідності у створенні мінімальних зазорів δ і стає можливим використовувати отвори модулятора круглої форми, що технологічно простіше, причому немає необхідності описувати функцію $S(t)$ абсолютно точно при закриванні отворів модулятора. Важливіше описати залежність $S(t)$ безперервною функцією для уникнення зайвої громіздкості та можливості отримання зручних для використання при розрахунку ПА з ВР залежностей.

Розрахункова схема ПА з ВР представлена на рис. 4.16.

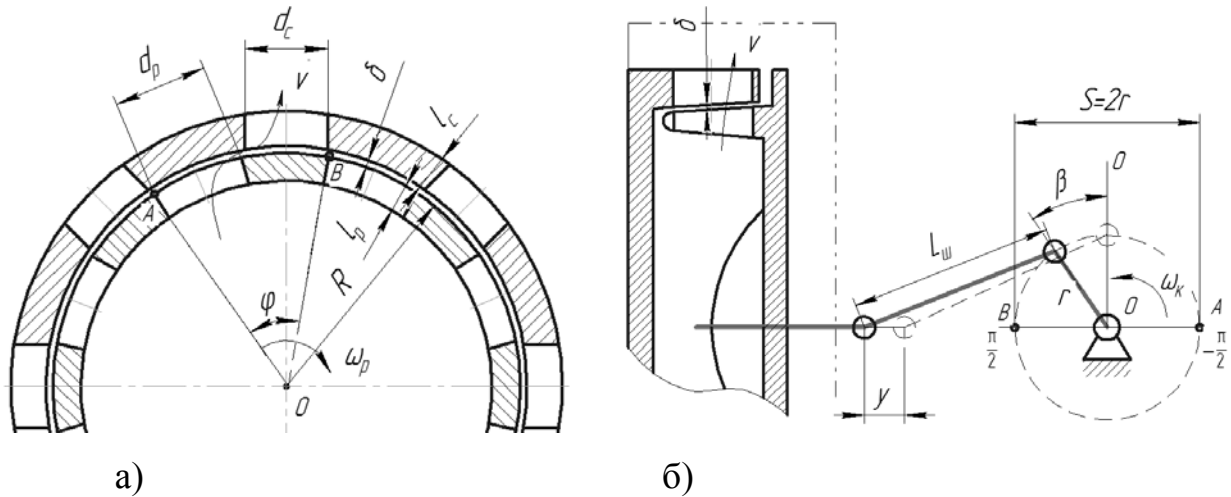


Рис. 4.16. Схема рухів ротора ПА: а) обертальний рух ротора, б) коливальний рух вздовж осі ротора.

Для виконання вимоги створення рівних гідродинамічних умов в отворах ПА для синхронізації з осьовими коливаннями ротора кількість отворів ротора та статора повинні бути рівними $z_p = z_c = z$, оскільки всі канали переривника повинні бути в рівних умовах. З аналогічних міркувань діаметри отворів ротора і статора рівні $d_p = d_c$.

У положенні ротора, що зображене на рис. 4.16 а, отвори статора повністю закриті проміжками між отворами ротора. Площа переривника ПА S при цьому мінімальна і дорівнює [275]

$$S_{min} = \pi d_p \delta z, \quad (4.56)$$

де δ – радіальний зазор між ротором та статором, м.

При обертанні ротора зі швидкістю ω_p отвори ротора співпадуть з отворами статора. У цьому положенні площа переривника сягає максимального значення

$$S_{max} = \frac{\pi d_p^2}{4} z. \quad (4.57)$$

При повертанні ротора з точки А в точку В (рис. 4.16 а) площа знову набуде мінімального значення. При подальшому обертанні цикл зміни площі переривника повторюється.

Зміна площі отворів переривника ПА з круглими отворами із задовільною точністю описується рівнянням (у безрозмірній формі, де за $S(t)_{max} = 1$ при $\delta = 0$), де в момент часу $\tau = 0$ відповідає такий φ , при якому отвори ротора перекриті проміжками між отворами статора (рис. 4.17).

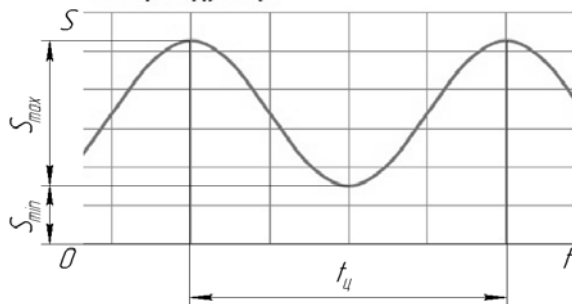


Рис. 4.17. Характер зміни площі модулятора ПА з ВР

$$S(t) = \frac{1}{2} + \frac{\sin(\varphi z - \frac{\pi}{2})}{2}, \quad (4.58)$$

де φ – кут повороту ротора, рад.

З урахуванням зазору між статором та ротором δ у функції від кута повороту ротора залежність (4.58) набуває вигляду (рис. 4.17)

$$S(\varphi) = S_{max} \left(\frac{1}{2} + \frac{\sin(\varphi z - \frac{\pi}{2})}{2} \right) + S_{min}, \quad (4.59)$$

де S_{max} – максимально можлива площа переривника РПА, м²;

S_{min} – мінімально можлива площа переривника РПА (при закритих отворах ротора), м².

Останнє рівняння з урахуванням (4.56) і (4.57) набуває вигляду

$$S(\varphi) = \frac{\pi d_p^2 z}{8} \left(1 + \sin(\varphi z - \frac{\pi}{2}) \right) + \pi d_p \delta z. \quad (4.60)$$

Кількість отворів ротора пов'язана з діаметром ротора та діаметром отворів співвідношенням, яке впливає з очевидних геометричних перетворень

$$d_p = \frac{\pi D}{2z}. \quad (4.61)$$

З урахуванням останнього рівняння зміну площі можна виразити як

$$S(\varphi) = \frac{\pi^2 D}{16} \left(\frac{\pi D}{2z} \left(1 + \sin\left(\varphi z - \frac{\pi}{2}\right) \right) + 8\delta \right). \quad (4.62)$$

Зміну площі прохідного перерізу модулятора РПА представляють у вигляді кускової функції – набором рівнянь на різних проміжках часу [88, 192, 330, 342], що підвищує складність математичного опису процесу. При описі цієї функції в ПА з ВР внаслідок використання круглих отворів та рівності $z_p = z_c = z$ стало можливим із задовільною точністю використати безперервну функцію (4.62), що значно спрощує подальший математичний опис процесу руху рідини у переривнику апарата.

4.2.2.2. Швидкість емульсії в отворах переривника

Визначення залежності швидкості від часу для потоку рідини в РПА є найважливішим завданням, що дозволяє перейти до визначення прискорення потоку емульсії, а отже і дисперсності продукту. Оскільки ПА з ВР є різновидом РПА, то проаналізуємо рішення цієї задачі для класичних РПА.

Визначенню закономірностей течії в каналах класичного РПА присвячена величезна кількість робіт [87, 88, 157, 192, 196, 236, 237, 306, 330]. Процес розвитку гідромеханічних моделей течії в каналах статора і ротора детально представлений в роботі [331]. Найбільш проста модель течії в переривнику РПА заснована на рівнянні нерозривності потоку рідини, по якій швидкість пропорційна площі прохідного перерізу. Сучасна модель течії рідини в РПА ґрунтується на нестационарному рівнянні Бернуллі і системі рівнянь Нав'є-Стокса, в яких з урахуванням численних доповнень, враховані: змінний гідравлічний опір для площі прохідного перерізу модулятора, що змінюється, стисливість рідини, змінний тиск в порожнині ротора, додатковий тиск за рахунок розгону рідини при її зчепленні з поверхнею ротора, коріолісові сили, кінчна форма поверхні ротора і статора. Аналізуючи отримані диференціальні рівняння, слід зазначити, що більшість з них не мають рішення в явному

вигляді [192, 306, 330] і утруднені для застосування в інженерних розрахунках при проектуванні РПА [88]. Застосування їх для розрахунку ПА з ВР, де на потік емульсії накладаються різні по фазі, частоті і амплітуді коливання, викликані вібрацією ротора, є невиправдано складним завданням. Проте отримані готові рішення і характер функції швидкості від часу застосовуємо для ПА з ВР при розгляді руху емульсії, без урахування осьової вібрації ротора.

Рух емульсії в модуляторі ПА з ВР створюється за рахунок [274]:

- обертального руху ротора з лопатками, в результаті якого утворюється відцентровий тиск в роторі ПА;
- зворотно-поступального руху ротора вздовж осі обертання, в результаті якого відбувається виштовхування або всмоктування емульсії (рис. 4.17).

Поставлену задачу знаходження швидкості емульсії як функції від часу (або кута повороту ротора) будемо вирішувати в 3 етапи. На першому визначимо швидкість емульсії при коливальних осьових рухах ротора, без урахування відцентрового тиску емульсії, що створюється при обертанні ротора – v_o^n . На другому – швидкість емульсії при проходженні переривника ПА, що викликана тільки відцентровими силами – v_o^e . На третьому знайдемо сумарну швидкість емульсії у переривнику ПА з ВР – v_o .

Визначення швидкості емульсії при коливальних осьових рухах ротора, без урахування відцентрового тиску рідини. При перекритті отворів статора і ротора емульсія, що витісняється ротором при його коливальних рухах $Q_p(\tau)$, проходить крізь отвори переривника ПА. Тоді на основі умови нерозривності потоку [47]

$$Q_p(\tau) = Q_o(\tau), \quad (4.63)$$

де $Q_o(\tau)$ – витрата емульсії крізь переривник ПА за рахунок осьових коливань ротора, м³/с;

τ – час процесу, с.

При постійній частоті обертання ротора та кривошипу $n_p = \text{const}$, $n_k = \text{const}$ останнє рівняння можна представити у вигляді

$$Q_p(\beta) = Q_o(\varphi). \quad (4.64)$$

За відомою формулою

$$Q_o(\varphi) = v_o^n(\varphi) \cdot S(\varphi), \quad (4.65)$$

де $v_o^n(\varphi)$ – швидкість емульсії крізь отвори переривника, м/с;

$S(\varphi)$ – площа отворів модулятора ПА, м².

Витрата емульсії при русі ротора на величину y (рис. 4.17 б) у будь-який момент часу

$$Q_p(t) = v_p(t) \frac{\pi D^2}{4}, \quad (4.66)$$

де $v_p(t) = \frac{dy}{dt}$ – швидкість руху ротора вздовж осі обертання, м/с.

Для простих синусоїдальних коливань при $r / L_{ш} \rightarrow 0$ (довжина шатуна кривошипного механізму $L_{ш}$ набагато більша за радіус кривошипу r , що складає до 1,5 мм) можна записати [136]

$$\frac{dy}{dt} = v(t) = \pi n_k s \cdot \cos \beta, \quad (4.67)$$

де s – амплітуда коливань ротора $s = 2r$, м.

З урахуванням рівнянь (4.65–4.67 і 4.50) умову нерозривності потоку (4.63) запишемо у вигляді

$$\pi n_k s \cdot \cos \beta \frac{\pi D^2}{4} = v_o^n(\varphi) \left(\frac{\pi d_p^2 z}{8} \left(1 + \sin\left(\varphi z - \frac{\pi}{2}\right) \right) + \pi d_p \delta z \right). \quad (4.68)$$

Таким чином, швидкість руху емульсії крізь отвори переривника ПА з ВР як функція від кута повороту кривошипу має вигляд

$$v_o^n = \frac{\pi^2 n_k r \cdot D^2 \cos \beta}{\pi d_p^2 z \left(1 + \sin\left(\varphi z - \frac{\pi}{2}\right) \right) + 8 \pi d_p \delta z}. \quad (4.69)$$

З урахуванням формули (4.61), рівняння (4.69) набуває вигляду

$$v_o^n = \frac{2 n_k r \cdot D \cos \beta}{\frac{\pi D}{2z} \left(1 + \sin \left(\varphi z - \frac{\pi}{2} \right) \right) + 8\delta}. \quad (4.70)$$

Визначення швидкості емульсії при проходженні переривника ПА, що викликана тільки відцентровими силами. Розглянемо рух емульсії при обертанні ротора ПА і періодичному відкриванні та закриванні отворів модулятора. Слід зазначити, що характер процесів зміни тиску, швидкості, прискорення та витрат емульсії в модуляторі досить добре вивчений [88, 192, 330]. За проведеними дослідженнями, в процесі відкривання каналів статора середовище, яке обробляється у переривнику апарата розганяється, а його швидкість збільшується як показано на рис. 4.18 [88].

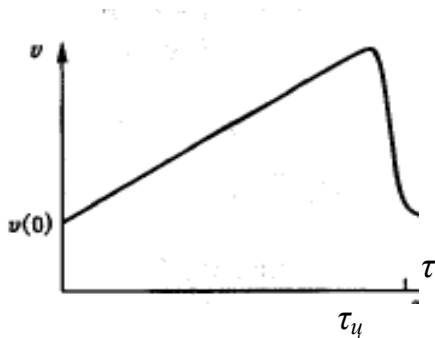


Рис. 4.18. Характер залежності швидкості в каналі статора від часу.

Монотонно зростаюча частина функції на останньому рисунку описується наступним чином

$$v_o^e(\tau) = v(0) + \frac{\Delta P}{\rho l} \tau, \quad (4.71)$$

де $v(0)$ – початкова швидкість, м/с;

ΔP – перепад тиску між входом до каналу ротора та виходом з каналу статора, Па;

ρ – густина середовища, що обробляється, кг/м³;

l – довжина каналу модулятора, м;

τ – час, с.

Останнє рівняння дійсне на проміжку часу, рівному циклу зміни площі переривника ($0 \leq \varphi \leq t_u$). Для будь-якого часу рівняння має такий вигляд:

$$v_o^e(t) = v(0) + \frac{\Delta P}{\rho l} \tau_u \left\{ \frac{\tau}{\tau_u} \right\}, \quad (4.72)$$

де τ_u – час циклу зміни площі переривника, с;

$\left\{ \frac{\tau}{\tau_u} \right\}$ – дробова частина числа $\frac{\tau}{\tau_u}$.

Початкова швидкість визначається з рівняння

$$v(0) = \sqrt{\frac{2\Delta P}{\rho \zeta_{max}}}, \quad (4.73)$$

де ζ_{max} – максимальний гідравлічний опір (коефіцієнт місцевого гідравлічного опору пари "канал ротора – канал статора" при закритих каналах) [334].

$$\zeta_{max} = \left(\frac{S_{max}}{\varepsilon \cdot S_{min}} - 1 \right)^2, \quad (4.74)$$

де S_{min} – мінімальна площа переривника, м²;

ε – коефіцієнт стиснення [83,172].

Представимо останнє рівняння у вигляді

$$\zeta_{max} = \left(\frac{1}{\varepsilon \frac{S_{min}}{S_{max}}} - 1 \right)^2. \quad (4.75)$$

Тоді, враховуючи (4.56, 4.57) після перетворень, отримаємо

$$\frac{S_{min}}{S_{max}} = \frac{4\delta}{d}. \quad (4.76)$$

Для кожного зі співвідношень S_{min} / S_{max} з таблиць Жуковського визначається ε [88].

У випадку, коли ротор ПА має лопаті, які приводять рідину, що поступає в порожнину ротора, у обертальний рух, перепад тиску між порожниною РПА та робочою камерою визначається з відомого виразу

$$\Delta P = \frac{1}{2} \rho \omega_p^2 R^2. \quad (4.77)$$

Довжина каналів модулятора

$$l = l_p + \delta + l_c, \quad (4.78)$$

де l_p – довжина каналу ротора, м;

δ – радіальний зазор між ротором та статором, м;

l_c – довжина каналу статора, м.

З урахуванням останніх рівнянь вираз для миттєвої швидкості можна записати у вигляді

$$v_o^e(t) = \sqrt{\frac{2\Delta P}{\rho \zeta_{max}}} + \frac{\rho \omega_p^2 R^2 t}{2\rho(l_p + \delta + l_c)} = \sqrt{\frac{2\frac{1}{2}\rho\omega_p^2 R^2}{\rho \zeta_{max}}} + \frac{\rho \omega_p^2 R^2 t}{2\rho(l_p + \delta + l_c)},$$

і після перетворень маємо

$$v_o^e(t) = \frac{\omega_p D}{2\sqrt{\zeta_{max}}} + \frac{\omega_p^2 D^2}{8(l_p + \delta + l_c)} t_u \left\{ \frac{t}{t_u} \right\}. \quad (4.79)$$

Виразимо час у останній формулі через функцію кута повороту ротора φ , і, враховуючи, що $t = \varphi / \omega_p$, $t_u = 2\pi / z\omega_p$, отримаємо

$$v_o^e(\varphi) = \frac{\omega_p D}{2\sqrt{\zeta_{max}}} + \frac{\omega_p D^2 \pi}{4z(l_p + \delta + l_c)} \left\{ \frac{\varphi z}{2\pi} \right\}, \quad (4.80)$$

або

$$v_o^e(\varphi) = \frac{\pi n_p D}{60\sqrt{\zeta_{max}}} + \frac{\pi^2 n_p D^2}{120z(l_p + \delta + l_c)} \left\{ \frac{\varphi z}{2\pi} \right\}. \quad (4.81)$$

Для малих зазорів δ (що реалізується в ПА з ВР) швидкість $v(0)$ набагато менша максимальної швидкості [88], тому останню залежність можна представити як

$$v_o^e(\varphi) = \frac{\pi^2 n_p D^2}{120z(l_p + \delta + l_c)} \left\{ \frac{\varphi z}{2\pi} \right\}. \quad (4.82)$$

Сумарна швидкість рідини у переривнику ПА з ВР. Сумарну швидкість рідини у переривнику ПА з ВР знайдемо як суму швидкостей v_o^e і v_o^n

$$\vec{v}_o = \vec{v}_o^n + \vec{v}_o^e. \quad (4.83)$$

Переходячи від векторної форми рівняння до скалярної і враховуючи, що лінії току рідини між цими векторами співпадають, отримаємо

$$v_o = v_o^n + v_o^e. \quad (4.84)$$

Отже, з урахуванням (4.70) і (4.82) швидкість руху рідини у отворах модулятора ПА буде мати вигляд

$$v_o = \frac{2 n_k r \cdot D \cos \beta}{\frac{\pi D}{2z} \left(1 + \sin \left(\varphi z - \frac{\pi}{2} \right) \right) + 8\delta} + \frac{\pi^2 n_p D^2}{120z(l_p + \delta + l_c)} \left\{ \frac{\varphi z}{2\pi} \right\}. \quad (4.85)$$

Аналізуючи останній вираз, важливо відмітити, що для збільшення швидкості плинущу емульсії через отвори переривника необхідно виконання вимог

$$v_o \rightarrow \max \begin{cases} n_k, n_p, r, D \rightarrow \max; \\ \delta, l_p, l_c \rightarrow \min. \end{cases} \quad (4.86)$$

При цьому зміна кількості отворів z не змінює максимальну швидкість (рис. 4.19), але впливає на крутизну лінії v_o . В цілому можна стверджувати, що впливом z на v_o можна знехтувати.

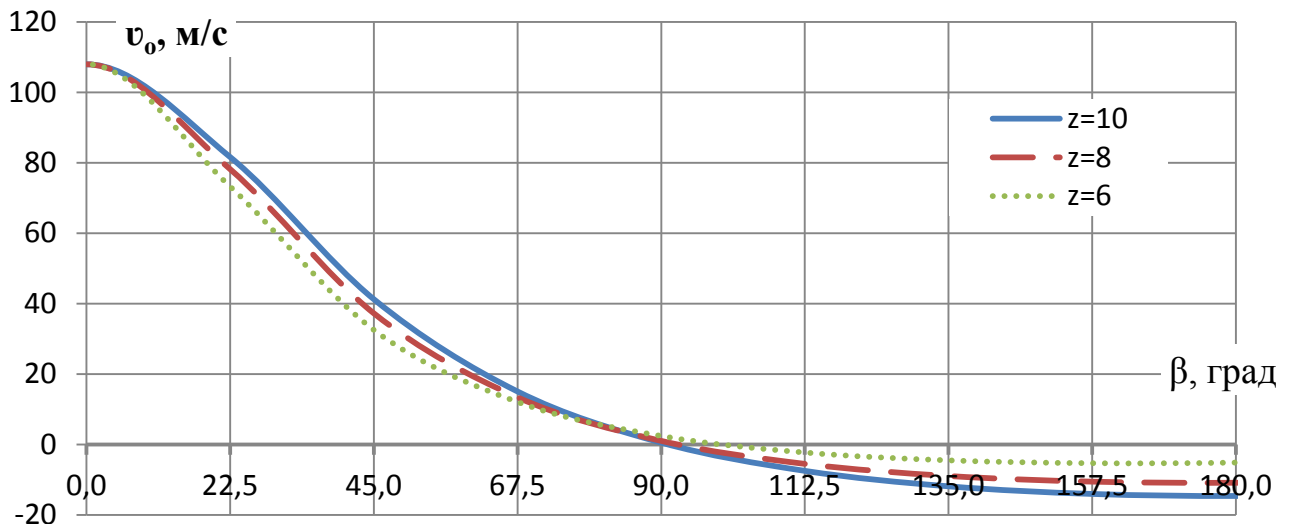


Рис. 4.19. Вплив кількості отворів z на швидкість плинущу емульсії в отворах модулятора v_o (при $D=0,125$ м, $r=1$ мм, $\delta=1$ мм, $l_p=5$ мм, $l_c=10$ мм, $z=8$).

Діаметр ротора практично не впливає на швидкість v_o^n , але є основним чинником збільшення v_o^e . Радіус кривошипу прямо пропорційно впливає на v_o^n , і головне - довжину модулятора $(l_p + \delta + l_c)$ необхідно зменшувати для підвищення v_o^e .

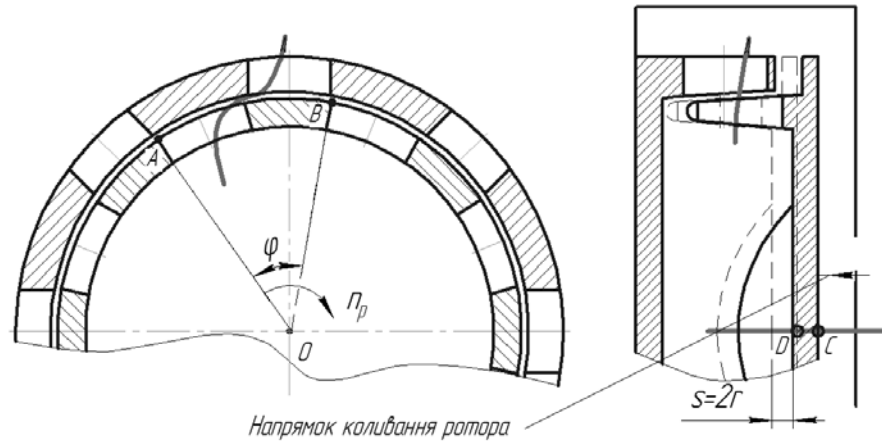
4.2.2.3. Синхронізація фаз обертання ротора та кривошипу

Для забезпечення рівності пульсацій емульсії у всіх отворах модулятора і підвищення ефективності диспергування частота обертання ротора ПА з ВР повинна бути синхронізована з частотою обертання кривошипу. Критеріями підвищення ефективності вважаємо підвищення прискорення потоку емульсії (збільшення швидкості при зменшенні часу цієї зміни). При цьому буде зростати швидкість ковзання жирової кульки, що є визначальною умовою для її руйнування. Іншим важливим критерієм підвищення ефективності вважаємо виникнення резонансу між пульсаціями молочної емульсії, що спричинені відцентровим виштовхувальним рухом емульсії крізь отвори модулятора і рухом емульсії, що спричинений осьовими рухами ротора. При резонансному режимі роботи підвищується амплітуда коливань, що підвищує швидкість ковзання жирової кульки і знижує енерговитрати процесу. Проаналізуємо можливі комбінації осьових рухів ротора з положенням отворів модулятора ПА з ВР, які визначають фазові співвідношення кутів обертання ротора і кривошипу, і визначимо найбільш ефективні з них з точки зору підвищення ступеня диспергування молочного жиру.

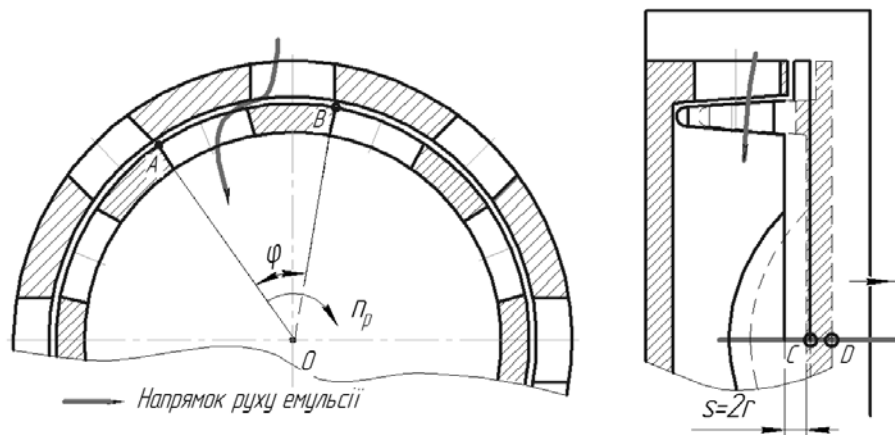
Синхронізація осьових рухів ротора з положенням отворів модулятора ПА з ВР визначається двома параметрами: співвідношенням частот обертання ротора і кривошипу та зсувом між кутами β і φ . Проаналізуємо найбільш характерні 3 варіанти співвідношення частот n_p і n_k [142].

Варіант 1. Цикл зміни площі переривника (від S_{min} до S_{min}). При повертанні ротора з точки А в точку В ротор здійснює коливання від крайніх

положень на величину амплітуди s (з точки С в точку D) (рис. 4.20). При цьому за пів оберта кривошипу і цикл зміни площі переривника при русі ротора ліворуч (рис. 4.20 а) ротор виштовхує емульсію крізь отвори переривника, яка рухається з порожнини ротора у канали статора.



а)



б)

Рис. 4.20. Зв'язок обертального та осьового рухів ротора: а) при обертанні ротора на кут φ ротор рухається ліворуч, б) при обертанні ротора на кут φ ротор рухається праворуч.

При наступному циклі зміни площі переривника ротор рухається ліворуч, і всмоктує емульсію з каналів статора в порожнину ротора (рис. 4.20 а). При цьому час обертання ротора з точки А в точку В – час відкриття та закриття отворів модулятора τ_1 (рис. 4.20) дорівнює часу руху ротора від крайнього лівого до крайнього правого положення τ_2 – точки С та D:

$$\tau_1 = \tau_2. \quad (4.87)$$

Враховуючи, що $\tau_1 = \frac{\pi}{\omega_k}$, а $\tau_2 = \frac{2\pi}{z_p \omega_p}$,

де ω_k , ω_p – відповідно кутові швидкості обертання кривошипу та ротора, останнє рівняння представимо як

$$\frac{\pi}{\omega_k} = \frac{2\pi}{z_p \omega_p}. \quad (4.88)$$

Після перетворень

$$\omega_p = \frac{2\omega_k}{z_p}; \quad n_p = \frac{2n_k}{z_p}. \quad (4.89)$$

Аналогічним чином визначимо залежність між фазовими кутами β і φ , враховуючи, що $\omega_k = \frac{\beta}{\tau_1}$, а $\omega_p = \frac{\varphi}{\tau_2}$ і після перетворень

$$\varphi = \frac{2\beta}{z_p}. \quad (4.90)$$

Для такого фазового співвідношення проаналізуємо 4 випадки зсуву фаз між кутами β і φ (рис. 4.20):

- а) при $\varphi=0$, $\beta=0$;
- б) при $\varphi=0$, $\beta = \pi / 2$;
- в) при $\varphi=0$, $\beta = \pi$;
- г) при $\varphi=0$, $\beta = 3\pi / 2$.

Нижче наведені графічні залежності зміни площі модулятора (рис. 4.21 а) і зміни швидкості осьового руху ротора в залежності від кута оберту кривошипу (рис. 4.21 б).

Отже для 4 вищевказаних варіантів рівняння швидкості емульсії в переривнику ПА (4.85) мають вигляд

$$а) v_o = \frac{2 n_k r D \cos \beta}{\frac{\pi D}{2z} \left(1 + \sin \left(2\beta - \frac{\pi}{2} \right) \right) + 8\delta} + \frac{n_k \pi^2 D^2}{60 z^2 (l_p + \delta + l_c)} \left\{ \frac{\beta}{\pi} \right\}. \quad (4.91)$$

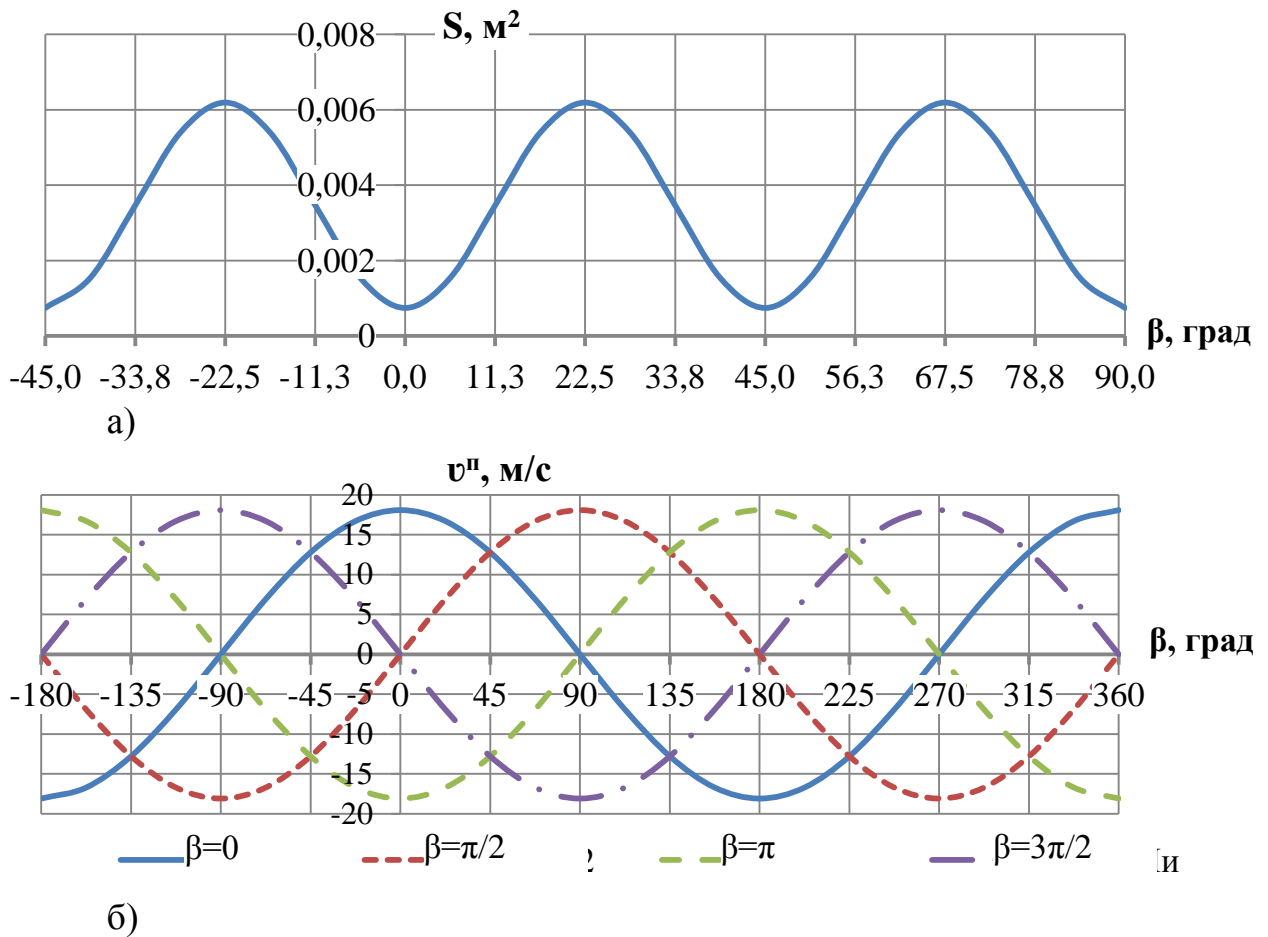


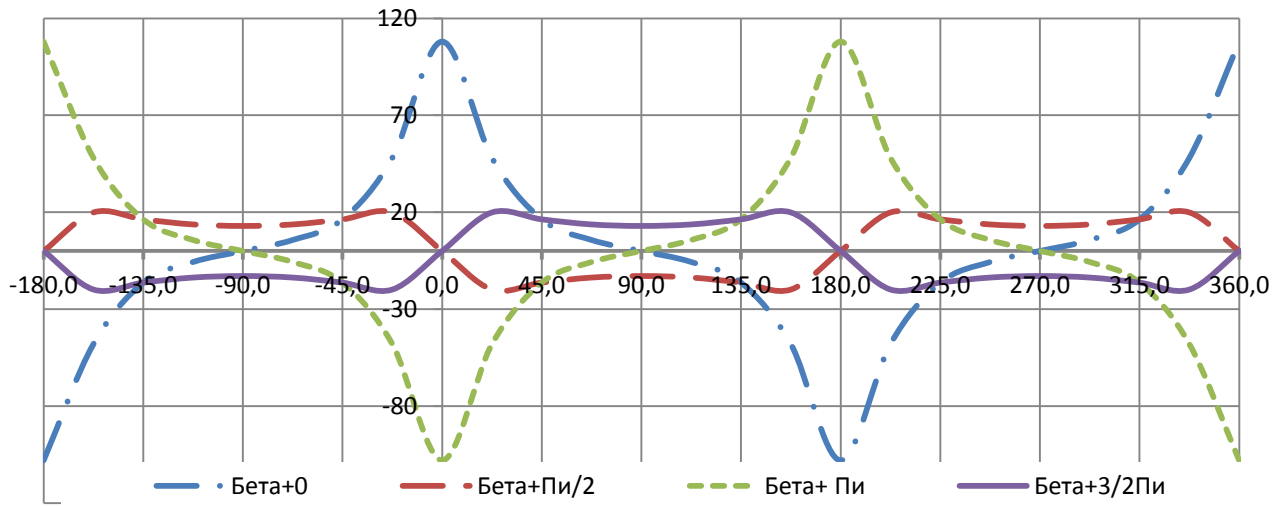
Рис. 4.21. Графіки зміни за варіантом 1: а) площі модулятора S , б) швидкості осевого руху ротора v_n .

$$\text{б) } v_o = \frac{2 n_k r D \cos(\beta - \pi / 2)}{\frac{\pi D}{2z} \left(1 + \sin\left(2\beta - \frac{\pi}{2}\right) \right) + 8\delta} + \frac{n_k \pi^2 D^2}{60z^2 (l_p + \delta + l_c)} \left\{ \frac{\beta}{\pi} \right\}. \quad (4.92)$$

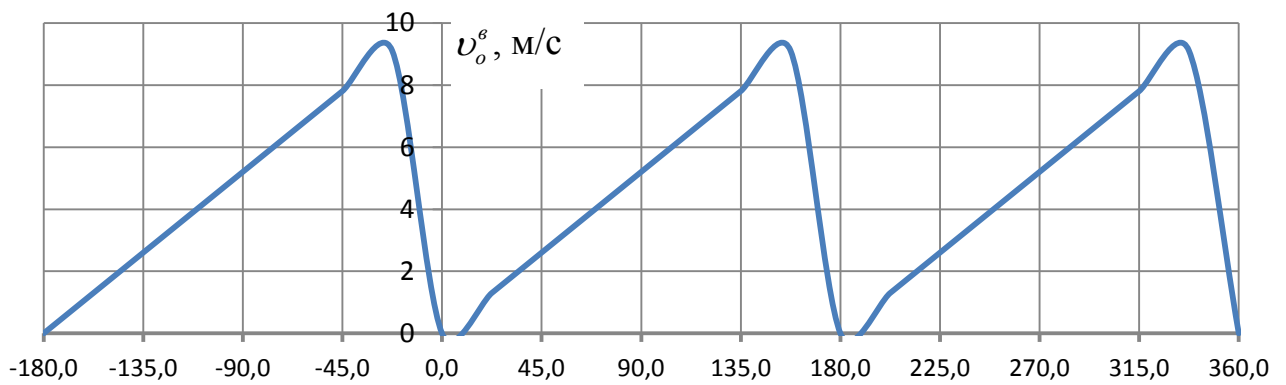
$$\text{в) } v_o = \frac{2 n_k r D \cos(\beta - \pi)}{\frac{\pi D}{2z} \left(1 + \sin\left(2\beta - \frac{\pi}{2}\right) \right) + 8\delta} + \frac{n_k \pi^2 D^2}{60z^2 (l_p + \delta + l_c)} \left\{ \frac{\beta}{\pi} \right\}. \quad (4.93)$$

$$\text{г) } v_o = \frac{2 n_k r D \cos(\beta - 3\pi / 2)}{\frac{\pi D}{2z} \left(1 + \sin\left(2\beta - \frac{\pi}{2}\right) \right) + 8\delta} + \frac{n_k \pi^2 D^2}{60z^2 (l_p + \delta + l_c)} \left\{ \frac{\beta}{\pi} \right\}. \quad (4.94)$$

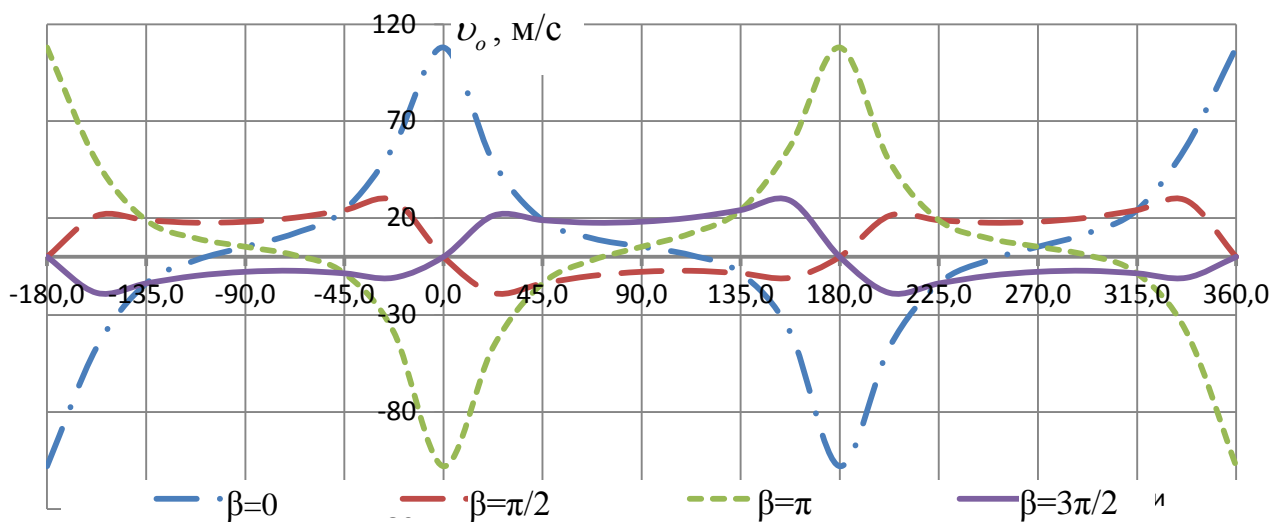
Графічно останні залежності показані на рис. 4.22 ($D=0,15$ м, $n_k=2880$ об/хв, $r=0,001$ м, $z=8$, $\delta=0,001$ м, $l_p=0,005$ м, $l_c=0,01$ м)



а)



б)



в)

Рис. 4.22. Графіки зміни швидкості емульсії в модуляторі а) від осьових коливань ротора v_o^n ; б) від відцентрової сили v_o^e , в) сумарної швидкості v_o для варіанта співвідношення частот $n_p = 2n_k / z_p$ для випадків $\beta=0$, $\beta = \pi / 2$, $\beta = \pi$, $\beta = 3\pi / 2$.

Рівняння В.І. Біглера [97], на основі якого здійснювалося виведення формули (4.85) не враховує підвищення коефіцієнта опору при русі рідини через тонкі канали, тому пікові значення швидкостей (при закритті отворів модулятора), що сягають 110 м/с, насправді будуть меншими, але характер графіків швидкостей залишиться незмінним.

Варіант 2. За цикл зміни площі переривника (від S_{min} до S_{min}) кривошип здійснює повний оберт, тобто ротор здійснює коливання на величину амплітуди s праворуч і повертається у вихідне положення (рис. 4.20).

При цьому співвідношення між τ_1 і τ_2 має вигляд:

$$\tau_1 = \frac{\tau_2}{2}. \quad (4.95)$$

Після перетворень

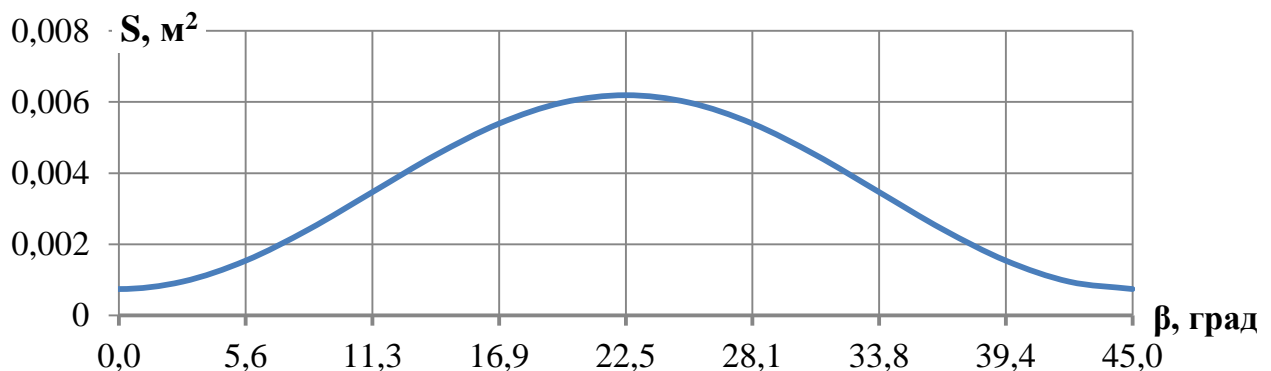
$$\omega_p = \frac{\omega_k}{z_p}; \quad n_p = \frac{n_k}{z_p}. \quad (4.96)$$

Аналогічним чином визначимо залежність між фазовими кутами β і φ ,

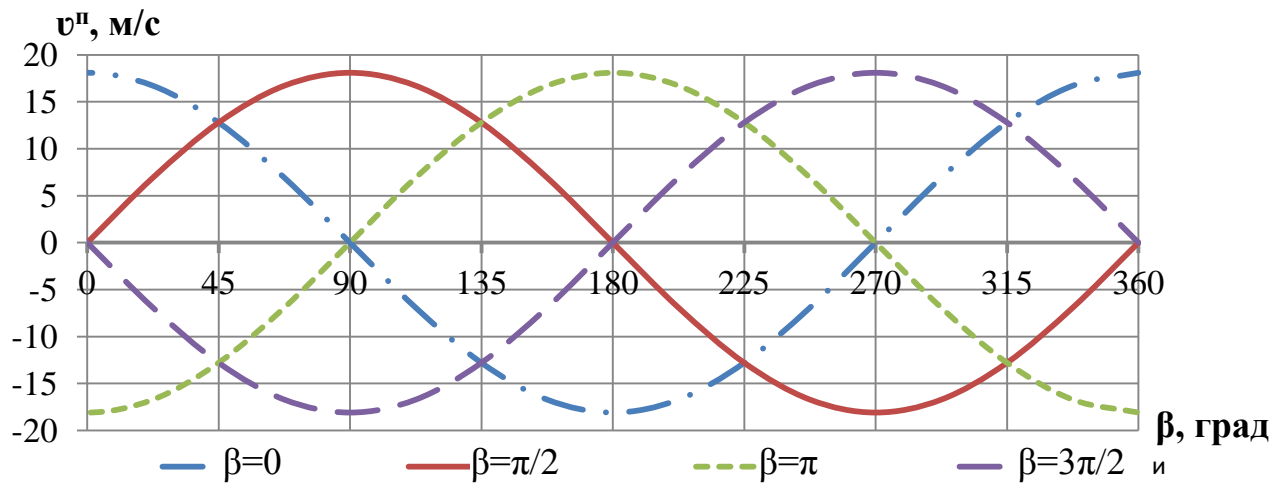
$$\varphi = \frac{\beta}{z_p}. \quad (4.97)$$

Для такого фазового співвідношення проаналізуємо 4 характерні варіанти (рис. 4.23):

- а) при $\varphi=0, \beta=0$;
- б) при $\varphi=0, \beta = \pi / 2$;
- в) при $\varphi=0, \beta = \pi$;
- г) при $\varphi=0, \beta = 3\pi / 2$.



а)



б)

Рис. 4.23. Графіки зміни за варіантом 2: а) площі модулятора S , б) швидкості осевого руху ротора v_n .

Отже, для 4 варіантів рівняння швидкості емульсії в переривнику ПА (4.85) має вигляд

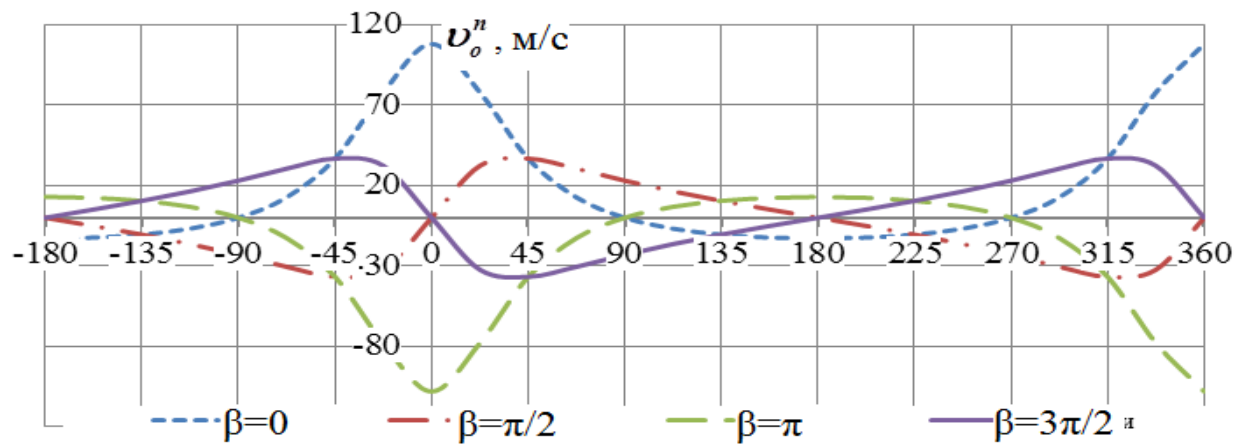
$$\text{а) } v_o = \frac{2 n_{\kappa} r D \cos \beta}{\frac{\pi D}{2z} \left(1 + \sin \left(\beta - \frac{\pi}{2} \right) \right) + 8\delta} + \frac{\pi^2 n_{\kappa} D^2}{120z^2 (l_p + \delta + l_c)} \left\{ \frac{\beta}{2\pi} \right\}. \quad (4.98)$$

$$\text{б) } v_o = \frac{2 n_{\kappa} r D \cos(\beta - \pi / 2)}{\frac{\pi D}{2z} \left(1 + \sin \left(\beta - \frac{\pi}{2} \right) \right) + 8\delta} + \frac{\pi^2 n_{\kappa} D^2}{120z^2 (l_p + \delta + l_c)} \left\{ \frac{\beta}{2\pi} \right\}. \quad (4.99)$$

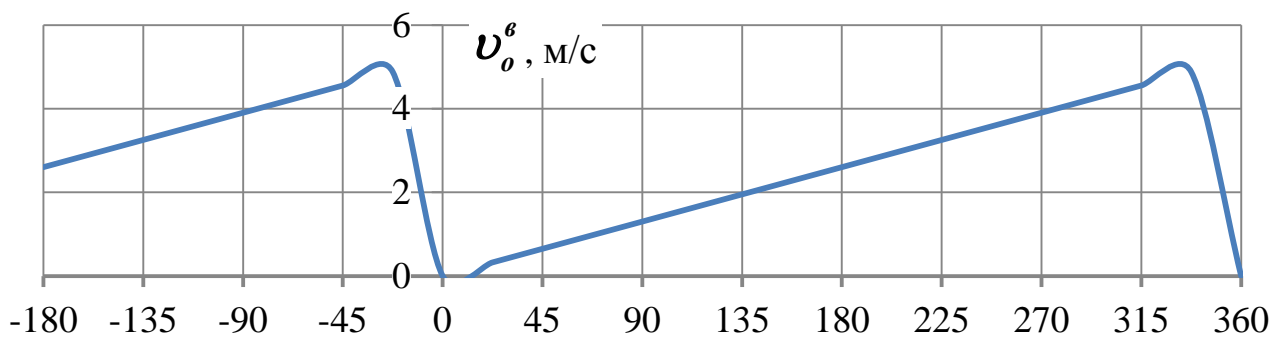
$$\text{в) } v_o = \frac{2 n_{\kappa} r D \cos(\beta - \pi)}{\frac{\pi D}{2z} \left(1 + \sin \left(\beta - \frac{\pi}{2} \right) \right) + 8\delta} + \frac{\pi^2 n_{\kappa} D^2}{120z^2 (l_p + \delta + l_c)} \left\{ \frac{\beta}{2\pi} \right\}. \quad (4.100)$$

$$\text{г) } v_o = \frac{2 n_{\kappa} r D \cos(\beta - 3\pi / 2)}{\frac{\pi D}{2z} \left(1 + \sin \left(\beta - \frac{\pi}{2} \right) \right) + 8\delta} + \frac{\pi^2 n_{\kappa} D^2}{120z^2 (l_p + \delta + l_c)} \left\{ \frac{\beta}{2\pi} \right\}. \quad (4.101)$$

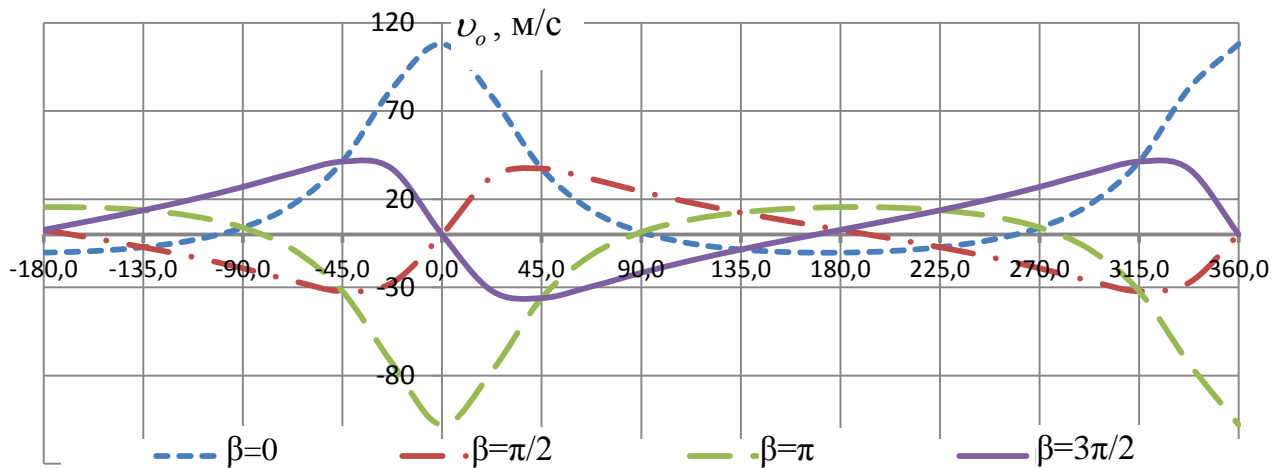
Графічно останні залежності показані на рис. 4.24.



а)



б)



в)

Рис. 4.24. Швидкості а) v_o^t , б) v_o^n і в) v_o для варіанта співвідношення частот $n_p = n_k / z_p$ для випадків $\beta=0$, $\beta=\pi/2$, $\beta=\pi$, $\beta=3\pi/2$.

Варіант 3. За 2 цикли зміни площі переривника (від S_{min} до S_{min}) ротор здійснює рух на величину амплітуди s (рис. 4.20). При цьому співвідношення між τ_1 і τ_2 має вигляд:

$$\tau_1 = 2\tau_2. \quad (4.102)$$

Після перетворень

$$\omega_p = \frac{4\omega_k}{z_p}; \quad n_p = \frac{4n_k}{z_p}. \quad (4.103)$$

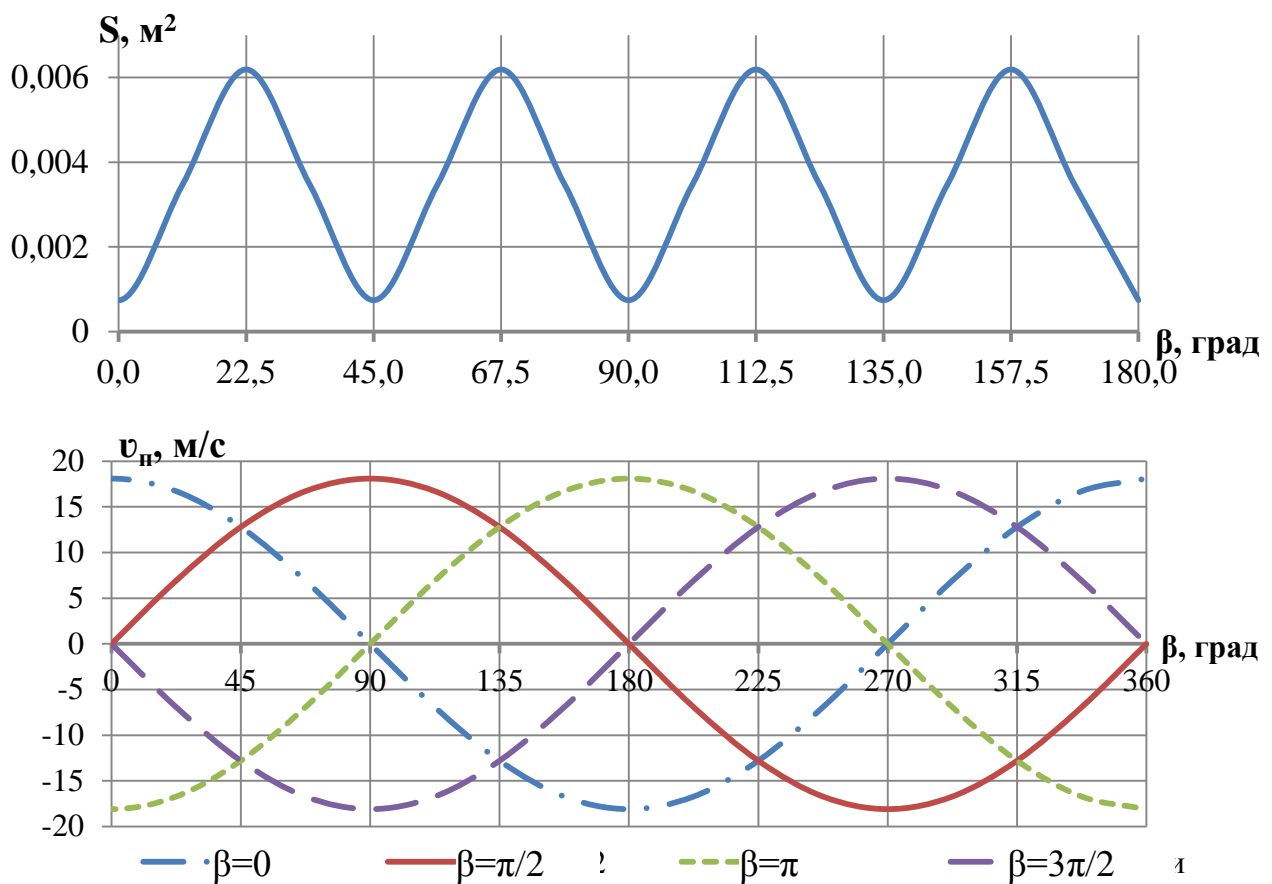
Аналогічним чином визначимо залежність між фазовими кутами β і φ ,

$$\varphi = \frac{4\beta}{z_p}. \quad (4.104)$$

Для такого фазового співвідношення проаналізуємо 4 характерні варіанти (рис 4.25):

- а) при $\varphi=0, \beta=0$; б) при $\varphi=0, \beta = \pi / 2$;
в) при $\varphi=0, \beta = \pi$; г) при $\varphi=0, \beta = 3\pi / 2$.

Отже, для 4 вищевказаних варіантів рівняння швидкості емульсії в переривнику ПА залежність (4.85) має вигляд



б)

Рис. 4.25. Графіки зміни за варіантом 3: а) площі модулятора S , б) швидкості осьового руху ротора v_n .

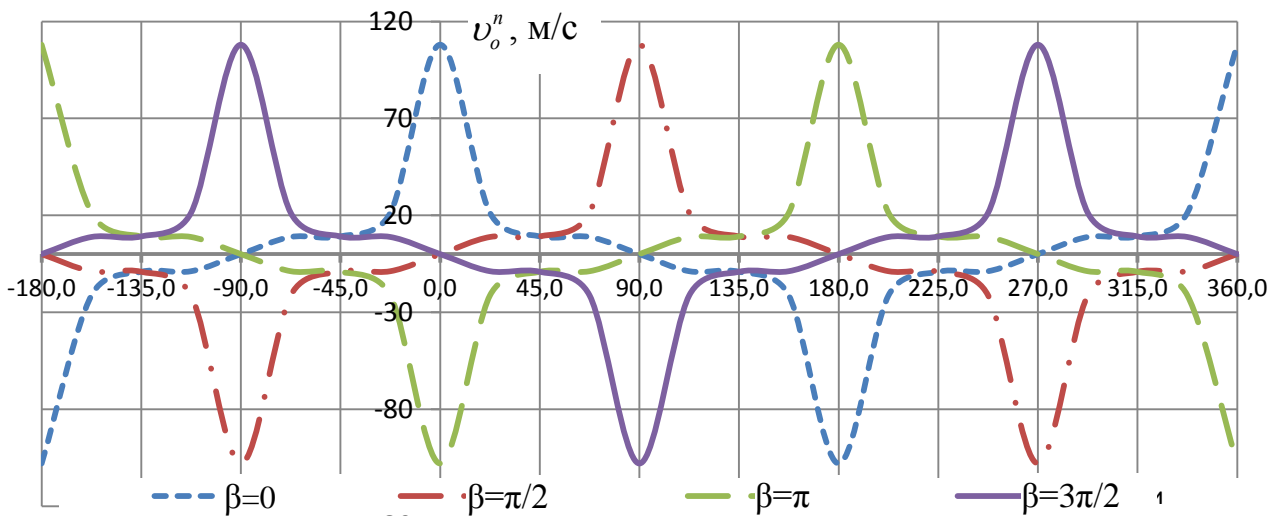
$$\text{a) } v_o = \frac{2 n_{\kappa} r D \cos \beta}{\frac{\pi D}{2z} \left(1 + \sin \left(4\beta - \frac{\pi}{2} \right) \right) + 8\delta} + \frac{\pi^2 n_{\kappa} D^2}{30z^2 (l_p + \delta + l_c)} \left\{ \frac{2\beta}{\pi} \right\}. \quad (4.105)$$

$$\text{б) } v_o = \frac{2 n_{\kappa} r D \cos(\beta - \pi / 2)}{\frac{\pi D}{2z} \left(1 + \sin \left(4\beta - \frac{\pi}{2} \right) \right) + 8\delta} + \frac{\pi^2 n_{\kappa} D^2}{30z^2 (l_p + \delta + l_c)} \left\{ \frac{2\beta}{\pi} \right\}. \quad (4.106)$$

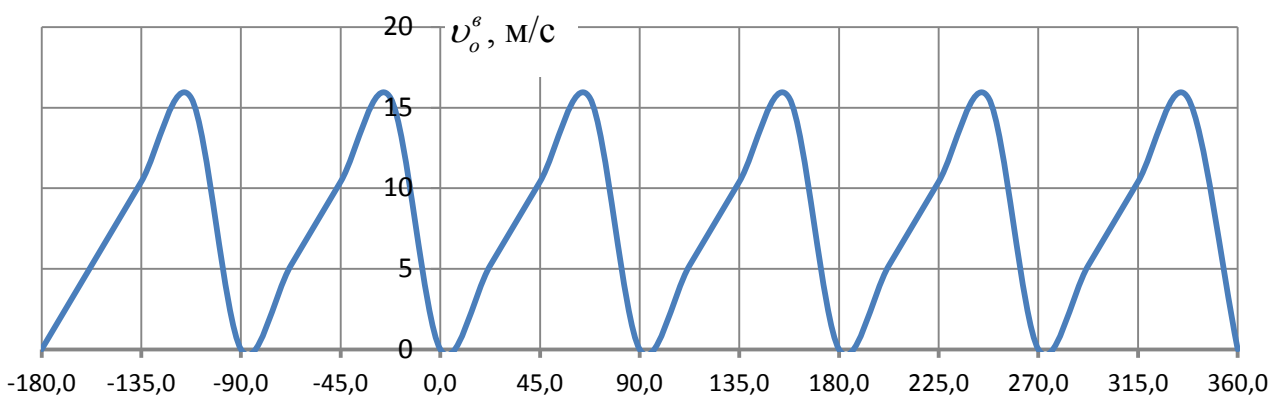
$$\text{в) } v_o = \frac{2 n_{\kappa} r D \cos(\beta - \pi)}{\frac{\pi D}{2z} \left(1 + \sin \left(4\beta - \frac{\pi}{2} \right) \right) + 8\delta} + \frac{\pi^2 n_{\kappa} D^2}{30z^2 (l_p + \delta + l_c)} \left\{ \frac{2\beta}{\pi} \right\}. \quad (4.107)$$

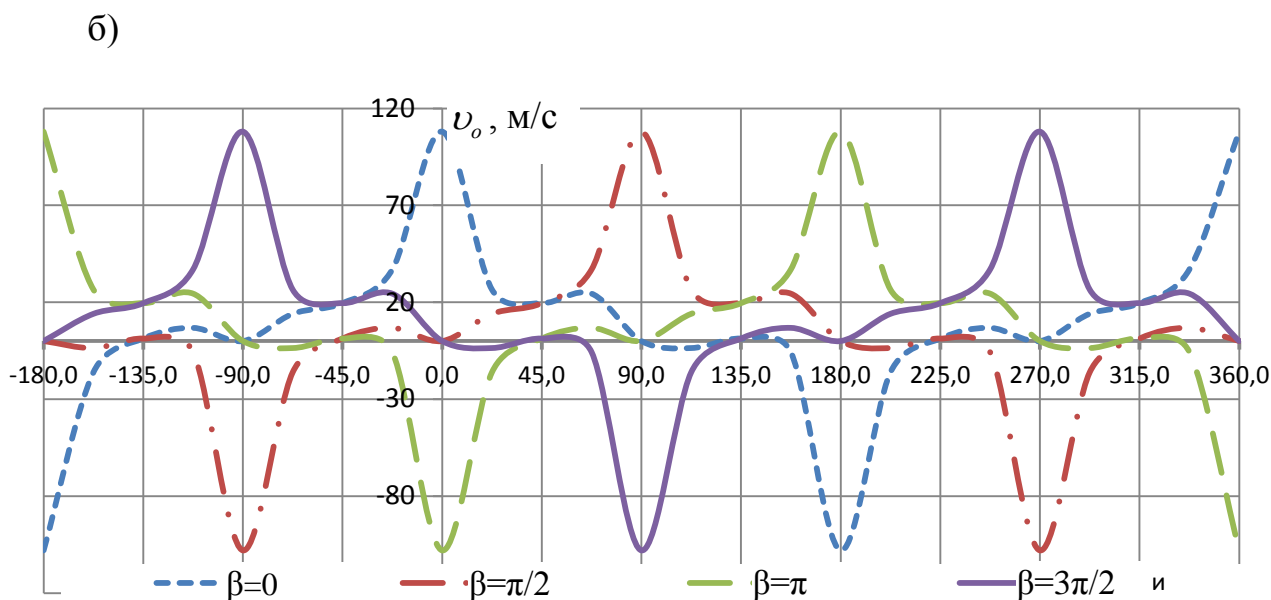
$$\text{г) } v_o = \frac{2 n_{\kappa} r D \cos(\beta - 3\pi / 2)}{\frac{\pi D}{2z} \left(1 + \sin \left(4\beta - \frac{\pi}{2} \right) \right) + 8\delta} + \frac{\pi^2 n_{\kappa} D^2}{30z^2 (l_p + \delta + l_c)} \left\{ \frac{2\beta}{\pi} \right\}. \quad (4.108)$$

Графічно останні залежності показані на рис. 4.26.



a)





в)

Рис. 4.26. Швидкості а) v_o^s , б) v_o^n і в) v_o для варіанта співвідношення частот $n_p = 4n_k / z_p$ для випадків $\beta=0$, $\beta = \pi / 2$, $\beta = \pi$, $\beta = 3\pi / 2$.

З аналізу наведених варіантів синхронізації фаз можна зробити такі висновки.

1) Зсув фаз між кутами φ і β істотно змінює характер сумарної швидкості руху рідини в переривнику ПА з ВР (v_o^n). Максимальне значення швидкості v_o сягає максимуму при $\beta=0$ і для всіх трьох випадків однакові. Зі зсувом фази β більше нуля максимальна швидкість v_o зменшується і знову сягає максимуму при $\beta = \pi$.

2) Основна частка в швидкості v_o належить швидкості v_o^n (від 60 до 90%). Це пояснюється тим, що частота обертання ротора ПА у $(z_p \dots z_p / 4)$ разів менша, ніж n_k . Для збільшення v_o (і частки швидкості v_o^n) необхідно зменшувати кількість отворів ротора z_p , тобто обирати режими, у яких φ наближуються або дорівнюють β . Тому для підвищення швидкості v_o найбільш ефективний варіант 3 ($\varphi = 4\beta / z_p$), де складова v_o^s найбільша ($n_p = \max$) і найменш ефективний варіант 2 ($\varphi = \beta / z_p$).

3) Значення швидкості в отворах модулятора ПА з ВР при співвідношенні $\varphi = 4\beta / z_p$ (а отже і режими з більшими φ) не співпадають за періодом зміни площі переривника. Умова рівності пульсацій в отворах апарата не виконується, що унеможлиблює отримання однорідної дисперсності емульсії ПА з ВР.

4) Підвищення ступеня гомогенізації забезпечують режими з максимальним прискоренням $a = dv_o / dt$, що при $\omega_p = \omega_k = const$ пропорційно $dv_o / d\beta$. Отже, необхідні режими з максимальною амплітудою коливань емульсії за найменший період часу $dv_o / d\beta \rightarrow max$. Таким вимогам відповідають 2 варіанти: $\varphi = 2\beta / z_p$ при $\beta = 0$ і при $\beta = \pi$. За величиною та характером пульсацій емульсії ці варіанти ідентичні один одному. Варіанти синхронізації фаз, при яких $\varphi < \beta / z_p$, використовувати недоцільно внаслідок зменшення $dv_o / d\beta$, а отже і ступеня диспергування.

5) Як було зазначено у розділі 1, підвищення ступеня гомогенізації можливе при створенні резонансу пульсацій швидкостей v_o^a і v_o^e . При цьому зростає амплітуда пульсації рідини в отворах переривника і збільшується сумарна швидкість v_o . Умовою резонансу є подібний характер зміни цих швидкостей [79, 107, 108, 200]. Така подібність має місце у випадку $\varphi = \beta / z_p$ при $\beta = 3\pi / 2$.

Отже, з проаналізованих варіантів оптимальним є варіант 2 г: $\varphi = \beta / z_p$, $\beta = 3\pi / 2$, який описується рівнянням (4.101).

4.2.2.4. Визначення прискорення та дисперсності емульсії

Для оптимального варіанту знайдемо миттєве прискорення a_m , для чого продиференціюємо рівняння (4.101) по t і врахуємо, що

$$dt = \frac{1}{\omega_k} d\beta.$$

$$\begin{aligned}
 a_m = \frac{dv_o}{dt} = & \frac{\pi^3 n_k^2 D^2}{3600 z^2 (l_p + \delta + l_c)} - \\
 & - \frac{\frac{\pi n_k^2 r D}{15} \sin\left(\frac{\pi n_k t}{30} - \frac{3\pi}{2}\right) \left(\frac{\pi D}{2z} \left(1 + \sin\left(\frac{\pi n_k t}{30} - \frac{\pi}{2}\right) \right) + 8\delta \right) +}{\left(\frac{\pi D}{2z} \left(1 + \sin\left(\frac{\pi n_k t}{30} - \frac{\pi}{2}\right) \right) + 8\delta \right)^2} \\
 & + \frac{n_k^2 \pi^2 r D^2}{30z} \cos\left(\frac{\pi n_k t}{30} - \frac{3\pi}{2}\right) \cos\left(\frac{\pi n_k t}{30} - \frac{\pi}{2}\right)}{\left(\frac{\pi D}{2z} \left(1 + \sin\left(\frac{\pi n_k t}{30} - \frac{\pi}{2}\right) \right) + 8\delta \right)^2}
 \end{aligned} \tag{4.109}$$

На рис. 4.27 графічно показана отримана залежність (4.109).

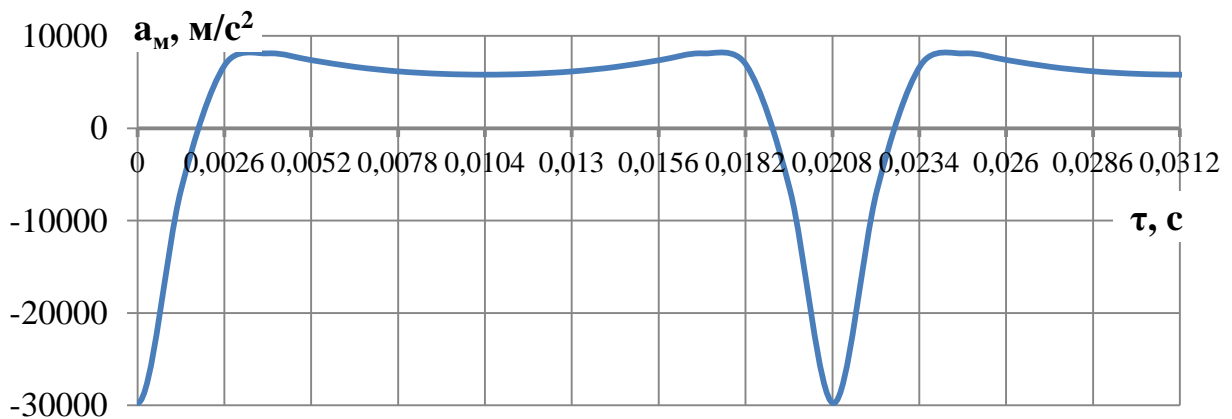


Рис. 4.27. Залежність миттєвого прискорення рідини a_m в отворах модулятора від часу τ (при $D=0,15$ м, $n_k=2880$ об/хв, $n_p=480$ об/хв, $r=1$ мм, $z=6$, $\delta=1$ мм, $l_p=0,005$ м, $l_c=0,01$ м).

Залежність миттєвого прискорення рідини в отворах модулятора (рис. 4.27) демонструє сплески прискорення, які відбуваються в моменти відкриття та закриття модулятора ПА з ВР. Згідно існуючої теорії гомогенізації, у РПА саме у моменти закривання отворів ротора у статорі апарата створюється розрідження, яке викликає руйнування жирових кульок молока за рахунок кавітації [88, 330]. Час, протягом якого істотний вплив справляють кавітаційні ефекти ($t=0,0078-0,013$ с), складає лише 25% від тривалості всього циклу закриття-відкриття переривника (0,0208с) для ПА з ВР. Для роторно-пульсаційного апарата доля тривалості кавітаційних ефектів буде подібною до

ПА з ВР. Можливо це одна з основних причин існування істотного відсотку великих жирових часток у молоці після обробки в РПА. Частина жирових кульок, проходячи крізь отвори переривника у моменти його повного відкриття, не піддається впливу кавітації, тому залишається неподрібненою.

Для ПА з ВР синхронізація коливальних і обертальних рухів ротора здійснена таким чином, щоб підтримувати значення прискорення на максимальному рівні. В середині циклу при повному відкритті отворів ($t=0,0104$ с) прискорення зменшується лише на 26%, що показує набагато більш високу рівномірність впливу на жирову фазу молока, ніж в РПА, та дозволяє прогнозувати високі показники рівномірності дисперсного складу емульсії після обробки.

Середнє прискорення a_e визначимо для умов, що відповідають $\tau=0,0026-0,0182$ с (рис. 4.27), де прискорення практично не змінюється.

$$a_e = \frac{\pi^3 n_k^2 D^2}{3600 z^2 (l_p + \delta + l_c)} + \frac{n_k^2 \pi^2 r D^2}{30z \left(\frac{\pi D}{2z} + 8\delta \right)^2}. \quad (4.110)$$

На початку та в кінці циклу закриття та відкриття отворів прискорення більше ніж в 3 рази перевищує середнє, тому в ці періоди часу ступінь подрібнення жирових кульок значно перевищує розрахований за останньою формулою.

З отриманого виразу легко побачити, що найбільший вплив на прискорення справляє частота обертання кривошипу $a_e \sim n_k^2$. Збільшення радіуса кривошипу призводить до лінійного збільшення другого доданку (рис. 4.28.).

Вище було зазначено, що впливом кількості отворів z на ν_0 без урахування синхронізації фаз можна знехтувати. Але z визначає частоту обертання ротора ($n_p = n_k / z$). Із залежності (4.110) вплив кількості отворів та діаметра ротора є неявним, тому покажемо їх графічно (рис. 4.29).

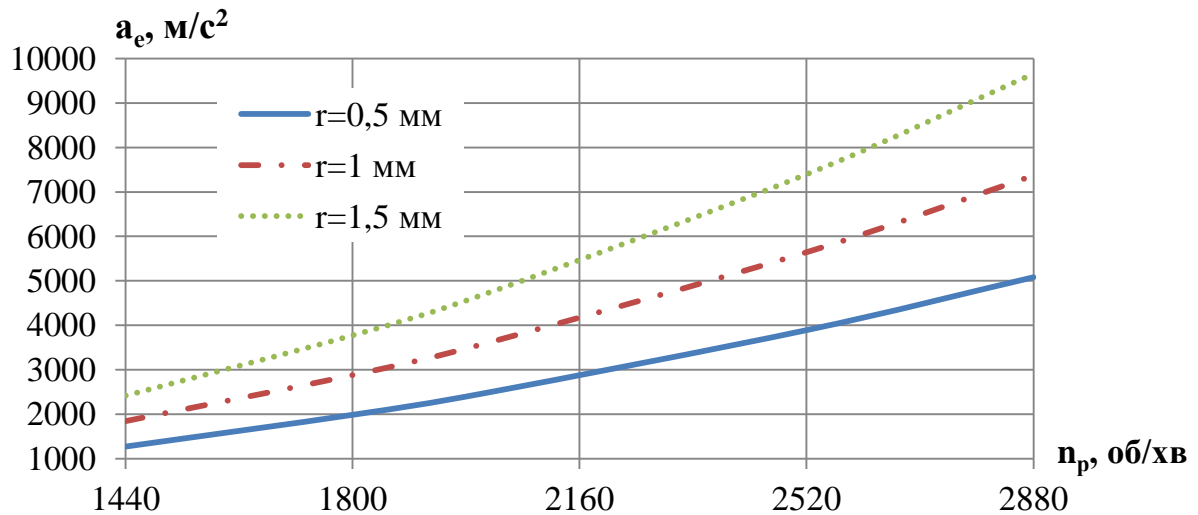


Рис. 4.28. Графік впливу частоти обертання n_p та радіуса кривошипу r на середнє прискорення a_e (при $D=0,15$ м, $z=6$, $\delta=1$ мм, $l_p=0,005$ м, $l_c=0,01$ м).

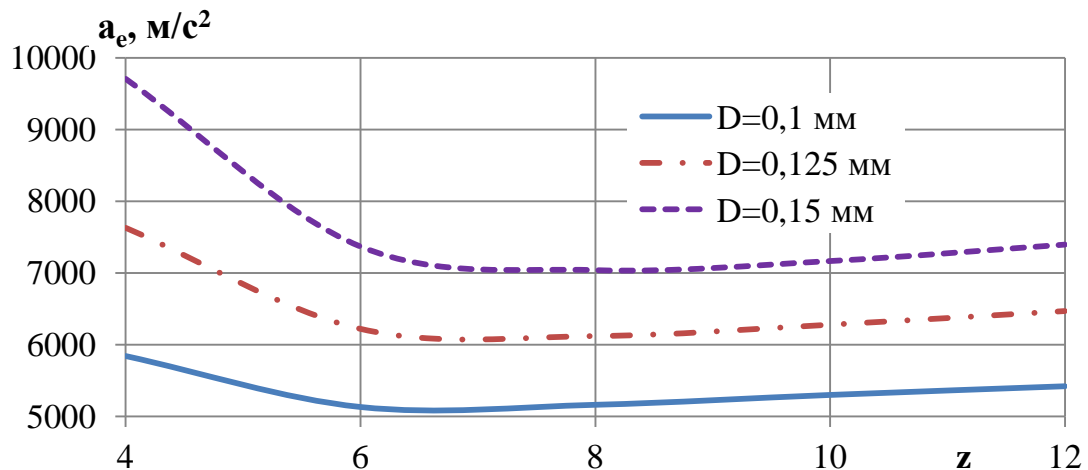


Рис. 4.29. Вплив кількості отворів z та діаметра ротора D на середнє прискорення a_e (при $n_k=2880$ об/хв, $n_p=480$ об/хв, $r=1$ мм, $\delta=1$ мм, $l_p=0,005$ м, $l_c=0,01$ м)

Графік має мінімум, який приходиться на $z=6...8$. При зменшенні кількості отворів до 4 прискорення зростає, причому темпи зростання тим істотніше, чим більше діаметр ротора. У діапазоні $z=7...12$ можна вважати, що прискорення лінійно зростає при збільшенні діаметра ротора.

Аналізуючи рівняння середнього прискорення (4.110) та графічні залежності впливу ω_p , r , D та z (рис. 4.28, 4.29) найбільший інтерес представляють мінімуми на графіку при зміні z (рис. 4.29). Результати

показують, що існують значення кількості отворів (6...10), при яких прискорення, а отже і ефективність гомогенізації ПА з ВР мінімальна. Найбільше прискорення можливо отримати при кількості отворів 4 і менше. При кількості отворів менше 4 на визначення прискорення починає суттєво впливати викривлення площини розташування отворів ротора. При великій кількості отворів, при виводі формули (4.110) вважали, що отвори переривника ПА з ВР є плоскими. Але таке припущення вже не можна вважати дійсним при $z=4$ та менше.

Конструктивні параметри ротора ПА з ВР знаходяться у тісному взаємозв'язку. Зменшення кількості отворів, для забезпечення оптимальної синхронізації фаз, спричиняє збільшення їх діаметра та ширини ротора (при незмінному діаметрі ротора), що призводить до витрати емульсії крізь переривник. Водночас при незмінній частоті обертання це викликає зменшення частоти пульсацій та підвищення часу циклу закриття-відкриття переривника. Накладання цих факторів призводить до результатів, показаних на рис. 4.29.

За результатами наших досліджень (див. підрозділ 4.1) встановлено зв'язок між прискоренням емульсії молока та середнім діаметром жирової кульки d_k , який характеризується формулою (4.12) [265]. З урахуванням формули (4.110) залежність для визначення середньої дисперсності буде мати вигляд

$$d_k = \frac{K_z}{\sqrt{\frac{\pi^3 n_k^2 D^2}{3600 z^2 (l_p + \delta + l_c)} + \frac{n_k^2 \pi^2 r D^2}{30 z \left(\frac{\pi D}{2z} + 8\delta \right)^2}}}, \quad (4.111)$$

Таким чином, максимальні умови для подрібнення жирових кульок молока створюються при $z=4$, $(n_k, r, D) \rightarrow \max$ і $\delta, l_p, l_c \rightarrow \min$. Діапазон коливання параметрів δ, l_p, l_c невеликий, тому їх вплив на a_e незначний. При резонансі амплітуда пульсацій емульсії зростає, що очікувано призведе до збільшення прискорення рідини та ступеня гомогенізації.

Коефіцієнт гомогенізації необхідно визначити експериментально. З

урахуванням багатократної обробки, високого градієнту в зазорі між ротором і статором, наявності кавітації та резонансу пульсацій очікуване значення K_2 буде меншим, ніж для клапанної гомогенізації.

Висновки за розділом 4

1. В результаті аналітичних досліджень знайдено залежності, що пов'язують прискорення руху молочної емульсії, швидкість ковзання жирової кульки (її швидкість відносно оточуючої плазми), середній діаметр жирової кульки після гідродинамічного диспергування та критерій Вебера. Отримана аналітична модель базується на визначенні прискорення руху емульсії – параметра, який легко визначити для будь-якого типу гомогенізатора, який здатен стати універсальним – об'єднуючим фактором руйнування жирових часток емульсій для більшості типів гомогенізаторів (клапанних, струминних, імпульсних, роторних, відцентрових і міксерів).

2. Введено показник – "коефіцієнт гомогенізації", що пов'язує прискорення руху емульсії з середнім діаметром жирових кульок молока, який характеризує сукупний вплив додаткових факторів процесу гомогенізації. Визначені значення цього показника: аналітичне для умов однократної обробки при відсутності додаткових гідродинамічних факторів диспергування $2,4 \cdot 10^{-3} \text{ м}^{3/2}/\text{с}$, для умов клапанної гомогенізації $1,6 \cdot 10^{-3} \text{ м}^{3/2}/\text{с}$.

3. Побудована математична модель диспергування жирової фази молока у пульсаційному гомогенізаторі з одним поршнем та пульсаційному апараті з ротором, що вібрує, яка оснований на визначенні прискорення потоку емульсії. Отримана модель пов'язує основні конструктивно-кінематичні, режимні, технологічні та енергетичні показники пульсаційних роторного і поршньового апаратів з дисперсністю жирової емульсії молока.

4. Одержано аналітичний взаємозв'язок між кратністю обробки; подачею продукту у ППГ; частотою та амплітудою коливання; діаметром, товщиною і характеристиками матеріалу поршня; діаметром, формою та кількістю отворів

поршня та прискоренням емульсії та середнім розміром жирових кульок молока після гомогенізації. Встановлено, що в ППГ при значенні коефіцієнта гомогенізації 100 можливо отримати молочну емульсію з середньою дисперсністю 0,8 мкм при амплітуді коливання поршня 6–10 мм і частоті коливань 7600–9000 хв⁻¹. Отримано раціональне значення кратності проходження емульсії крізь отвори поршня, за умови досягнення достатньої рівномірності дисперсного складу емульсії та мінімізації енерговитрат, яке становить 4–10. Розрахована ступінь зниження необхідного для диспергування молочної емульсії прискорення з підвищенням кратності обробки.

5. Розроблено безперервну математичну функцію процесу зміни площі прохідного перерізу переривника РПА для умов застосування отворів круглої форми та рівності кількості отворів ротора і статора, що значно спрощує подальший математичний опис процесу руху рідини у переривнику апарата.

6. У результаті аналітичних досліджень зміни площі переривника ПА з ВР і швидкості осьового руху ротора на основі рівняння нерозривності потоку знайдені залежності швидкості руху емульсії через переривник, що викликані відцентровим тиском при обертанні ротора та осьовими коливаннями ротора. Таке розмежування швидкостей дало змогу дослідити характер зміни кожної швидкості з часом та визначити варіанти синхронізації фаз між обертанням та осьовими коливаннями ротора, при яких характер зміни швидкостей за величиною та часом подібний.

7. Подібність характеру зміни швидкостей емульсії, викликаних коливаннями та обертанням ротора, призводить до виникнення резонансних явищ, які очікувано призведуть до збільшення амплітуди пульсацій емульсії, прискорення та збільшення дисперсності жирової фази молока. Умовами для виникнення резонансу є співвідношення між частотою обертання ротора та кривошипу $n_p = n_k / z$ та кут зсуву фаз між ними $\beta = 3\pi / 4$.

РОЗДІЛ 5

АНАЛІТИЧНЕ ВИЗНАЧЕННЯ ЕНЕРГОВИТРАТ ТА ОПТИМІЗАЦІЯ ПАРАМЕТРІВ РОТОРНОГО, ПУЛЬСАЦІЙНОГО ТА СТРУМИННОГО ГОМОГЕНІЗАТОРІВ

5.1. Енерговитрати процесу гідродинамічного диспергування жирової фази молока в роторному, пульсаційному та струминному гомогенізаторах

5.1.1. Енерговитрати струминної гомогенізації

Потужність струминного гомогенізатора з роздільною подачею жирової фази P складається з потужності насосів подачі вершків P_v та знежиреного молока P_{zn}

$$P_c = P_{zn} + P_{nv} \quad (5.1)$$

Або

$$P_c = Q_{zn} \Delta p_{zn} + Q_v \Delta p_v, \quad (5.2)$$

де Δp_{zn} , Δp_v – надлишковий тиск подачі знежиреного молока та вершків відповідно, Па.

Конструкція струминного гомогенізатора з роздільним подаванням жирової фази забезпечує можливість здійснення нормалізації молока за жирністю шляхом регулювання співвідношення подачі знежиреного молока та вершків [292]. В разі використання функції нормалізації подачі вершків та знежиреного молока пов'язані з необхідною жирністю нормалізованого продукту співвідношенням [190]

$$\frac{Q_{н.м}}{J_v - J_{zn}} = \frac{Q_v}{J_{н.м} - J_{zn}} = \frac{Q_{zn}}{J_v - J_{н.м}}, \quad (5.3)$$

де $Q_{н.м}$, Q_v – подача нормалізованого за жирністю молока та вершків, м³/с;

$J_{н.м}$, J_{zn} , J_v – жирність відповідно нормалізованого, знежиреного молока та вершків, %.

З урахуванням співвідношення (5.3) між подачею вершків і знежиреного молока останню формулу можна представити у вигляді

$$P_c = Q_{zn} \left(\Delta p_{zn} + \frac{(J_{н.м} - J_{zn})}{J_в - J_{н.м}} \Delta p_в \right). \quad (5.4)$$

Надлишковий тиск рідини пов'язаний зі швидкістю рідини співвідношенням [287]

$$\Delta p_{zn} = \frac{v_{zn}^2 \rho_{zn}}{2\varphi_k^2}, \quad (5.5)$$

де ρ_{zn} – густина знежиреного молока, кг/м³;

φ_k – коефіцієнт швидкості для центральної частини камери гомогенізатора.

$$\Delta p_в = \frac{v_в^2 \rho_в}{2\varphi_в^2}, \quad (5.6)$$

де $\rho_в$ – густина молочних вершків, кг/м³;

$\varphi_в$ – коефіцієнт швидкості для каналу подачі вершків.

Виражаючи швидкість потоку через подачу та площу перетину робочої камери СГРЖФ, маємо

$$\Delta p_{zn} = \frac{Q_{zn}^2 \rho_{zn}}{2s_k^2 \mu_k^2}, \quad (5.7)$$

$$\Delta p_в = \frac{8Q_в^2 \rho_в}{N_k^2 \pi^2 d^4 \mu_в^2}. \quad (5.8)$$

Подачу вершків в залежності від швидкості вершків можна визначити як

$$Q_в = \frac{N_k \pi d_в^2}{4} v_в, \quad (5.9)$$

Звідки потужність на подачу вершків буде дорівнювати

$$P_{нв} = \frac{v_в^3 N_k \pi d_в^2 \rho_в}{8\varphi_в^2}. \quad (5.10)$$

З урахуванням формул (5.7) і (5.8) вираз для визначення потужності (5.2) перетворюється до виду

$$P_c = \frac{Q_{3H}^3 \rho_{3H}}{2s_K^2 \mu_K^2} + \frac{8Q_6^3 \rho_6}{N_K^2 \pi^2 d^4 \mu_6^2}, \quad (5.11)$$

Або з урахуванням (5.4)

$$P_c = Q_{3H}^3 \left(\frac{\rho_{3H}}{2s_K^2 \mu_K^2} + \left(\frac{Ж_{н.м} - Ж_{3H}}{Ж_6 - Ж_{н.м}} \right)^2 \frac{8\rho_6}{N_K^2 \pi^2 d^4 \mu_6^2} \right), \quad (5.12)$$

Залежність потужності СГРЖФ від подачі знежиреного молока має гіперболічний характер (рис. 5.1). Потужність насоса подачі вершків в істотній мірі залежить від діаметра каналу вершків і кількості таких каналів. На графіку (рис. 5.1) потужність $P_{нв}$ в 5,5–5,7 разів більше за P_{3H} . Але при зменшенні діаметра каналу вершків з 0,8 до 0,6 мм значення P_6 в 17–18 разів перевищує значення P_{3H} .

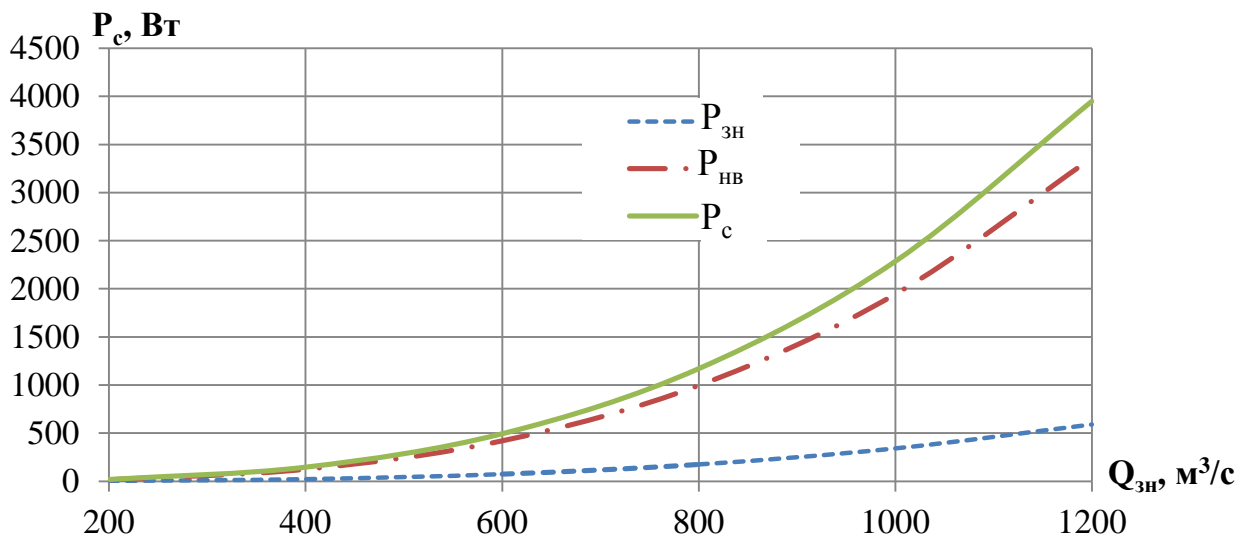


Рис. 5.1. Залежність потужності насоса знежиреного молока, вершків та їх сумарної потужності P_{3H} , $P_{нв}$, P_c від подачі знежиреного молока Q_{3H} (при $s=6$ мм², $d_6=0,8$ мм, $N_K=1$, $\mu_K=0,95$, $\mu_6=0,5$, $Ж_в=30\%$, $Ж_{н.м}=3\%$)

В той же час при використанні трьох каналів подачі вершків значення $P_{нв}$ стає в 1,5–1,6 разів меншим за P_{3H} . Таким чином суттєвим засобом зниження сумарних енерговитрат є підтримання значення потужності подачі вершків близьким (або нижчим) за потужність подачі знежиреного молока

$$\left(\frac{Ж_{н.м} - Ж_{зн}}{Ж_г - Ж_{н.м}} \right)^2 \frac{8\rho_г}{N_k^2 \pi^2 d^4 \mu_г^2} \leq \frac{\rho_{зн}}{2a^2 h^2 \mu_k^2}. \quad (5.13)$$

При $N_k=1$, $\mu_k=0,95$, $\mu_г=0,5$, $Ж_в=30\%$, $Ж_{н.м}=3,5\%$, $\rho_г=960$ кг/м³, $\rho_{зн}=1035$ кг/м³ формула (5.13) набуває вигляду

$$\frac{a h}{N_k d^2} \leq 3,3. \quad (5.14)$$

Формулу (5.14) можна використовувати для орієнтовного визначення співвідношення між розмірами внутрішнього перерізу камери та діаметром і кількістю каналів подачі вершків при жирності вершків 30%.

Визначення продуктивності струминного гомогенізатора. Для струминного гомогенізатора подача $Q_г$ визначається сумою подачі знежиреного молока та вершків

$$Q_г = Q_г + Q_{зн}, \quad (5.15)$$

Значення подачі знежиреного молока та вершків при використанні насосів об'ємної дії буде дорівнювати подачі відповідних насосів.

Жирову фазу, що подається через відповідний канал подачі, розглядали як відкриту для зовнішніх впливів систему рухомих та взаємодіючих жирових крапель та суцільного середовища. Витрати крізь канал подавання жирової фази можна розглядати як витрати крізь дросель. Швидкість жирової фази при входженні у струмінь знежиреного молока визначали як

$$v_г = \frac{4Q_г}{\pi d_г^2}, \quad (5.16)$$

де $\mu_г$ – коефіцієнт витрат для каналу подачі вершків;

d – діаметр каналу подачі жирової фази (вершків), м.

Необхідний діаметр каналу подавання жирової фази може бути забезпечений не одним, а декількома отворами технологічно зручних діаметрів. До того ж, в цьому випадку буде відбуватись більш рівномірний вплив потоку знежиреного молока на струмінь вершків. Для випадку використання декількох каналів формула (5.16) набуває вигляду

$$v_6 = \frac{4Q_6}{N_K \pi d_6^2}, \quad (5.17)$$

де N – кількість каналів подачі жирової фази.

Враховуючи, що

$$Q_{н.м} = Q_2 \quad (5.18)$$

подачу гомогенізатора можна виразити через подачу знежиреного молока

$$Q_{н.м} = Q_{зж} \left(\frac{Ж_6 - Ж_{зж}}{Ж_6 - Ж_{н.м}} \right), \quad (5.19)$$

або через подачу вершків

$$Q_{н.м} = \frac{Q_6 (Ж_6 - Ж_{зж})}{Ж_{н.м} - Ж_{зж}}. \quad (5.20)$$

$Q_{зж}$ та Q_6 при використанні нормалізації за жирністю пов'язані співвідношенням (5.3). В цьому випадку, враховуючи формули (5.17) і (5.19), отримаємо вираз, який пов'язує параметри СГРЖФ

$$\frac{N_K \pi d_6^2 v_6}{4} = v_{зж} S_K \frac{(Ж_{н.м} - Ж_{зж})}{Ж_6 - Ж_{н.м}}. \quad (5.21)$$

З останньої формули слідує, що зменшуючи діаметр каналу вершків необхідно збільшувати швидкість подачі вершків і (або) подавати вершки більшої жирності. Вираз (5.21) необхідно враховувати при підборі оптимальних значень каналу подачі та жирності вершків.

Питомі енерговитрати струминного гомогенізатора, Дж/кг визначаються з формули

$$E_{нит} = \frac{P_c}{Q_2 \rho_m}. \quad (5.22)$$

Або

$$E_{нит} = \frac{Q_{зж} \Delta p_{зж} + Q_6 \Delta p_6}{(Q_6 + Q_{зж}) \rho_m}. \quad (5.23)$$

З урахуванням формул (5.3), (5.7) і (5.8) формула (5.23) набуває вигляду

$$E_{\text{пит}} = \frac{Q_{\text{зн}}^2 \left(\frac{\rho_{\text{зн}}}{2s_{\text{к}}^2 \mu_{\text{к}}^2} + \left(\frac{Ж_{\text{н..м}} - Ж_{\text{зн}}}{Ж_{\text{в}} - Ж_{\text{н..м}}} \right)^2 \frac{8\rho_{\text{в}}}{N_{\text{к}}^2 \pi^2 d_{\text{в}}^4 \mu_{\text{в}}^2} \right)}{\left(\frac{Ж_{\text{в}} - Ж_{\text{зн}}}{Ж_{\text{в}} - Ж_{\text{н..м}}} \right) \rho_{\text{м}}}. \quad (5.24)$$

При підвищенні $\varphi_{\text{к}}$ на 0,1 питомі енерговитрати зменшуються на 13–15% (рис. 5.2) внаслідок зменшення втрат тиску при русі рідкого середовища в звуженні робочої камери.

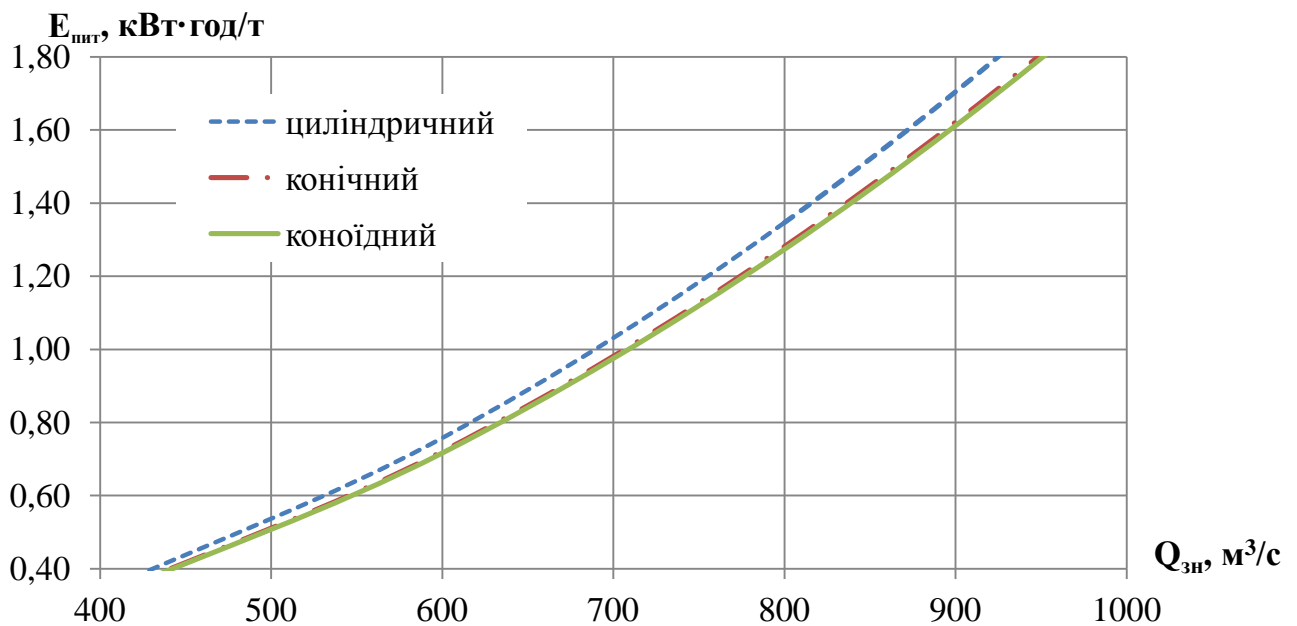


Рис. 5.2. Залежність питомих енерговитрат $E_{\text{пит}}$ СГРЖФ від подачі знежиреного молока $Q_{\text{зн}}$ для типових форм внутрішньої поверхні камери (при $s=6$ мм², $d_{\text{в}}=0,8$ мм, $N_{\text{к}}=1$, $\mu_{\text{в}}=0,5$, $\mu_{\text{к}}=0,95$, $Ж_{\text{в}}=30\%$, $Ж_{\text{н..м}}=3\%$)

При збільшенні необхідної жирності молока після гомогенізації питомі енерговитрати зростають (рис. 5.3), що пояснюється збільшенням необхідної швидкості (і надлишкового тиску) подачі вершків. Звертає на себе увагу надмірне підвищення питомих енерговитрат при жирності вершків менше 20–30%, яке є наслідком підвищення тиску необхідного для проходження крізь канал подачі вершків діаметром 0,8 мм для забезпечення заданої жирності молока. Тому для жирності гомогенізованого молока 3,2–3,5% і використанні одного каналу подачі вершків, жирність вершків не повинна бути менше 30–

35%. При дотриманні цієї вимоги питомі енерговитрати СГРЖФ не перевищують 1,5 кВт·год/т.

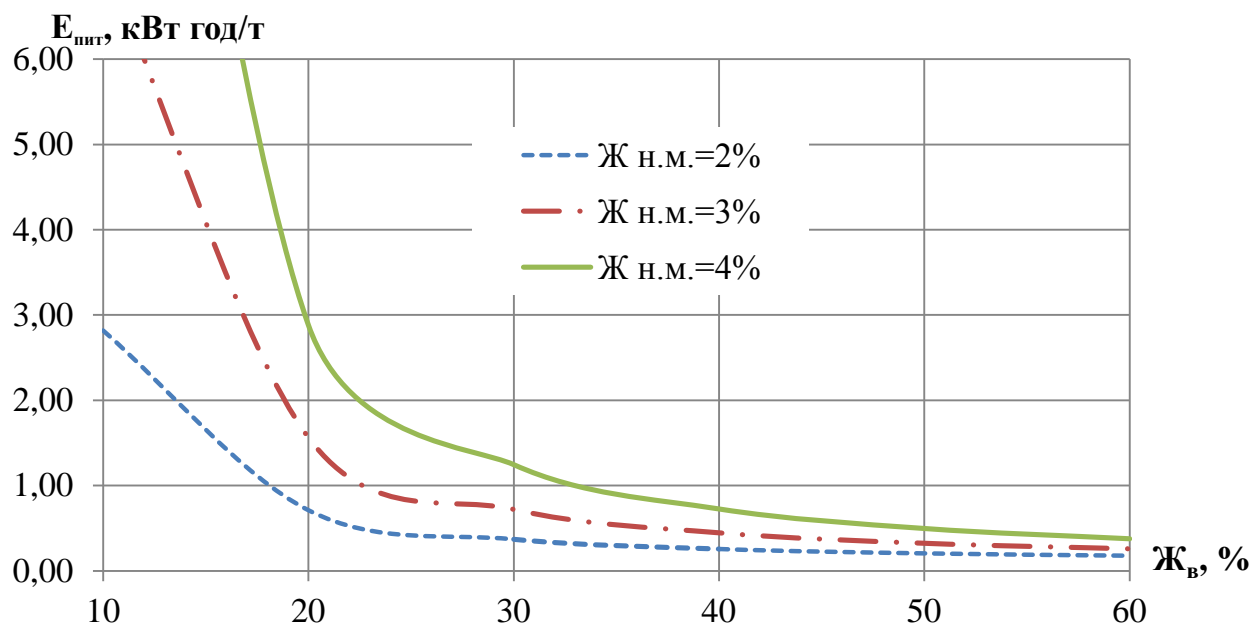


Рис. 5.3. Залежність питомих енерговитрат від жирності вершків та нормалізованого молока (при $Q_{zn}=1000$ л/год, $s_k=6$ мм², $d_g=0,8$ мм, $N_k=1$, $\mu_g=0,5$, $\mu_k=0,95$).

При збільшенні s_k питомі енерговитрати СГРЖФ знижуються (рис. 5.4), що відбувається внаслідок зниження швидкості (і необхідного тиску) для подачі знежиреного молока.

Надмірне підвищення $E_{нмт}$ відбувається при розмірах перерізу камери менше 6 мм² внаслідок підвищення необхідного тиску знежиреного молока для забезпечення необхідної продуктивності гомогенізатора. Тому внутрішні розміри камери СГРЖФ у найбільшому звуженні повинні бути більше 6 мм².

Взагалі, для зменшення питомих енерговитрат процесу диспергування жирової фази молока в СГРЖФ необхідно виконання умов [145]

$$\begin{aligned} & (s_k, \mu_k, \mu_g, N_k, d, J_v) \rightarrow \max; \\ & (Q_{zn}, J_{н.м.}) \rightarrow \min. \end{aligned} \quad (5.25)$$

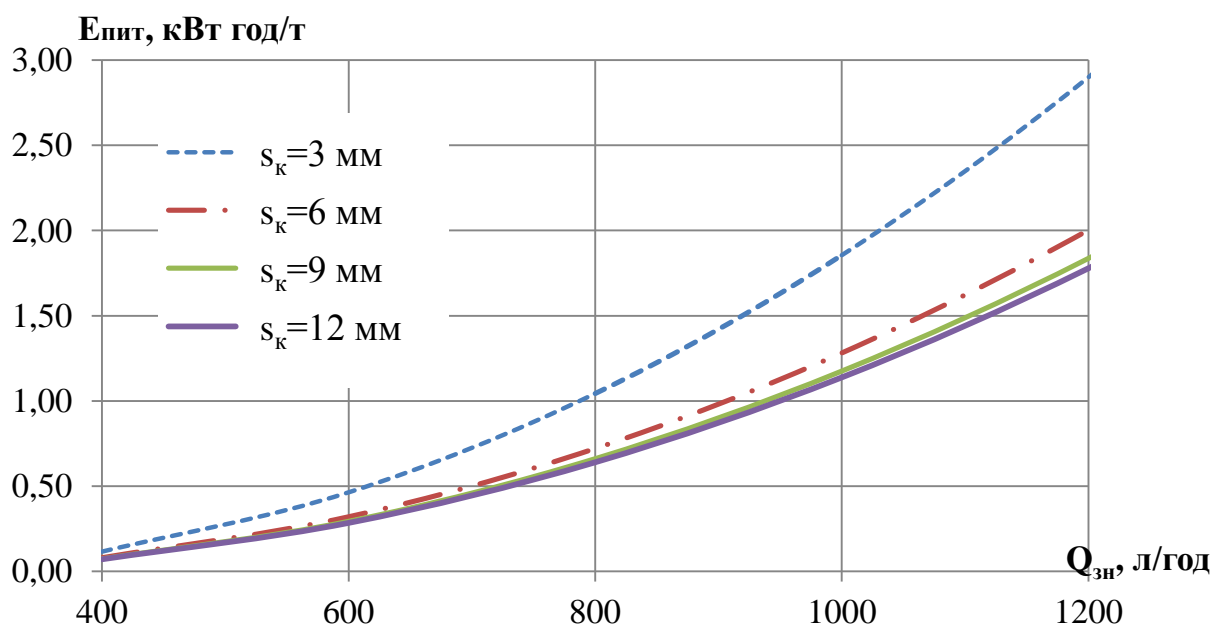


Рис. 5.4. Залежність питомих енерговитрат СГРЖФ $E_{пит}$ від подачі знежиреного молока $Q_{зн}$ і внутрішнього перерізу камери гомогенізатора (при $d_6=0,8$ мм, $N_k=1$, $\mu_6=0,5$, $\mu_k=0,95$, $\mathcal{J}_B=30\%$, $\mathcal{J}_{н.м}=3\%$)

Таким чином, для забезпечення питомих енерговитрат на рівні 1,2–1,5 кВт·год/т, що порівняно з найбільш енергоефективними сучасними гомогенізаторами, необхідно витримувати внутрішні розміри камери гомогенізації більше 6 мм^2 , жирність вершків не повинна бути менше 30–35% при використанні одного каналу для вершків. Суттєво знижують питомі енерговитрати СГРЖФ збільшення кількості каналів подачі жирової фази: в 2,8–3 рази при двократному збільшенні їх кількості. В разі використання 2 і більше каналів подачі вершків можливо подавати вершки жирністю менше 30%.

5.1.2. Енерговитрати пульсаційної гомогенізації

Для роботи ППГ необхідно надати поршню коливальних рухів за допомогою кривошипного привода та електродвигуна. Потужність, що витрачається на коливальні рухи поршня P (рис. 4.8), можна представити у вигляді трьох складових [150, 182, 228, 276]:

P_i – потужності, що витрачається на подолання сил інерції, що виникають під час зворотньо–поступального руху поршня і штока;

P_{op} – потужності, що витрачається на подолання опору поршня під час руху в робочому середовищі апарата;

P_v – потужності, що витрачається на надання кінетичної енергії пульсуючій в отворах ПГ рідини.

$$P = P_i + P_{op} + P_v. \quad (5.26)$$

Потужність P робочого органа ППГ пов'язана з його силою опору F співвідношенням

$$P = F \frac{dy}{d\tau}, \quad (5.27)$$

де y – осьове переміщення поршня під час вібрації, м (рис. 4.8);

Силу опору знайдемо як суму сил інерції та опору середовища:

$$F = F_i + F_{op}. \quad (5.28)$$

Сила інерції вібруючого поршня F_i визначається як

$$F_i = m \frac{d^2 y}{d\tau^2}, \quad (5.29)$$

де m – маса рухомих частин апарата (поршня і кривошипно-шатунного механізму), кг.

Сила опору поршня під час руху в робочому середовищі апарата F_{op} буде дорівнювати

$$F_{op} = \frac{S}{2} \rho_m C \left(\frac{dy}{d\tau} \right)^2, \quad (5.30)$$

де S – площа поршня, м²;

C – коефіцієнт лобового опору. Для круглого диска, що рухається перпендикулярно рідині, $C=1,12$.

$$S = \frac{\pi D_n^2}{4}. \quad (5.31)$$

Похідні за часом (швидкість і прискорення) можна зайти з таких відомих залежностей:

$$y = r(1 - \cos \alpha); \quad (5.32)$$

$$\alpha = 2\pi n\tau, \quad (5.33)$$

де n – частота обертання кривошипа, об/с.

Шляхом диференціювання визначаємо

$$\frac{dy}{d\tau} = 2\pi n r \sin \alpha. \quad (5.34)$$

$$\frac{d^2 y}{d\tau^2} = 4\pi^2 n^2 r \cos \alpha. \quad (5.35)$$

З урахуванням виразу (5.35) формула (5.29) набуває вигляду:

$$F_i = 4m\pi^2 n^2 r \cos \alpha, \quad (5.36)$$

$$F_{op} = \frac{S}{2} \rho_m C (2\pi n r \sin \alpha)^2 = 2S \rho_m C \pi^2 n^2 r^2 \sin^2 \alpha. \quad (5.37)$$

Ураховуючи, що $s = 2r$, сила опору при осьовому переміщенні поршня дорівнює

$$\begin{aligned} F &= 4m\pi^2 n^2 r \cos \alpha + 2S \rho_m C \pi^2 n^2 r^2 \sin^2 \alpha = \\ &= 2\pi^2 n^2 r (2m \cos \alpha + CS \rho_m r \sin^2 \alpha). \end{aligned} \quad (5.38)$$

Рівняння миттєвого значення потужності, необхідної для руху поршня, мають такий вигляд:

$$P_i + P_{op} = 4\pi^3 n^3 r^2 \sin \alpha (2m \cos \alpha + CS \rho_m r \sin^2 \alpha), \quad (5.39)$$

або

$$P_i + P_{op} = \pi^3 n^3 r^2 \sin \alpha (8m \cos \alpha + C\pi D^2 \rho_m r \sin^2 \alpha), \quad (5.40)$$

$$P_i + P_{op} = \pi^3 n^3 r^2 (4m \sin 2\alpha + C\pi D^2 \rho_m r \sin^3 \alpha). \quad (5.41)$$

Максимального значення $P_i + P_{op}$ досягає при $\alpha=45^\circ$ і дорівнює

$$P_i + P_{op} = 4\pi^3 n^3 r^2 (m + 0,35CS \rho_m r), \quad (5.42)$$

або

$$P_i + P_{op} = \pi^3 n^3 r^2 (4m + 0,35CD^2 \rho_m r). \quad (5.43)$$

Миттєву потужність P_v , що витрачається для надання кінетичної енергії пульсуючій в отворах рідини можна знайти з формули [276]:

$$P_v = \frac{\rho_m Q_o v_o^2}{2}, \quad (5.44)$$

$$P_v = \frac{\rho_m \pi^3 D_n^2 r^2 n^2}{2 K_o} \sin^2 \alpha. \quad (5.45)$$

Середня потужність для надання кінетичної енергії пульсуючій рідині обчислюється таким чином:

$$P_v = \frac{\rho_m Q_c v_c^2}{2}, \quad (5.46)$$

де Q_c – середня витрата рідини крізь отвори поршня, м³/с;

v_c^2 – середня швидкість рідини в отворах поршня, м/с.

$$Q_c = Vn, \quad (5.47)$$

де V – об'єм рідини, що проходить крізь отвори поршня, м³.

Ураховуючи, що

$$V = 2 \frac{\pi D_n^2}{4} s, \quad (5.48)$$

$$a \quad v_c = \frac{Q_c}{N \frac{\pi d_o^2}{4}} = \frac{4Q_c}{\pi K_o D_n^2}, \quad (5.49)$$

отримаємо

$$P_v = \frac{8\pi\rho_m D_n^2 r^3 n^3}{K_o^2}. \quad (5.50)$$

Таким чином з урахуванням виразів (5.47) і (5.41) формула сумарної миттєвої потужності (5.26) буде мати такий вигляд

$$P = \pi^3 n^3 r^2 \left(4m \sin 2\alpha + C\pi D^2 \rho_m r \sin^3 \alpha \right) + \frac{\rho_m \pi^3 D^2 r^2 n^2}{2 K_o} \sin^2 \alpha, \quad (5.51)$$

Якщо виразити масу рухомих частин через діаметр поршня, то

$$m = m_n + m_i, \quad (5.52)$$

де m_n – маса поршня, кг;

m_i – маса штока та кривошипа, кг;

Виходячи з конструктивних параметрів апарата, можна прийняти

$$m = 2m_n. \quad (5.53)$$

Виражаючи масу поршня через його об'єм, знаходимо

$$m_n = \frac{\pi D_n^2}{4} h_n \rho_n, \quad (5.54)$$

де h_n – товщина поршня, м;

ρ_n – щільність матеріалу поршня, кг/м³.

Отже, маса рухомих частин

$$m = 0,5\pi D_n^2 h_n \rho_n. \quad (5.55)$$

Таким чином, формули для визначення складових миттєвої потужності пульсаційного гомогенізатора мають такий вигляд:

$$P_i = \pi^3 n^3 s^2 m \sin 2\alpha, \quad (5.56)$$

або

$$P_i = \frac{1}{2} \pi^4 n^3 s^2 D_n^2 h_n \rho_n \sin 2\alpha, \quad (5.57)$$

$$P_{op} = \frac{1}{8} \pi^3 n^3 s^3 C \pi D_n^2 \rho_m \sin^3 \alpha, \quad (5.58)$$

$$P_v = \frac{\rho_m \pi^3 D_n^2 s^2 n^2}{8K_o} \sin^2 \alpha. \quad (5.59)$$

Найбільший внесок у сумарну потужність належить потужності на подолання сил інерції (рис. 5.5), а найменший – потужності для надання енергії рідині, що пульсує в отворах поршня. Для зниження енерговитрат необхідно зменшувати масу рухомих частин пульсаційного апарата шляхом виготовлення їх із матеріалів із низькою щільністю (харчових пластмас).

При виводі формул (5.54–5.59) не врахована наявність отворів у поршні ППГ, тому для коригування значень потужності введемо показник $(1-K_o)$, який враховує [302]:

– зменшення маси поршня зі збільшенням кількості і розмірів отворів, внаслідок чого зменшується потужність сил інерції P_i ;

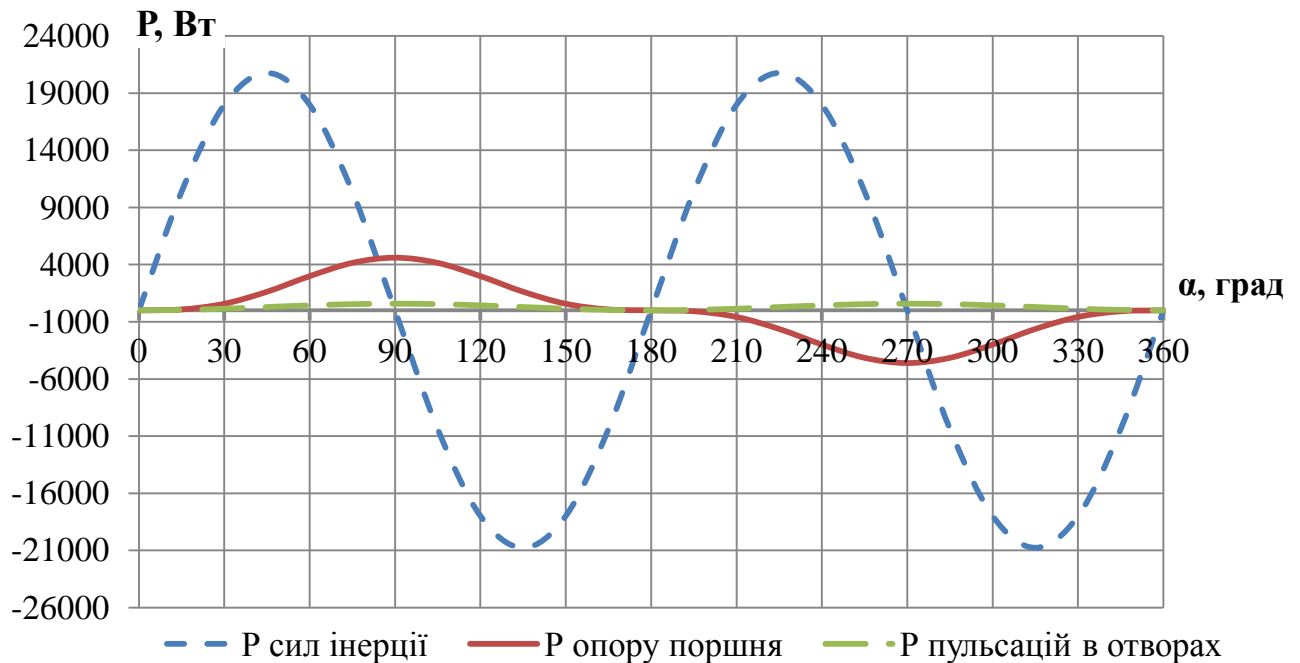


Рис. 5.5. Залежність складових миттєвої потужності пульсаційного гомогенізатора P_i, P_{op}, P_v від кута обертання кривошипа α ($s = 30$ мм, $h = 5$ мм, $D = 60$ мм, $K_o = 0,5$).

– зменшення опору зі збільшенням кількості і розмірів отворів, внаслідок чого зменшується потужність сил на подолання опору руху поршня у продукті P_{op} ;

– зменшення швидкості в отворах поршня, внаслідок чого зменшується потужність на надання кінетичної енергії пульсуючій в отворах ППГ рідини P_v .

Скоригована формула для визначення сумарної миттєвої потужності ППГ має вигляд

$$P = \pi^3 (1 - K_o) D^2 n^2 s^2 \sin \alpha \left(\pi n \left(h_n \rho_n \cos \alpha + \frac{1}{8} C \rho_m s \sin^2 \alpha \right) + \frac{\rho_m}{8 K_o} \sin \alpha \right). \quad (5.60)$$

Сумарна потужність складається з трьох складових, вплив яких нерівномірно змінюється під час обертання кривошипного механізму, тому графік сумарної потужності (рис. 5.6) є несиметричним. У разі підвищення частоти обертання на 20–25% потужність, що споживається гомогенізатором, підвищується більше ніж у 2 рази.

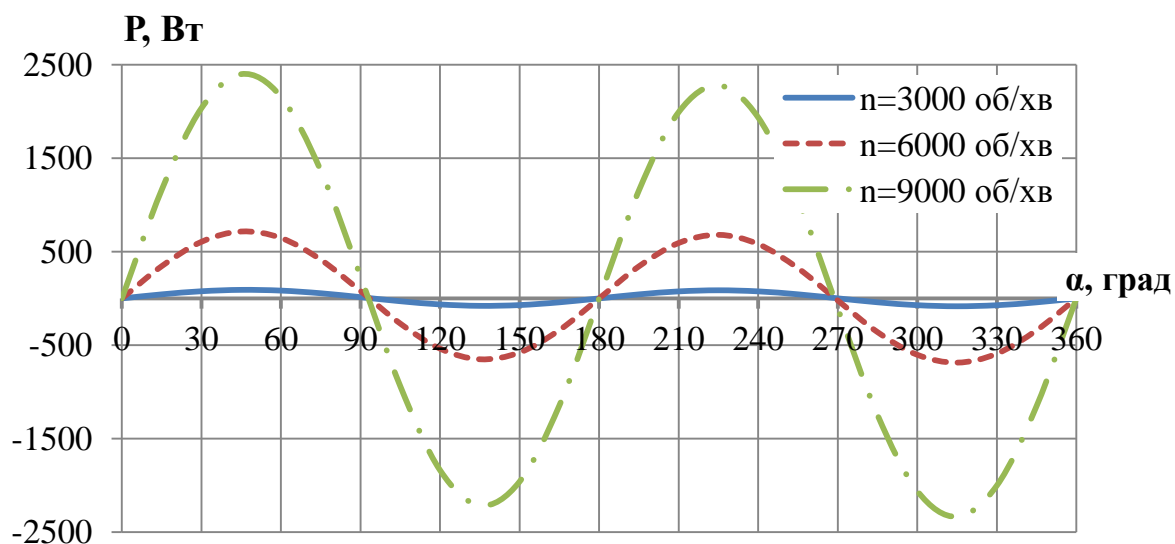


Рис. 5.6. Графік залежності сумарної миттєвої потужності пульсаційного гомогенізатора P від кута обертання кривошипу α та частоти коливань поршня n (при $s = 10$ мм, $h = 5$ мм, $D_n = 60$ мм, $K_o = 0,5$).

При зміні s несиметричність графіку потужності збільшується (рис. 5.7). Максимальні значення потужності:

- (при $s=30$ мм) 7,0 кВт при $\alpha=45^\circ$ і 5,9 кВт при $\alpha=223^\circ$;
- (при $s=10$ мм) 0,9 кВт при $\alpha=45^\circ$ і 0,8 кВт при $\alpha=223^\circ$;

Різниця між піковими значеннями потужності сягає 9,5% при $s = 30$ мм, і 5,5 % при $s = 10$ мм.

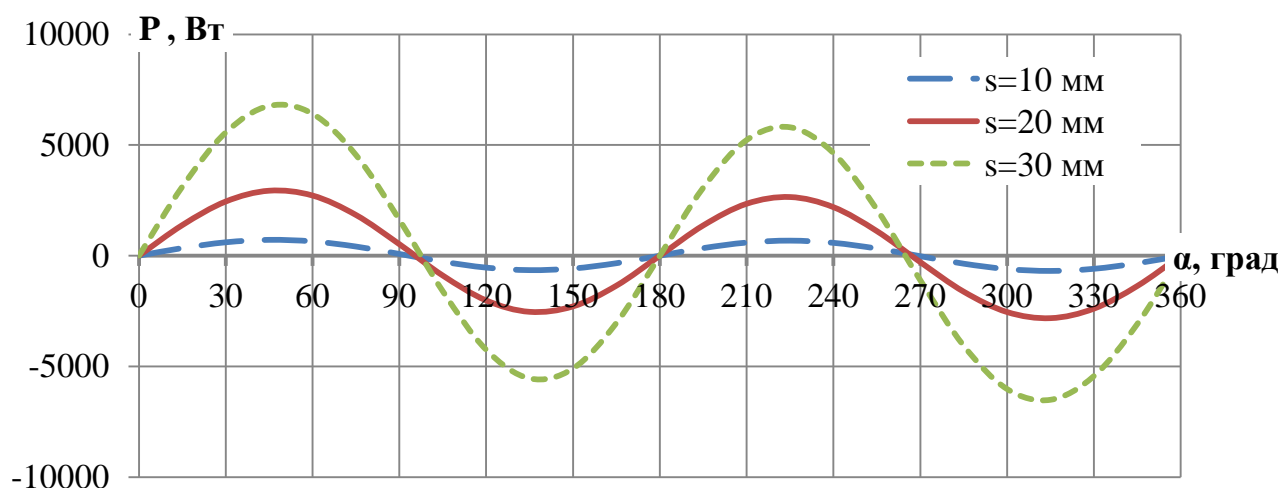


Рис. 5.7. Графік залежності миттєвої потужності пульсаційного гомогенізатора P від кута обертання кривошипу α й амплітуди коливання поршня s (при $n = 6000$ хв $^{-1}$, $h = 5$ мм, $D_n = 60$ мм, $K_o = 0,5$).

Більшість асинхронних електродвигунів, що використовуються для приводу машин харчової промисловості, передбачають короткочасне перевантаження 10–15%, тому розрахункова потужність для вибору електродвигуна приводу пульсаційного гомогенізатора буде визначатися з виразу (при $\alpha = 70^\circ$)

$$P = \pi^3 (1 - K_o) D_n^2 n^2 s^2 \left(\pi n (0,32 h_n \rho_n + 0,1 C \rho_m s) + 0,11 \frac{\rho_m}{K_o} \right). \quad (5.61)$$

Зростання потужності пульсаційного гомогенізатора в разі збільшення радіуса кривошипа (амплітуди пульсацій) майже лінійне (рис. 5.8) при параболічній залежності потужності від частоти обертання кривошипа (частоти пульсацій). При $n = 9000$ об/хв і $s = 10$ мм потужність дорівнює 1,8 кВт.

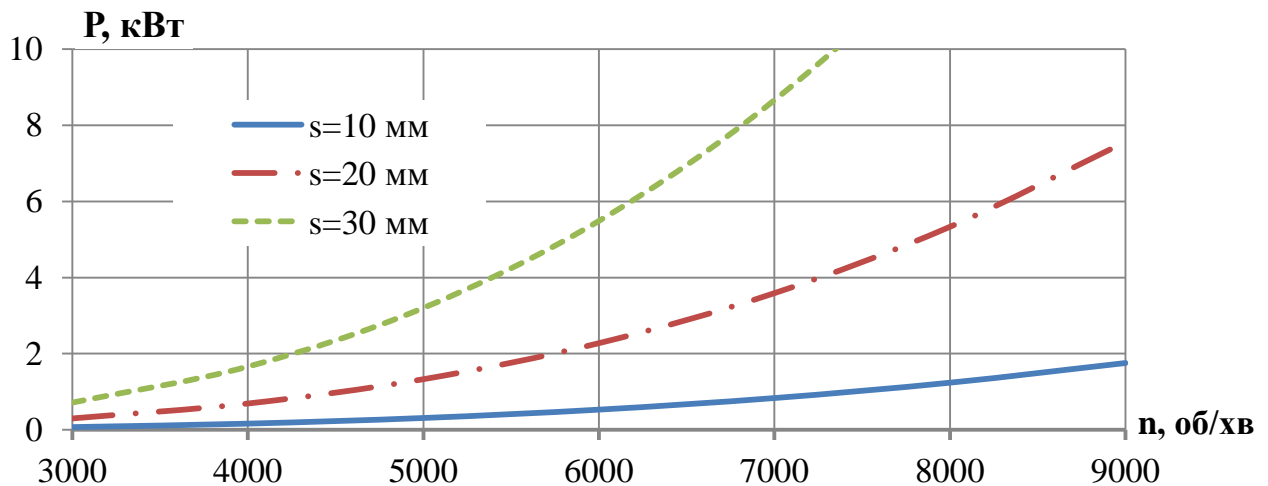


Рис. 5.8. Залежність середньої потужності P_g пульсаційного гомогенізатора від частоти n та амплітуди s коливання поршня (при $h = 5$ мм, $D_n = 60$ мм, $K_o = 0,5$)

Розрахуємо необхідну потужність для отримання емульсії з достатньої дисперсністю (0,8–1,2 мкм) (рис. 5.9). Достатній середній розмір жирових кульок 1,2 мкм можливо отримати при радіусі кривошипу 5 мм і частоті 7300 хв⁻¹ (точка В на рис. 5.9) або при $s=30$ мм і $n=4300$ хв⁻¹ (точка А). При подальшому збільшенні частоти та амплітуди коливання поршня дисперсність емульсії зростає. Емульсію з середнім розміром жирових кульок 0,8 мкм можливо отримати при $s=30$ мм і $n=6200$ хв⁻¹ (точка С) або при $s=20$ мм і $n=7600$ хв⁻¹ (точка D), або при $s=10$ мм і $n > 9000$ хв⁻¹.

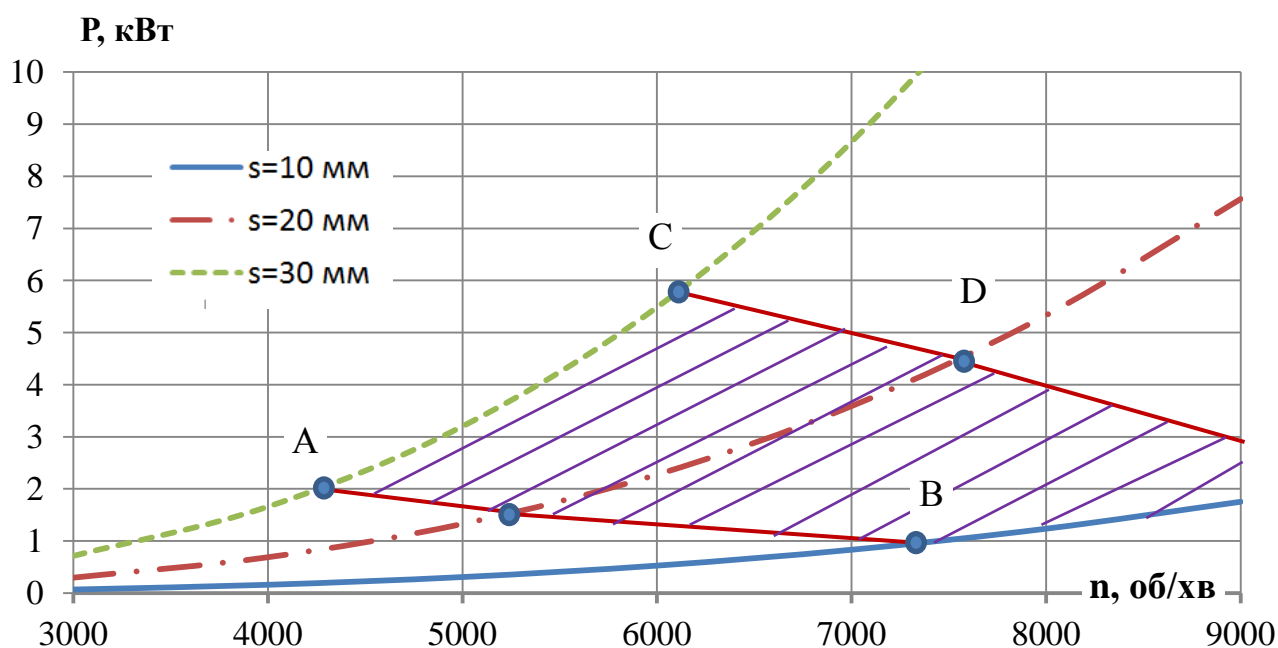


Рис. 5.9. Залежність потужності електродвигуна приводу пульсаційного апарата $P_{\text{в}}$ від частоти коливань поршня n та радіусу кривошипу r ($D_n=60$ мм; $K_0=0,5$; $h_n=5$ мм; матеріал поршня – сталь)

Область достатнього ступеня гомогенізації молока для пульсаційного апарату на рис. 5.9 показана заштрихованою в діапазоні $10 < s < 30$ мм. Необхідна потужність електродвигуна при цьому буде рівна 1,0–5,9 кВт. Якщо з'єднати точки А–В і С–D, то в області на графіку між ними отримаємо множину даних s , n , P , при яких дисперсність емульсії молока після обробки в пульсаційному апараті буде достатньою у відповідності з вимогами сучасних технологічних схем виробництва молочних продуктів.

Згідно даних графіку (рис. 5.9) необхідна потужність приводу пульсаційного апарата зменшується при підвищенні частоти коливань поршня. Тому для зниження енерговитрат гомогенізації необхідно підвищувати частоту пульсації поршня.

Таким чином, в результаті аналітичних досліджень визначено, що для зниження енерговитрат пульсаційного гомогенізатора молока необхідно підвищувати частоту коливань поршня. Мінімально необхідна потужність електродвигуна приводу (1–2 кВт) досягається при частоті 4300–7300 хв⁻¹ та амплітуді коливань 10–30 мм при розрахунковій середній дисперсності емульсії 1,2 мкм.

Питомі енерговитрати гомогенізації молока при пульсаційній гомогенізації. Питомі енерговитрати гомогенізатора, E_{num} , Дж/кг визначаються з відомої формули (4.36).

З урахуванням формул (5.61) і (4.40), знайдемо вираз для питомих енерговитрат ППГ

$$E_{num} = \pi^2 ns (1 - K_o) K \left(\frac{0,64\pi h_n \rho_n n}{\rho_m} + 0,2\pi Cnr + \frac{0,22}{K_o} \right). \quad (5.62)$$

Питомі енерговитрати не залежать від діаметра поршня. Для зниження E_{num} необхідно виконання вимог

$$\{n, s, h_n, \rho_n, C, K\} \rightarrow \min ; \{K_o\} \rightarrow \max. \quad (5.63)$$

Вплив щільності матеріалу та товщини поршня очевидний з наведеної вище формули.

При збільшенні коефіцієнта живого перетину поршня K_o питомі енерговитрати гомогенізації майже лінійно зменшуються (рис. 5.10).

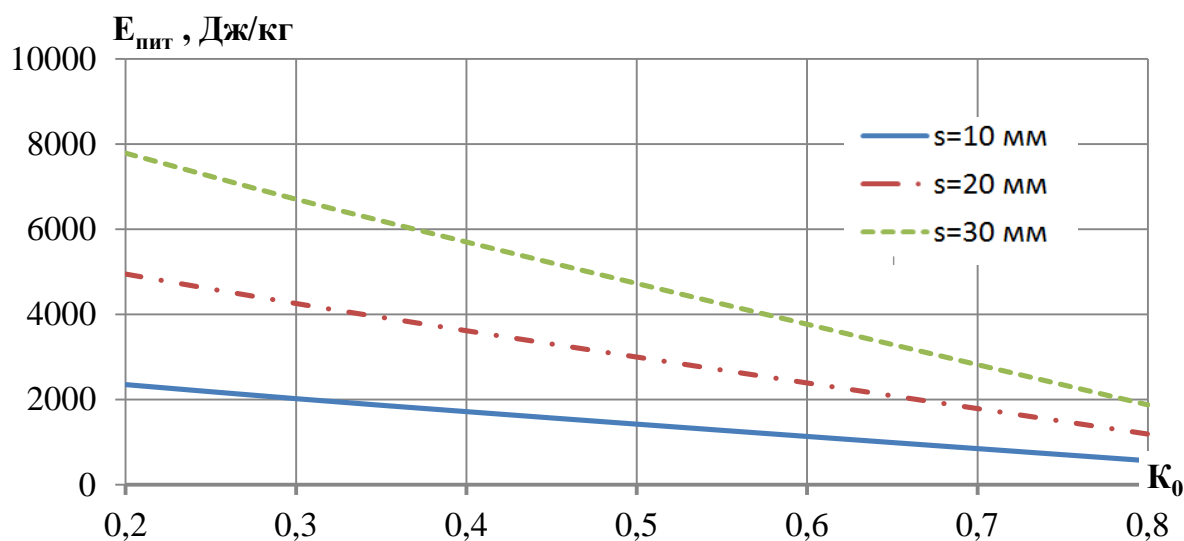


Рис. 5.10. Графік залежності питомих енерговитрат E_{num} від коефіцієнта живого перетину поршня K_o і амплітуди коливання поршня s (при $n = 9000$ хв⁻¹).

Це відбувається завдяки зниженню швидкості емульсії в отворах поршня, опору руху поршня і його маси, внаслідок чого зменшується потужність усіх трьох складових загальної потужності ППГ.

Слід зауважити, що при зменшенні K_o за рахунок зменшення діаметрів

отворів буде зростати коефіцієнт гідравлічного опору руху емульсії крізь отвори і, як наслідок, збільшуватись питомі енерговитрати, що не враховано у формулах (5.61) і (5.62). Тому експериментальна залежність $E_{num}=f(K_o)$ при зменшенні діаметра d_o буде змінюватись більш інтенсивно, ніж показано на графіку.

На значення енерговитрат впливає форма отворів поршня. Зниження значень коефіцієнтів швидкості φ і витрат μ підвищують потужність, необхідну для надання кінетичної енергії пульсуючої в отворах рідини, що підвищує питомі енерговитрати.

При збільшенні частоти та амплітуди пульсації поршня відбувається зростання необхідної потужності та продуктивності ППГ, але збільшення потужності відбувається більш інтенсивно, внаслідок чого питомі енерговитрати зростають (рис. 5.11).

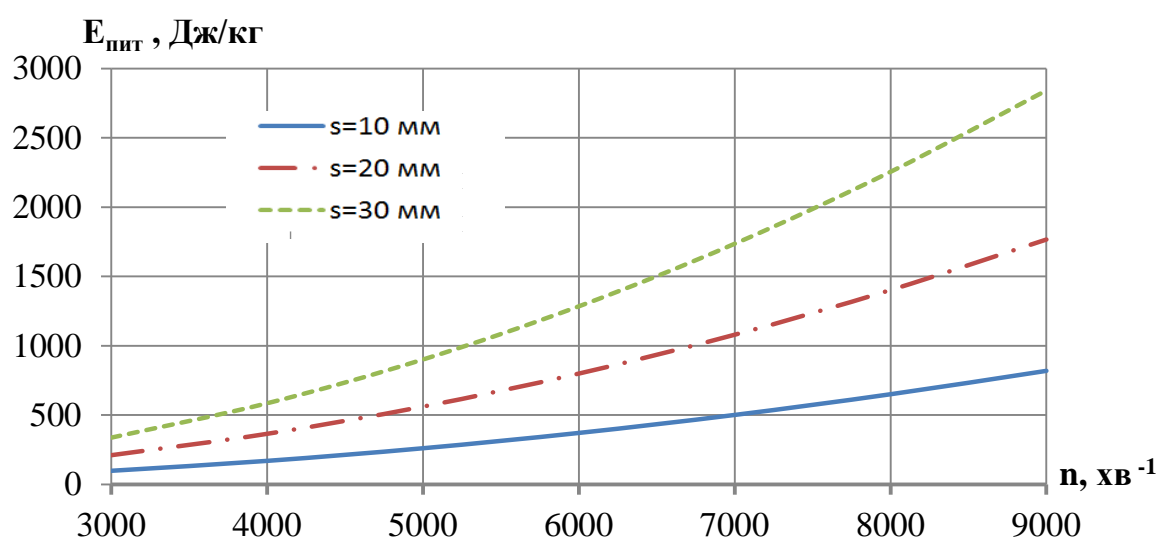


Рис. 5.11. Графік залежності питомих енерговитрат ППГ E_{num} від частоти n і амплітуди коливання поршня s (при $K_o = 0,5$)

5.1.3. Визначення енерговитрат гомогенізації в пульсаційному апараті з ротором, що вібрує

Ефективність застосовуваного устаткування визначається величиною питомих енерговитрат процесу. Отже, розрахунок потужності, споживаної ПА з ВР, є найважливішою частиною методики його розрахунку.

Відома достатня кількість робіт, присвячених розрахунку споживаної потужності РПА [86, 169, 235], однак невідомі роботи, що містять методику розрахунку ПА з ВР.

Робоча камера ПА з ВР складається з ротора 3 (рис. 5.12) і статора 4. Для осьових коливань ротора застосовується кривошипний механізм 5, а для обертання ротора використаний електродвигун 1 з клинопасовою передачею 2, що припускає при роботі відхилення на величину коливань s , яке дослідного апарата складає 1–3 мм.

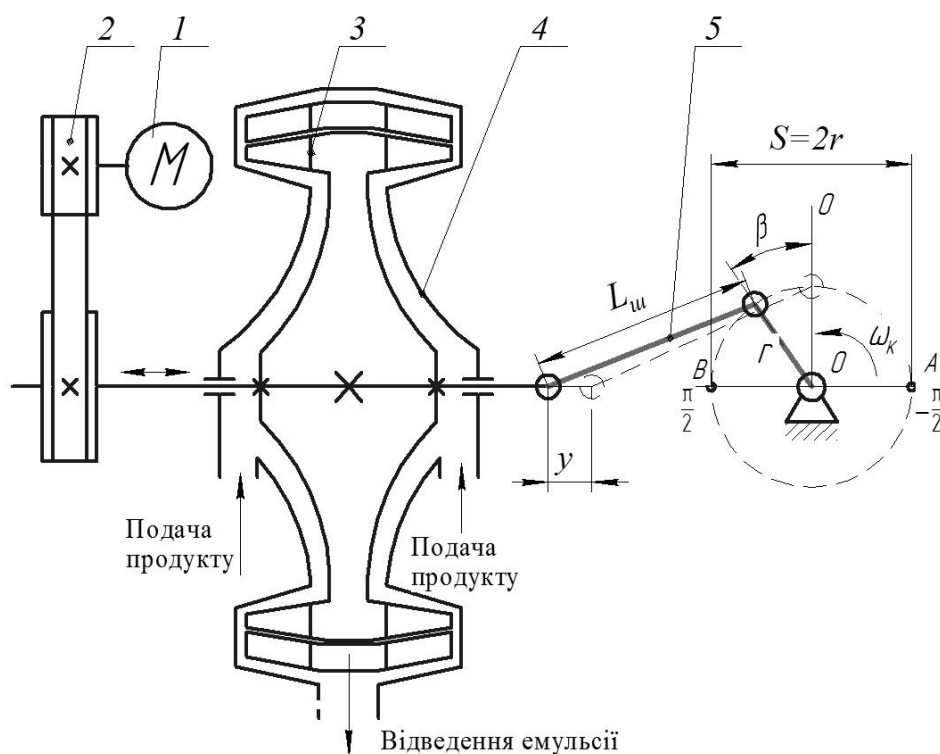


Рис. 5.12. Схема ПА з ВР для розрахунку споживаної потужності: 1 – електродвигун приводу обертання ротора; 2 – клинопасова передача; 3 – ротор; 4 – статор; 5 – кривошипний механізм приводу вібрації ротора

Розрахунок необхідної потужності ПА з ВР заснований на загальних фізичних уявленнях про закономірності гідромеханічних процесів, що мають місце в роторних апаратах. Основне положення – кінетична енергія, що її набуває потік рідини в обертovому роторі, потім дисипується в радіальному зазорі між ротором і статором, в осьовому зазорі між торцем ротора і корпусом, втрачається в механізмі апарата. Акустичної потужністю нехтуємо через її

незначну величину. У запропонованій схемі ПА з ВР енергетичний баланс представимо у вигляді

$$P_{\Sigma} = P_o + P_e, \quad (5.64)$$

де P_o – потужність, що витрачається електродвигуном приводу обертання ротора, Вт;

P_e – потужність, що витрачається електродвигуном приводу вібрації ротора, Вт.

Для визначення потужності обертання ротора в пульсаційному апараті існує досить велика кількість методик. У роботі [170] отримано вирази для розрахунку потужності за критеріями, що враховують вплив геометричних і режимних параметрів роторного апарата. Коефіцієнти і показники ступеня в рівняннях отримані експериментально. У дослідженні [86] продовжена робота з удосконалення методики визначення потужності. Загальним недоліком цих робіт є необхідність проведення експериментальних досліджень для визначення показників ступеня при членах рівнянь, крім того, розрахунок потужності можливий тільки після остаточного визначення всіх конструктивних і режимних параметрів роторного апарата.

Цих недоліків частково позбавлена робота [170]. В роботі [101] на підставі рівняння Нав'є–Стокса визначені втрати потужності в радіальному зазорі. Для визначення енерговитрат в апараті, що йдуть на подолання сил опору об внутрішній обертовий циліндр, розглядають плоску течію, утворену накладенням вихрової течії та плинину основного потоку. В роботі [170] розрахунок енергоспоживання в радіальному зазорі ґрунтується на гідродинамічній моделі Куетта, ускладненій радіальним вдупом. Розрахунок потужності виконаний методом дисипативних втрат при різних режимах течії в радіальному зазорі. У роботі [235] розрахунок енерговитрат також обмежується визначенням дисипативних втрат в радіальному зазорі на підставі досить складної структури потоку і використовується плоска модель турбулентної течії.

На підставі зробленого огляду основних робіт, присвячених визначенню

енерговитрат на роботу РПА, можна зробити висновок, що для визначення споживаної роторним апаратом енергії тільки в радіальному зазорі необхідно попередньо розрахувати якимось чином основні режимні параметри і геометричні розміри, експериментально визначити коефіцієнти і показники ступеня. Такі методики розрахунку важко використовувати на початку проектування технологічного процесу при виборі обладнання для оцінки його ефективності і порівняння питомих енерговитрат. Для цього вирази, за допомогою яких визначається потужність, повинні містити мінімальну кількість вихідних даних. Найбільш повно цим вимогам відповідає методика розрахунку, яка запропонована в [16, 87].

Енергетичний баланс для визначення потужності приводу обертання ротора представимо у вигляді [276]

$$P_o = P_k + P_T + P_x, \quad (5.65)$$

де P_k – потужність, яка необхідна для надання кінетичної енергії рідині для проходження крізь пази ротора, Вт;

P_T – потужність, яка необхідна для подолання тертя в зазорі між ротором і статором, Вт;

P_x – потужність холостого ходу апарата, Вт.

Потужність, яка необхідна для надання кінетичної енергії рідині, визнається за виразом

$$P_k = \frac{\rho_m Q_o v^2}{2}, \quad (5.66)$$

де ρ_m – густина молока, кг/м³;

Q_o – продуктивність апарата, м³/с;

v – середня швидкість рідини в зазорі, м/с.

При цьому

$$v = \omega_p R, \quad (5.67)$$

де R – зовнішній радіус ротора, м.

З урахуванням останнього рівняння, формула (5.66) набуває вигляду

$$P_k = \frac{1}{2} \rho_m \omega_p^2 R^2 Q_o. \quad (5.68)$$

Миттєву витрату рідини через переривник ПА визначимо з рівняння [269]

$$Q_o(\varphi) = v_o(\varphi) \cdot S(\varphi). \quad (5.69)$$

Враховуючи (4.85) і (4.62), отримаємо

$$Q_o(\varphi) = \frac{\pi^2 n_k r D^2 \cos \beta}{8} + \left(\frac{\pi D}{2z} \left(1 + \sin\left(\varphi z - \frac{\pi}{2}\right) \right) + 8\delta \right) \frac{\pi^4 n_p D^3}{1920z(l_p + \delta + l_c)} \left\{ \frac{\varphi z}{2\pi} \right\}. \quad (5.70)$$

Для оптимального варіанту фазового співвідношення, визначеного у попередньому підрозділі, графік витрат виглядає наступним чином (рис 5.13).

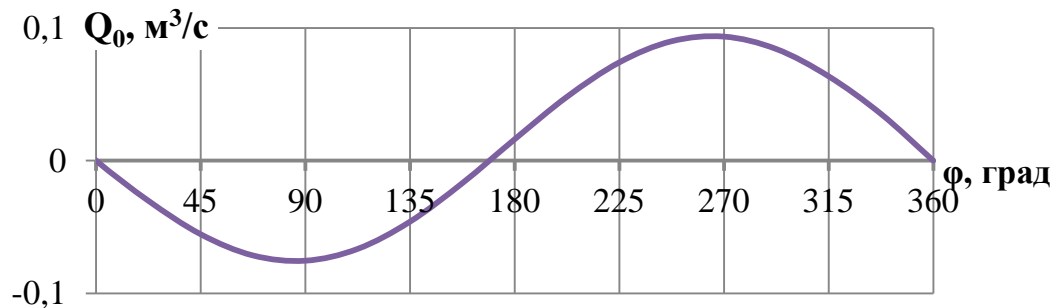


Рис. 5.13. Графік миттєвих витрат емульсії в ПА з ВР для варіанту $\varphi = \beta / z_p$, $\beta = 3\pi / 2$.

Видно, що витрати через переривник назовні (додатні значення на графіку) перевищують від'ємні. Сумарні витрати будуть дорівнювати різниці цих витрат.

Вираз (5.69) можна представити у вигляді

$$Q_o(\varphi) = (v_o^n(\varphi) + v_o^e(\varphi)) \cdot S(\varphi) \quad (5.71)$$

або

$$Q_o(\varphi) = v_o^n(\varphi) \cdot S(\varphi) + v_o^e(\varphi) \cdot S(\varphi). \quad (5.72)$$

Сумарну витрату за один оберт ротора визначимо за формулою

$$Q_o = \int_0^{2\pi} v_o^n(\varphi) \cdot S(\varphi) + \int_0^{2\pi} v_o^e(\varphi) \cdot S(\varphi). \quad (5.73)$$

Внаслідок гармонійних пульсацій емульсії в отворах переривника ПА з ВР об'єми рідини, що витискаються ротором через отвори переривника за один

оберт кривошипу в порожнину ротора та назовні, викликані вібрацією ротора – практично рівні. Тобто сумарна витрата рідини, викликана осьовим рухом ротора, дорівнює нулю. Звідси

$$Q_o = \int_0^{2\pi} v_o^e(\varphi) \cdot S(\varphi). \quad (5.74)$$

Обчислення за останньої формулою призводить до громіздких арифметичних виразів, які важко застосовувати на практиці.

В.І. Біглером для визначення витрат РПА використовувалась формула [97]

$$Q_o = z S_c v_c, \quad (5.75)$$

де v_c – середнє значення швидкості за час пульсації рідини, яка викликана обертанням ротора, м/с;

S_c – середня площа перекриття отвору, м².

$$S_c = \frac{\pi d^2}{8}. \quad (5.76)$$

Зважаючи на лінійність зміни швидкості емульсії в каналі статора від часу (рис. 4.19), отримаємо

$$v_c = \frac{v_{max}}{2}, \quad (5.77)$$

де v_{max} – максимальна швидкість v_o^e емульсії в кінці циклу закриття отворів переривника (в момент часу τ_u).

З (4.82) визначаємо v_{max}

$$v_{max} = \frac{\pi^2 n_p D^2}{120 z (l_p + \delta + l_c)}. \quad (5.78)$$

Звідси з урахуванням (5.115–5.118)

$$Q_o = \frac{D^4 n_p}{25 z^2 (l_p + \delta + l_c)}. \quad (5.79)$$

Продуктивність, виражена у т/год з урахуванням циклічної зміни площі відкриття переривника та довжини лопатей РПА, дорівнює

$$Q_o = \frac{D^4 n_p \rho_m}{90 z^2 (l_p + \delta + l_c)}. \quad (5.80)$$

Отже, продуктивність ПА з ВР пропорційна D^4 , частоті обертання ротора та зворотно пропорційна z^2 і довжині каналів модулятора (рис. 5.14).

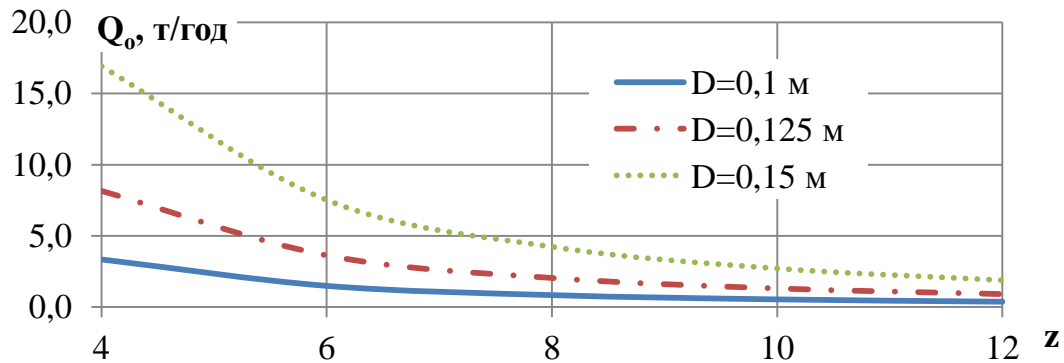


Рис. 5.14. Графік залежності продуктивності Q_o ПА з ВР від діаметра ротора D та кількості отворів z (при $\delta=1$ мм, $l_p=5$ мм, $l_c=10$ мм, $n_p=480$ об/хв).

Збільшення діаметра призводить до збільшення величини перепаду тиску (пропорційно D^2) діаметра отворів, тобто збільшення площі переривника і ширини ротора, тому продуктивність ПА з ВР пропорційна D^4 . При збільшенні кількості отворів зменшується ширина ротора та площа перетину переривника.

При виникненні резонансу збільшується амплітуда пульсацій рідини в переривнику як всередину порожнини ротора так і назовні. Сумарний вплив на продуктивність від таких пульсацій буде рівний нулю (за цикл пульсацій кількість рідини, яка пройшла отвори ротора дорівнює кількості, що повернулася), тому, очікувано, продуктивність, знайдена за останнім виразом, не зміниться.

З урахуванням виразу для визначення продуктивності (5.80), формулу потужності (5.68) представимо у вигляді

$$P_k = \frac{\rho_m D^6 n_p^3}{9200 z^2 (l_p + \delta + l_c)}. \quad (5.81)$$

Потужність, необхідна для подолання тертя в зазорі між ротором і

статором за [87]

$$P_T = \frac{2\pi\mu HR^2 \omega_p^2}{\delta}, \quad (5.82)$$

де μ – динамічний коефіцієнт в'язкості емульсії, Па·с;

H – ширина ротора, м;

Ширина ротора

$$H > d_p. \quad (5.83)$$

В типових конструкціях РПА

$$H = 1,4d_p = \frac{0,7\pi D}{z}. \quad (5.84)$$

Тому

$$P_T = \frac{0,35\pi^2 \mu D^3 \omega_p^2}{z\delta}. \quad (5.85)$$

$$P_T = \frac{\mu D^3 n_p^2}{26,4z\delta}. \quad (5.86)$$

Потужність холостого ходу не перевищує 5–10% від суми $P_k + P_T$ [330]

$$P_x = (0,05 \dots 0,10)(P_k + P_T), \quad (5.87)$$

Таким чином

$$P_o = 1,1 \left(\frac{\rho_m D^6 n_p^3}{9200 z^2 (l_p + \delta + l_c)} + \frac{\mu D^3 n_p^2}{26,4z\delta} \right), \quad (5.88)$$

Після перетворень

$$P_o = 1,1 D^3 n_p^2 \left(\frac{\rho_m D^3 n_p}{9200 z^2 (l_p + \delta + l_c)} + \frac{\mu}{26,4z\delta} \right). \quad (5.89)$$

Збільшення діаметра ротора різко збільшує споживану потужність (рис. 5.15). У меншій мірі це стосується і підвищення частоти обертання ротора. Збільшення кількості отворів істотно зменшує потужність обертання ротора внаслідок зменшення товщини ротора. Збільшення кількості отворів у 2 рази від 6 до 12 збільшує споживану потужність в 8–8,5 разів.

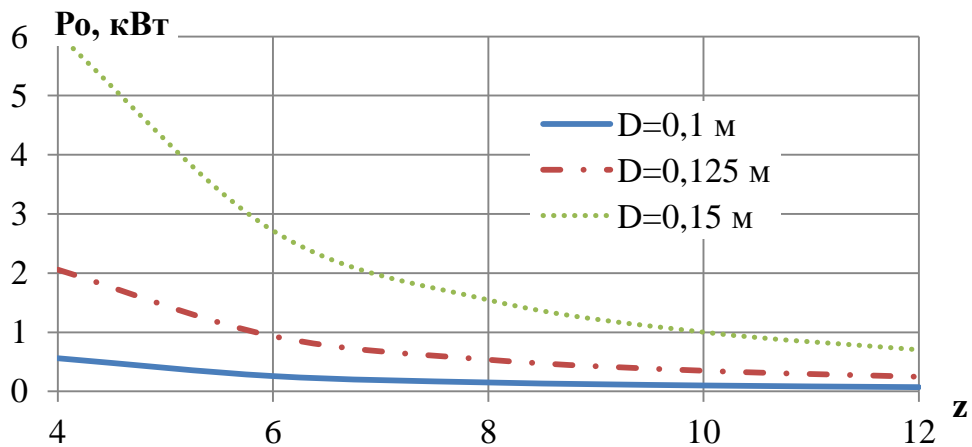


Рис. 5.15. Графік залежності потужності обертання ротора P_0 від діаметра D та кількості отворів ротора z (при $n_p=480$ об/хв, $\delta=1$ мм, $l_p=0,005$ м, $l_c=0,01$ м).

Потужність, що витрачається на вібрацію ротора P_v , можна представити у вигляді трьох складових: P_i – потужності, що витрачається на подолання сил інерції, що виникають при зворотньо–поступальному русі ротора і вала, P_{op} – потужності, що витрачається на подолання опору ротора при русі в робочому середовищі апарата і P_v – потужності, що витрачається на надання кінетичної енергії пульсуючій в отворах ПА рідини [276].

$$P_v = P_i + P_{op} + P_v. \quad (5.90)$$

Потужність P пов'язана з силою опору F співвідношенням

$$P = F \frac{dy}{d\tau}, \quad (5.91)$$

де y – осьове переміщення ротора при вібрації, м (рис.5.12);

τ – час переміщення.

Силу опору знайдемо як суму сил інерції та опору

$$F = F_i + F_{op}. \quad (5.92)$$

Сила інерції вібруючого ротора F_i визначається як

$$F_i = m \frac{d^2 y}{dt^2}, \quad (5.93)$$

де m – маса рухомих частин апарата (ротора і вала), кг.

Сила опору ротора при русі в робочому середовищі апарата F_m визначається як [172]

$$F_{op} = \frac{S}{2} \rho_m C \left(\frac{dy}{dt} \right)^2, \quad (5.94)$$

де S – площа ротора, м²;

C – коефіцієнт лобового опору.

$$S = \frac{\pi D^2}{4}. \quad (5.95)$$

Похідні за часом (швидкість та прискорення) можна зайти з залежностей

$$y = r(1 - \cos \beta) + \frac{\lambda}{2} r \sin^2 \beta. \quad (5.96)$$

$$\beta = 2\pi n_{kc} t. \quad (5.97)$$

де n_{kc} – частота обертання ротора, об/с.

В в ПА з ВР $\lambda \rightarrow 0$, тому

$$y = r(1 - \cos \beta).$$

Шляхом диференціювання визначаємо

$$\frac{dy}{dt} = 2\pi n_{kc} r \sin \beta. \quad (5.98)$$

$$\frac{d^2 y}{dt^2} = 4\pi^2 n_{kc}^2 r \cos \beta. \quad (5.99)$$

З урахуванням останнього виразу формула (5.93) приймає вигляд

$$F_i = 4m\pi^2 n_{kc}^2 r \cos \beta. \quad (5.100)$$

$$F_m = \frac{S}{2} \rho_m C (2\pi n_{kc} r \sin \beta)^2 = 2S \rho_m C \pi^2 n_{kc}^2 r^2 \sin^2 \beta. \quad (5.101)$$

Враховуючи, що $s = 2r$, сила опору при осьовому переміщенні ротора дорівнює

$$\begin{aligned} F &= 4m\pi^2 n_{kc}^2 r \cos \beta + 2S \rho_m C \pi^2 n_{kc}^2 r^2 \sin^2 \beta = \\ &= 2\pi^2 n_{kc}^2 r (2m \cos \beta + CS \rho_m r \sin^2 \beta) \end{aligned} \quad (5.102)$$

Рівняння миттєвого значення потужності, що витрачається на вібрацію ротора, має вигляд

$$P_i + P_{op} = 4\pi^3 n_{kc}^3 r^2 \sin \beta (2m \cos \beta + CS \rho_m r \sin^2 \beta).$$

$$P_i + P_{op} = \frac{n_{kc}^3 r^2}{5477} (m \cdot \sin 2\beta + CS \rho_m r \sin^3 \beta). \quad (5.103)$$

Максимальне значення $P_i + P_{op}$ сягає при $\beta = 45^\circ$ і дорівнює

$$P_i + P_{op} = \frac{n_{kc}^3 r^2}{5477} (m + 0,35CS \rho_m r).$$

$$P_i + P_{op} = \frac{n_{kc}^3 r^2}{5477} (m + 0,27CD^2 \rho_m r) \quad (5.104)$$

Потужність P_v , що витрачається на надання кінетичної енергії пульсуючій в отворах ПА рідині, знайдемо за аналогією з (5.66)

$$P_v = \frac{\rho_m Q_c v_{c.r}^2}{2}, \quad (5.105)$$

де Q_c – витрата рідини крізь отвори переривника, викликана вібрацією ротора, м³/с;

$v_{c.r}^2$ – середня швидкість рідини в отворах переривника, викликана осьовим рухом ротора, м/с.

$$Q_c = V n_{kc}, \quad (5.106)$$

де V – об'єм рідини, що витісняється та всмоктується через переривник ПА з ВР, викликаний переривником ПА з ВР, м³.

Враховуючи, що

$$V = 2 \frac{\pi D^2}{4} s, \quad \text{а} \quad (5.107)$$

$$v_{c.r} = \frac{Q_c}{zS_c}, \quad (5.108)$$

отримаємо

$$P_v = 7,7 \cdot 10^{-5} \rho_m z^2 D^2 r^3 n_{kc}^3. \quad (5.109)$$

Сумарно середнє значення потужності на вібрацію ротора (Вт) має вигляд

$$P_v = 0,18 n_{kc}^3 r^2 (m + 0,27CD^2 \rho_m r + 0,43 \rho_m z^2 D^2 r). \quad (5.110)$$

Потужність, що витрачається на подолання опору ротора при русі в робочому середовищі апарата P_{op} складає лише 1–2% від загальної потужності, тому можна знехтувати нею у подальших розрахунках. Таким чином

$$P_e = 0,18n_k^3 r^2 (m + 0,43\rho_m z^2 D^2 r). \quad (5.111)$$

Потужність P_e зростає при збільшенні діаметра ротора та кількості отворів, що протилежно до залежності $P_o(D, z)$ (рис. 5.16).

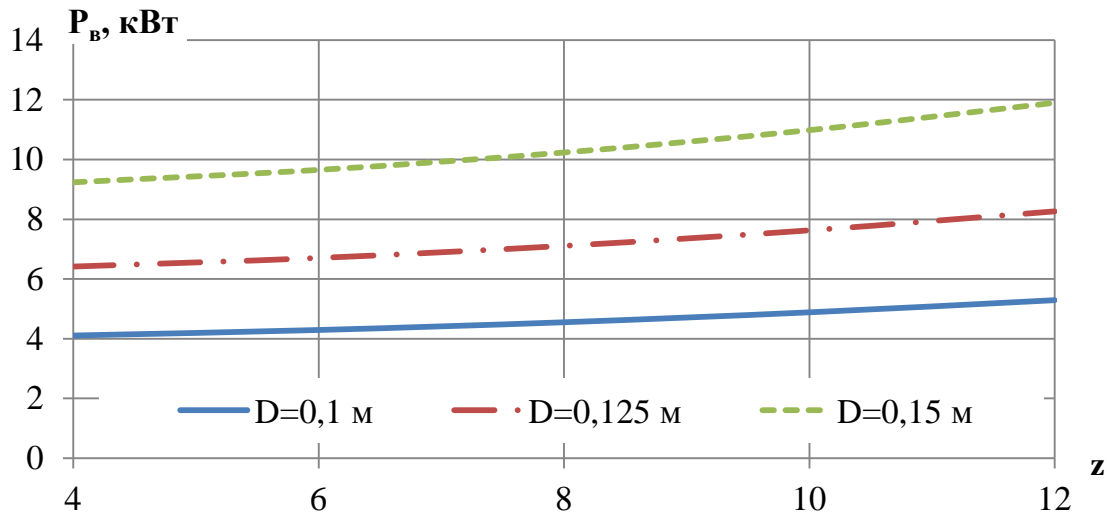


Рис. 5.16. Графік залежності потужності вібрації ротора P_e від кількості отворів z та діаметра ротора D ($n_k=2880$ об/хв, $r=1$ мм).

При збільшенні D від 0,1 до 0,15 м потужність зростає на 30% при $z=12$ і на 4% при $z=4$. Збільшення кількості отворів істотно підвищує темпи зростання енерговитрат ПА з ВР.

Потужність P_e істотно зростає при збільшенні радіусу кривошипу (рис. 5.17). При збільшенні радіуса кривошипу від 0,5 до 1,5 мм потужність збільшується в 8 разів. Характер залежності потужності від радіусу кривошипу істотно не змінюється при збільшенні кількості отворів.

Отже, формула для розрахунку загальної споживаної потужності ПА з ВР (5.64) має вигляд

$$P_{\Sigma} = 1,1D^3 n_p^2 \left(\frac{\rho_m D^3 n_p}{9200 z^2 (l_p + \delta + l_c)} + \frac{\mu}{26,4 z \delta} \right) + 0,18 n_k^3 r^2 (m + 0,43 \rho_m z^2 D^2 r). \quad (5.112)$$

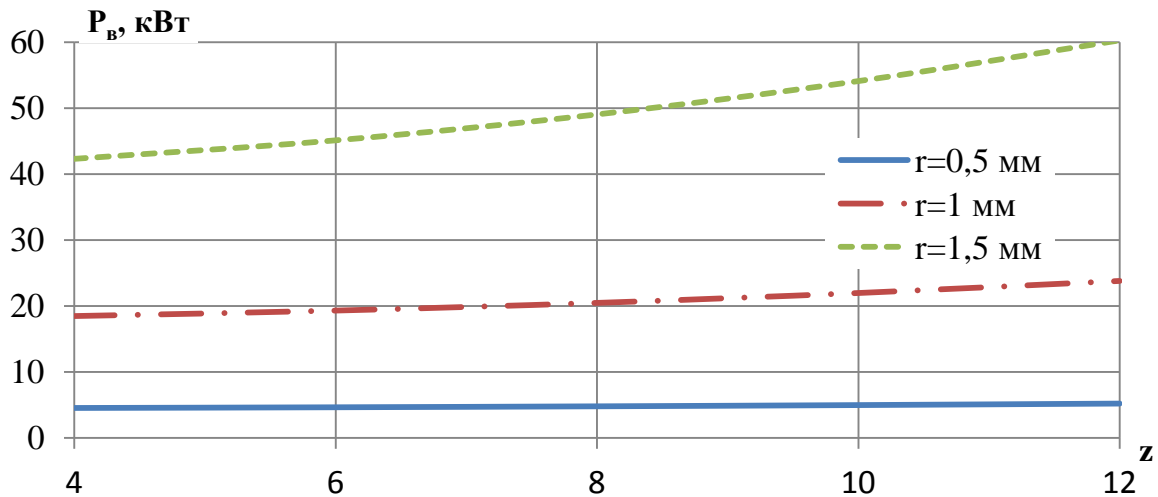


Рис. 5.17. Графік залежності потужності вібрації ротора P_v від кількості отворів z та радіусу кривошипу r ($n_k=2880$ об/хв, $D=0,15$ м).

Якщо виразити масу рухомих частин через діаметр ротора, то

$$m = m_p + m_i, \quad (5.113)$$

де m_p – маса ротора, кг;

m_i – маса валу та шківу, кг;

Виходячи з конструктивних параметрів типових РПА, прийmemo

$$m = 3m_p. \quad (5.114)$$

Виражаючи масу ротора через його об'єм, знаходимо

$$m_p = \frac{\pi D^2}{4} h_p \rho_c, \quad (5.115)$$

де h_p – товщина ротора, м;

ρ_c – щільність матеріалу ротора, м³/с.

Отже маса рухомих частин

$$m = 0,75\pi D^2 h_p \rho_c. \quad (5.116)$$

З урахуванням останнього виразу потужність сумарна потужність дорівнює

$$P_\Sigma = 1,1D^3 n_p^2 \left(\frac{\rho_m D^3 n_p}{9200z^2(l_p + \delta + l_c)} + \frac{\mu}{26,4z\delta} \right) + 0,18n_k^3 r^2 (0,75\pi D^2 h_p \rho_c + 0,43\rho_m z^2 D^2 r). \quad (5.117)$$

$$P_{\Sigma} = 1,1D^3n_p^2 \left(\frac{\rho_m D^3 n_p}{9200z^2(l_p + \delta + l_c)} + \frac{\mu}{26,4z\delta} \right) + 0,42n_{\kappa}^3 r^2 D^2 (\pi h_p \rho_c + 0,18\rho_m z^2 r). \quad (5.118)$$

В цілому вплив потужності вібрації ротора складає більш вагому частку у загальній потужності, споживаної ПА з ВР і при збільшенні діаметра ротора ця частка різко зростає. При $z=4$ частка P_o у P_{Σ} складає 7%, а при $z=12$ – вище 25%.

При збільшенні кількості отворів ротора більше 6 сумарна потужність ПА з ВР підвищується, але характер збільшення виражений дуже слабо (рис. 5.18). При $z < 6$ потужність повільно збільшується.

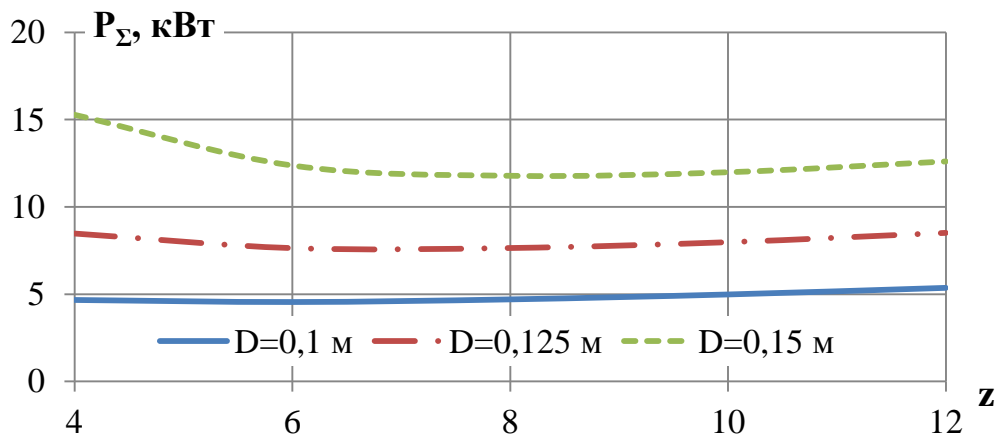


Рис. 5.18. Графік залежності сумарної потужності P_{Σ} від кількості отворів z та діаметра ротора D ($n_{\kappa}=2880$ об/хв, $r=1$ мм).

При виникненні резонансу витрати енергії на коливання рідини в отворах переривника зменшуються. Це призведе до зменшення потужності P_e , яке визначається коефіцієнтом k_e . В цьому випадку сумарна потужність має вигляд

$$P_{\Sigma} = 1,1D^3n_p^2 \left(\frac{\rho_m D^3 n_p}{9200z^2(l_p + \delta + l_c)} + \frac{\mu}{26,4z\delta} \right) + k_e 0,42n_{\kappa}^3 r^2 D^2 (\pi h_p \rho_c + 0,18\rho_m z^2 r). \quad (5.119)$$

Коефіцієнт k_e визначимо у експериментальному розділі роботи.

Отримана залежність (5.107) пов'язує основні конструктивні і режимні параметри роторного апарата, які визначаються на стадії проектування. Залежність для розрахунку сумарної потужності дає можливість легко

визначити енерговитрати апарата та оцінити вплив кожного з них. Пропоновану методику розрахунку енерговитрат рекомендується використовувати при розрахунку промислових зразків ПА з ВР. Це дозволяє визначити питомі витрати потужності роторного апарата й ефективність його застосування, в порівнянні з іншим устаткуванням, яке використовується для проведення процесу гомогенізації.

Мірою енерговитрат нового устаткування є питомі енерговитрати. Для ПА з ВР питомі енерговитрати знайдемо за відомою формулою

$$E_{\text{пит}} = \frac{P_{\Sigma}}{Q_o}. \quad (5.120)$$

З урахуванням (5.119) та (5.80), залежність (5.108) показана графічно на рис. 5.19 [301].

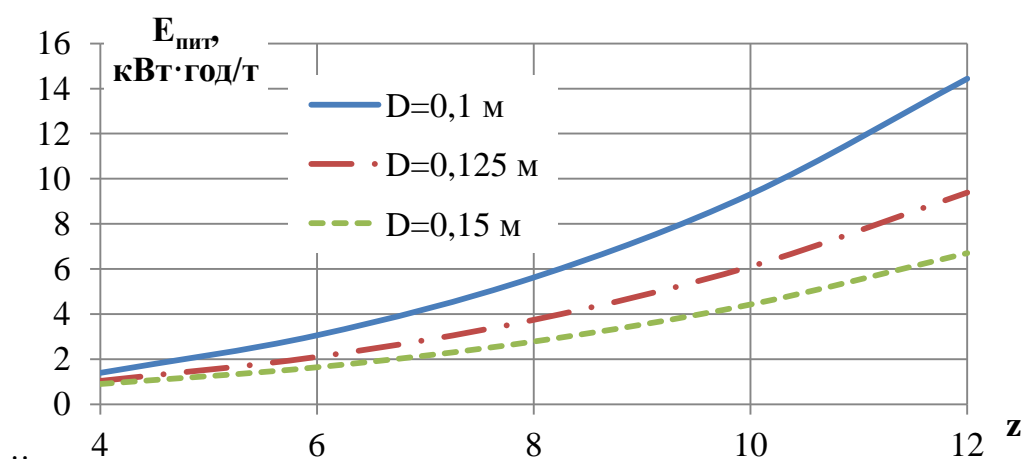


Рис. 5.19. Графік питомих енерговитрат ПА з ВР $E_{\text{пит}}$ в залежності від діаметра ротора D та кількості його отворів z ($n_k=2880$ об/хв, $r=1$ мм).

Отже, згідно аналітичних досліджень, при $z=4$ питомі енерговитрати ПА з ВР не перевищують 1,5–1,8 кВт·год/т.

Після проведення аналізу складових виразу (5.108) можна зробити наступні висновки.

З точки зору мінімізації питомих енерговитрат, раціонально використовувати апарат з мінімальною кількістю отворів у роторі та більшим діаметром ротора.

При збільшенні радіусу кривошипу, внаслідок збільшення потужності ПА з ВР та незалежності продуктивності, питомі енерговитрати зростають, отже r необхідно зменшувати.

При збільшенні частоти обертання кривошипу та ротора питомі енерговитрати зростають. Тому необхідно намагатися зменшити частоту обертання ротора при підтриманні необхідного ступеня дисперсності жирової фази молока.

Збільшення довжини ротора та статора та зазору між ними підвищує питомі енерговитрати.

5.2. Оптимізація конструктивно-технологічних параметрів роторного, пульсаційного та струминого гомогенізаторів на основі розробленої математичної моделі диспергування

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 [5, 289]. Отримані у попередніх підрозділах залежності пов'язують основні показники та характеристики роботи ППГ, ПА з ВР і СГРЖФ при обробці молочної емульсії, але не визначають оптимальних (раціональних) параметрів їх роботи. При вирішенні оптимізаційних задач знаходження конструктивно-кінематичних та технологічних параметрів гомогенізаторів критеріями оптимізації обрано отримання середнього діаметра жирових кульок молочної емульсії 0,8 мкм при мінімальних енерговитратах [152].

5.2.1. Оптимізація параметрів струминого гомогенізатора з роздільним подаванням жирової фази

Для визначення оптимальних параметрів СГРЖФ порівняймо формули (3.12) і (5.24) та умови (3.13) і (5.25). Для підвищення дисперсності необхідно [145]

$$(We_k, \sigma_{ж-н}, \varepsilon_k, s_k) \rightarrow \min; (k_c, Q_{зн}) \rightarrow \max.$$

Умовами зниження питомих енерговитрат є:

$$(s_k, \mu_k, \mu_g, N_k, d, Ж_g) \rightarrow \max; (Q_{зн}, Ж_{н.м}) \rightarrow \min.$$

Визначення оптимальних значень $Q_{зн}$ і s_k проведемо графічними методами, для чого співставимо графіки середнього розміру жирових кульок (рис. 3.4) і питомих енерговитрат (рис. 5.4). Лінії рівної дисперсності (0,8 і 1,2 мкм) свідчать про зниження питомих енерговитрат при зниженні подачі знежиреного молока і зменшенні внутрішнього перерізу робочої камери (рис. 5.20).

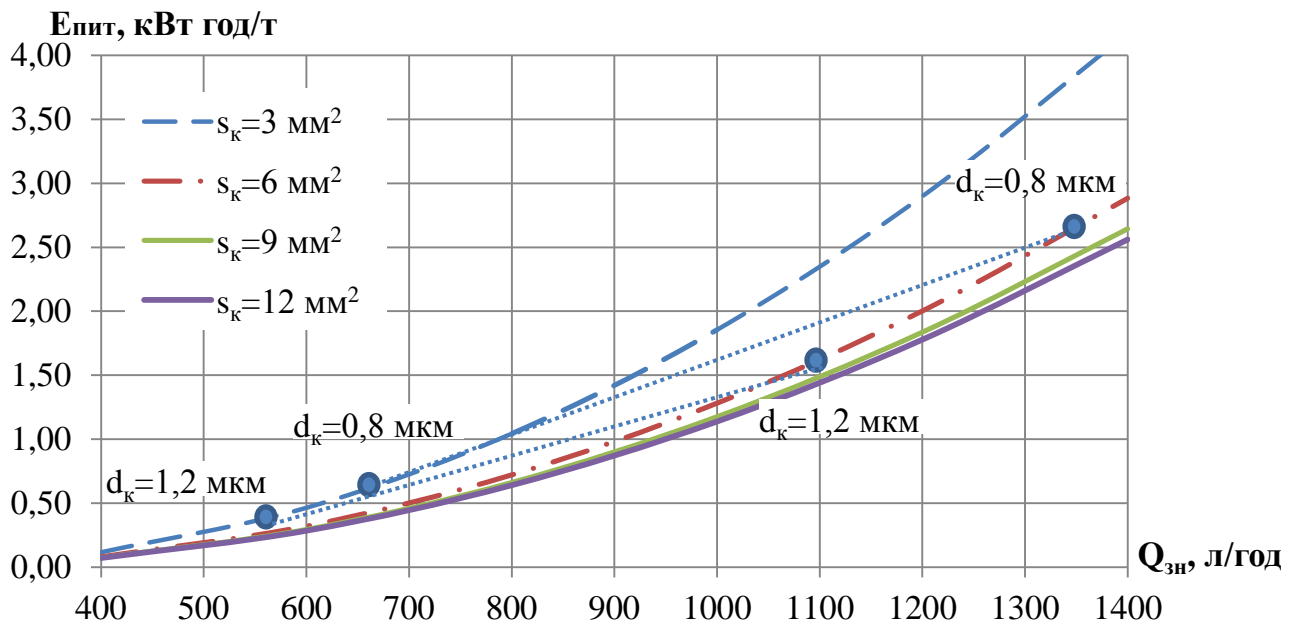


Рис. 5.20. Оптимізація параметрів подачі знежиреного молока $Q_{зн}$ і перерізу робочої камери СГРЖФ s_k (при $d_g=0,8 \text{ мм}$, $N_k=1$, $\mu_g=0,5$, $\mu_k=0,95$, $Ж_b=30\%$, $Ж_{н.м}=3\%$)

При зниженні внутрішнього перерізу камери знижується коефіцієнт витрат камери, що не враховано при побудові останнього графіка, отже дійсні криві рівної дисперсності будуть розташовані більш полого.

Для досягнення середнього розміру жирових кульок 0,8 мкм необхідно забезпечити подачу знежиреного молока 650–1350 л/год і більше при перерізі

робочої камери 3–6 мм². Питомі енерговитрати при таких параметрах не перевищують 2,6 кВт·год/т.

Оптимізація профілю внутрішньої поверхні камери знежиреного молока в зоні подачі вершків показує, що найнижчі енерговитрати забезпечуються при використанні камери коноїдної форми (рис. 5.21).

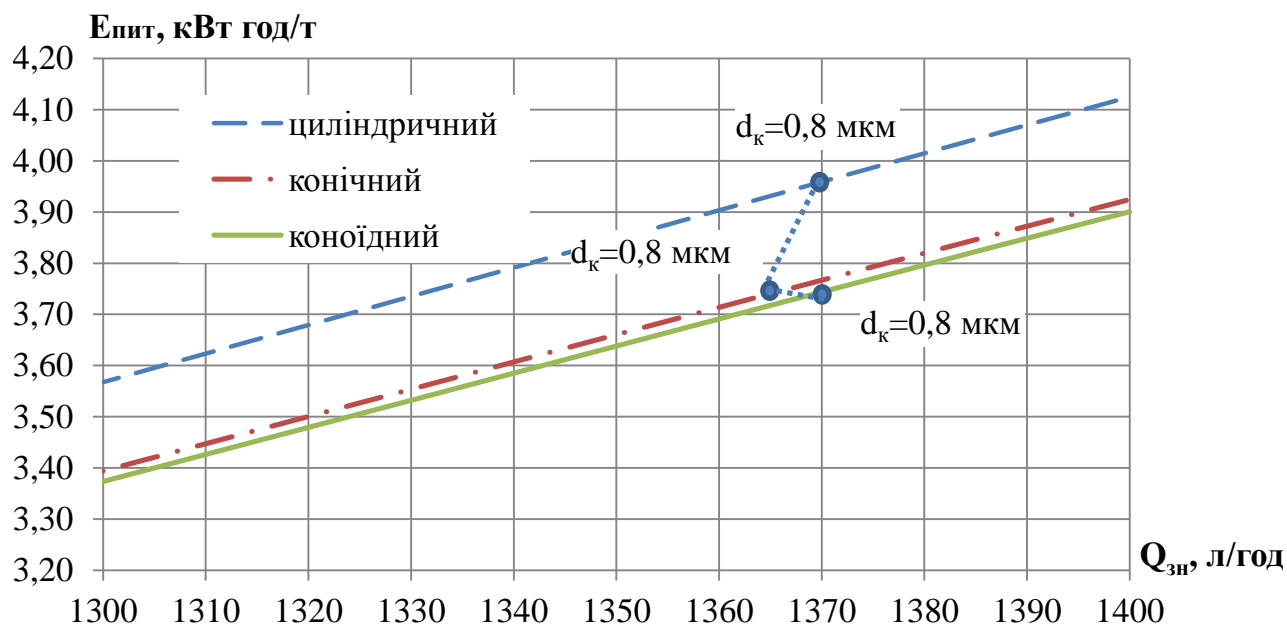


Рис. 5.21. Оптимізація форми внутрішньої поверхні камери СГРЖФ (при $s=6$ мм², $d_e=0,8$ мм, $N_k=1$, $J_{в}=30\%$, $J_{н.м}=3\%$)

У порівнянні з циліндричною формою камери зниження питомих енерговитрат сягає 5–6%, а з конічною – 1–2%. Враховуючи складність виготовлення коноїдальної форми профілю поверхні та незначне зниження питомих енерговитрат циліндричної форми у порівнянні з коноїдальною, раціональним може бути застосування конічної форми внутрішньої поверхні СГРЖФ.

Враховуючи, що $k_c = f(J_{в}, d_e, v_e)$, а $v_e = f(Q_e, \varphi_e, d_e, N_k, J_{н.м})$ характер залежності яких визначається експериментально, то оптимальні значення $J_{в}$, d_e , N_k (а також $J_{н.м}$, якщо існує необхідність у зміні цього фактору) можливо встановити лише після проведення експериментальних досліджень.

5.2.2. Оптимізація параметрів пульсаційного поршньового гомогенізатора

5.2.2.1. Оптимізація частоти і амплітуди коливання поршня

Проведемо графічне визначення оптимальних частоти і амплітуди (радіуса кривошипу) коливання поршня ППГ, для чого проаналізуємо графік $E_{num} = f(n, s)$ (рис. 5.11) з графіком $d_k = f(n, s)$ (рис. 4.15).

При зростанні n і s збільшуються питомі енерговитрати і дисперсність емульсії. Відмітимо на графіку (рис. 5.22) точки рівної дисперсності $d_k=0,8$ мм і $d_k=1,2$ мм.

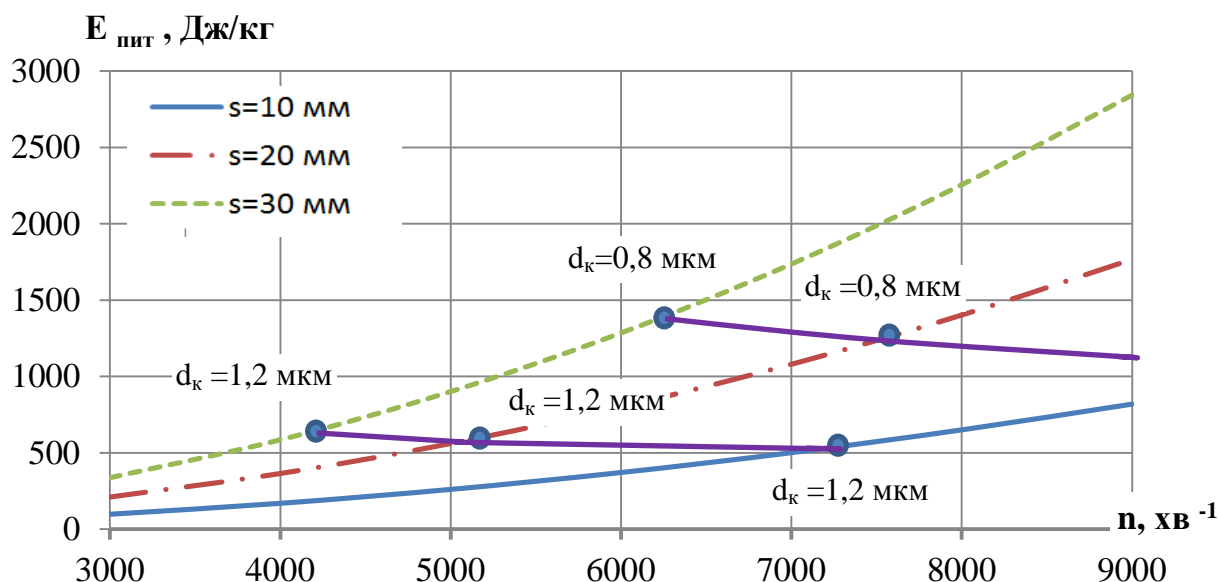


Рис. 5.22. Графік залежності питомих енерговитрат E_{num} від частоти коливання n і амплітуди коливань поршня s ($D_n=60$ мм, $K_o=0,5$, $K_z=100$)

При підвищенні частоти коливань у 2 рази (з 4000 до 8000 хв⁻¹) дисперсність зменшується пропорційно – у 2 рази, а питомі енерговитрати підвищуються у 3,6 разів. При збільшенні амплітуди коливань у 2 рази (з 5 до 10 мм) дисперсність зменшується у 1,4 рази, а питомі енерговитрати підвищуються у 4,3 рази.

Отже за умови отримання мінімальних питомих енерговитрат та максимальної дисперсності раціонально знижувати амплітуду і підвищувати частоту коливань робочого органу ППГ. Для досягнення дисперсності емульсії 0,8 мкм (при $n = 7600\text{--}9000 \text{ хв}^{-1}$ і $s = 12\text{--}20 \text{ мм}$) питомі енерговитрати сягають 1100–1300 Дж/кг (0,3–0,4 кВт·год/т).

5.2.2.2. Оптимізація конструктивних параметрів поршня

Оптимальні параметри поршня ППГ включають його діаметр D_n , товщину h_n і щільність матеріалу ρ_n , кількість N , форму (визначається коефіцієнтом швидкості φ_w і витрат μ отворів) та діаметр отворів поршня d_o .

Для зниження питомих енерговитрат ППГ необхідно (5.63):

- зменшувати h_n і ρ_n ;
- збільшувати коефіцієнт живого перетину поршня K_0 .

Крім того, форма отворів, а саме коефіцієнт витрат отворів μ побічно впливає на опір руху поршня (коефіцієнт C). При збільшенні μ енерговитрати ППГ знижуються.

Для підвищення дисперсності емульсії при обробці в ППГ необхідно (4.93):

- зменшувати K_0 ;
- збільшувати φ_w .

Таким чином, для зниження питомих енерговитрат і підвищення дисперсності емульсії необхідно використовувати поршень з мінімальною товщиною і щільністю матеріалу, а форму отворів поршня обирати з умови максимальних μ і φ . Таким умовам відповідають конічні звужуючі отвори з кутом конусності $45\text{--}55^\circ$ ($\mu = 0,95$ і $\varphi_w = 0,98$) і коноїдальні отвори ($\mu = 0,97$ і $\varphi_w = 0,96$) [83, 172, 184]. Циліндричні отвори мають менші значення $\mu = \varphi_w = 0,82$. Отвори при $h_n < 2d_o$ використовувати нераціонально через низький коефіцієнт витрат $\mu = 0,62$. Для отворів у вигляді конічних звужуючих насадок, циліндричної та коноїдальної форми [227, 298] повинна виконуватись умова

$$h_n/d_{омг} > 3. \quad (5.121)$$

Для отворів у тонкій стінці

$$h_n/d_{омг} < 2. \quad (5.122)$$

З урахуванням зворотньо-поступального руху поршня емульсія крізь отвори поршня може проходити з обох боків, тому форма отворів у поперечному перерізі, наприклад при використанні конічної форми, має вигляд двох обернених конусів (рис. 5.23).

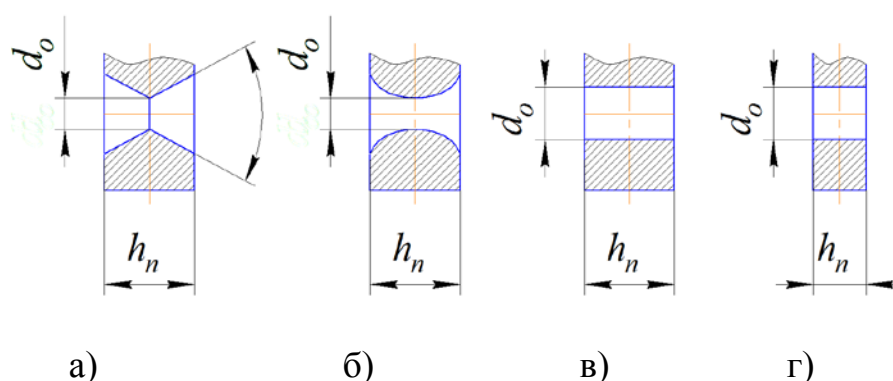


Рис. 5.23. Форми отворів у поршні ППГ гомогенізатора: а) конічна, б) коноїдальна, в) циліндрична, г) отвір у тонкій стінці

Внаслідок використання отворів у вигляді двох конусів (коноїд) мінімальна товщина поршня повинна бути збільшена у 2 рази

$$h_n > 6d_o. \quad (5.123)$$

Для циліндричних отворів і отворів у тонкій стінці товщина поршня визначається з відомих виразів, відповідно

$$h_n > 3d_o, \quad (5.124)$$

$$h_n < 2d_o. \quad (5.125)$$

З підвищенням коефіцієнта гомогенізації ступінь дисперсності знижується (рис. 5.24).

Мінімальний діаметр жирової кульки можливо отримати при використанні форми отворів у вигляді двох конусів з кутом $45-55^{\circ}$, обернених меншими основами назустріч одне одному, коефіцієнт швидкості для яких максимальний ($\varphi_{ш} = 0,98$) [83, 172, 184]. При використанні інших типів отворів (коноїдальних й отвору при $h_n/d_{омг} < 2$) зниження ступеня дисперсності дорівнює 3–5%.

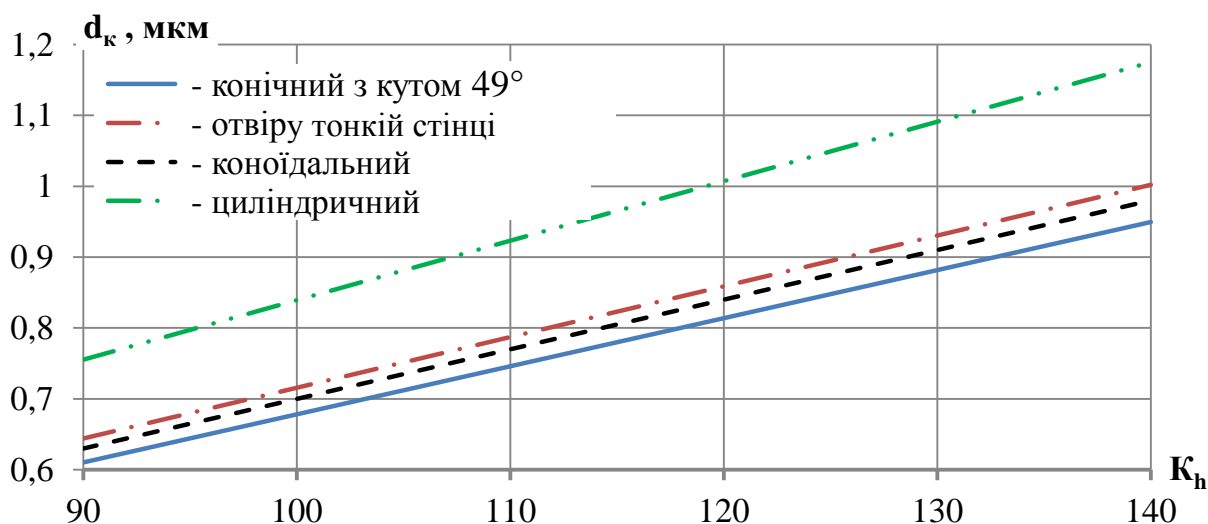


Рис. 5.24. Залежність середнього діаметра жирових кульок d_k від коефіцієнта гомогенізації K_h і форми отворів поршня ППГ (при $r=10$ мм, $n=9000$ об/хв, $K_0=0,4$).

Використання циліндричних отворів з $h_n/d_o > 3$ неефективно, адже внаслідок найменшого значення коефіцієнта швидкості ($\varphi_w=0,64$) середній діаметр жирових кульок підвищується на 24%.

Для підвищення прискорення і збільшення ступеня диспергування необхідно збільшувати φ_w . Найкраще цій умові відповідають отвори з конічними звужуючими насадками, з кутом конусності $\theta=45-55^\circ$, для яких $\varphi_w=0,98$.

Зростання коефіцієнта живого перетину отворів поршня призводить до зменшення швидкості емульсії у отворах поршня, що збільшує дисперсність жирової емульсії (рис. 5.25).

При двократному збільшенні K_0 середній розмір жирових кульок зростає у 1,4 рази. Залежність K_0 для радіуса кривошипів має зворотний характер.

Для конічних і коноїдальних отворів товщина поршня визначається з виразу (5.123). Отже, для мінімізації h_n (зниження маси поршня і, як наслідок, зниження енерговитрат)

$$h_n = 6d_o. \quad (5.126)$$

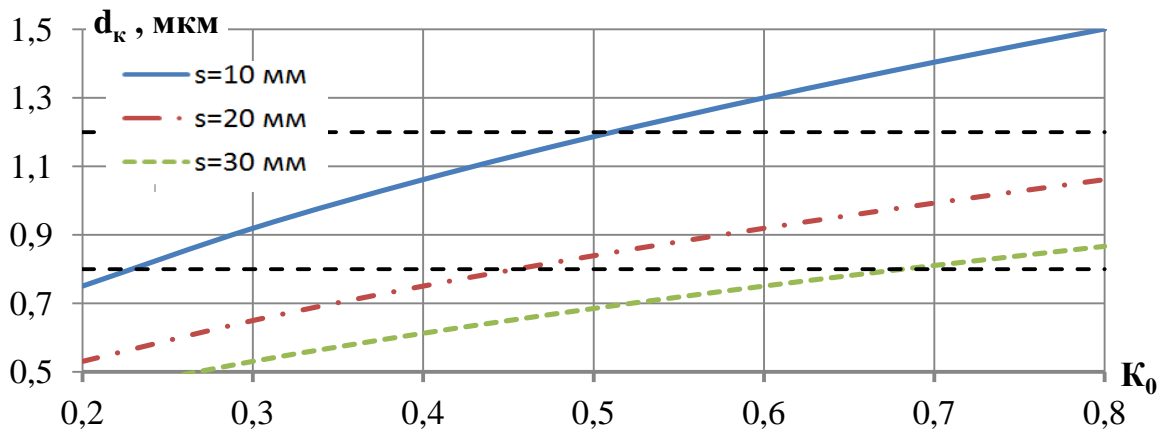


Рис. 5.25. Графік залежності середнього діаметра жирових кульок d_k від амплітуди коливання поршня s ППГ і коефіцієнта живого перетину поршня K_0 ($K_h=100$, $n=150 \text{ c}^{-1}$, $\varphi_{ш}=0,82$).

Вплив K_0 визначимо графічно, аналізуючи графіки $d=f(K_0)$ (рис. 5.25) і $E_{питт}=f(K_0)$ (рис. 5.10). На сумарному графіку (рис. 5.26) показані лінії рівної дисперсності для $d=0,8 \text{ мкм}$ і $d=1,2 \text{ мкм}$, які мають пік енерговитрат у діапазоні $0,4 < K_0 < 0,6$, тому використання поршнів з такими параметрами недоцільно.

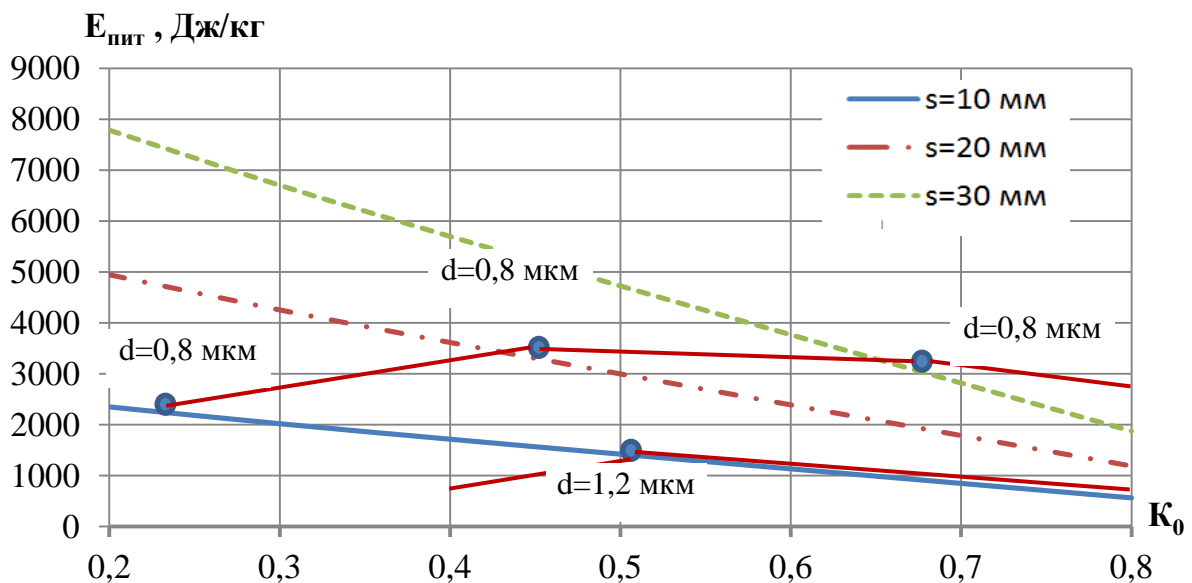


Рис. 5.26. Графік залежності питомих енерговитрат $E_{питт}$ від коефіцієнта живого перетину поршня K_0 і амплітуди коливання поршня s ППГ ($D = 60 \text{ мм}$, $\varphi_{ш}=0,5$, $n=3000 \text{ хв}^{-1}$, $K_z=100$).

При $K_0 > 0,7$ питомі енерговитрати знижуються, але конструктивне виконання поршня з круглими отворами однакового діаметра з такими

значеннями коефіцієнта живого перетину на практиці ускладнене. Суттєве зниження питомих енерговитрат досягається при зниженні K_0 менше 0,4. Це відбувається за рахунок підвищення швидкості в отворах поршня, що підвищує прискорення і дисперсність емульсії. Одночасно з цим підвищуються питомі енерговитрати. Але у діапазоні значень $K_0 < 0,4$ зменшення розмірів жирових кульок відбувається швидше, ніж підвищення енерговитрат. Тому для оптимізації параметрів ППГ доцільно використовувати поршень ППГ з меншими значеннями K_0 і мінімізувати амплітуду його коливання.

При зменшенні K_0 , приймаючи до уваги лінії току рідини при проходженні крізь отвори [83, 120], зростає кількість завихрень і застійних зон, які можуть призвести до погіршення якості емульсії, що не відображено у формулі (4.35). Крім того, при зменшенні коефіцієнта живого перетину отворів підвищується гідравлічний опір руху емульсії в отворах поршня, що також не відображено при розрахунку потужності і питомих енерговитрат. З урахуванням цих факторів графік ліній рівної дисперсності (рис. 5.26), отриманий експериментально, при $K_0 < 0,4$ може не мати такого зниження питомих енерговитрат або навіть показати підвищення $E_{\text{пит}}$.

При використанні конічних отворів поршня з кутом конусності $\theta = 45\text{--}55^\circ$ з товщиною поршня, яка визначається за формулою (5.126), з очевидних геометричних перетворень (рис. 5.27) отримаємо формулу

$$\operatorname{tg} \frac{\theta}{2} = \frac{D_o - d_o}{h_n}, \quad (5.127)$$

де D_o – більший діаметр отвору в поршні, м.

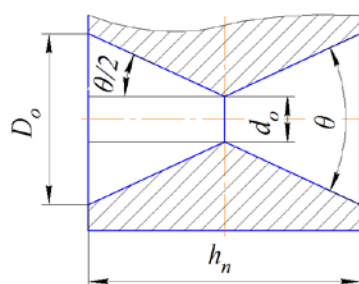


Рис. 5.27. Розрахункова схема для визначення параметрів конічних отворів поршня

Для виконання умови міцності поршня необхідно використання умови

$$\frac{ND_o^2}{D_n^2} \leq 0,9. \quad (5.128)$$

При умові отримання максимальних значень K_o останню формулу запишемо у вигляді

$$\frac{ND_o^2}{D_n^2} = 0,9. \quad (5.129)$$

Таким чином, максимальне значення K_o дорівнює

$$K_o = \frac{0,9}{\left(6 \operatorname{tg} \frac{\theta}{2} + 1\right)^2} = 0,06. \quad (5.130)$$

Для забезпечення міцності поршня, враховуючи необхідність зменшення його щільності і використання для виготовлення поршня харчових пластмас, мінімальна товщина поршня складає 5–6 мм. При цьому діаметр отворів поршня становить 0,8–1,0 мм. При зменшенні d_o підвищується вірогідність облітерації внутрішнього діаметра отворів поршня, що знижує роботоздатність гомогенізатора. Для зменшення облітерації мінімальне значення d_o приймаємо рівним 2 мм. Тоді за формулою (5.127) товщина поршня $h_n = 12$ мм. З формули (5.128) визначимо більший діаметр отворів

$$D_o = h_n \cdot \operatorname{tg} \frac{\theta}{2} + d_o, \quad (5.131)$$

При $d_o = 2$ мм; $h_n = 12$ мм і $\theta = 49^\circ$, $D_o = 7,5$ мм. З формули (5.129) визначимо кількість отворів поршня

$$N = \frac{0,9 D_n^2}{D_o^2}. \quad (5.132)$$

При $D_n = 60$ мм $N = 57$ шт.

Як показують розрахунки (формула (5.131)), значення коефіцієнта живого перетину поршня при використанні конічних звужуючих отворів надто мале. При такому значенні K_o питомі енерговитрати (5.125) підвищуються на істотні 20% у порівнянні з $K_o = 0,9$ (при інших рівних умовах). Тому доцільно розглянути використання циліндричних отворів поршня, для яких

$$h_n = 3d_o. \quad (5.133)$$

Циліндричні отвори більш схильні до облітерації, тому їх мінімальний діаметри прийmemo рівним 5 мм [221, 227]. Для розрахунку таких отворів скористаємося формулами (5.132), вважаючи $D_o = d_o$ і (5.124). При $D_n=60$ мм, $K_o=0,9$; $h_n=15$ мм, $N=130$ шт.

Результати отримані без урахування діаметра штока, тому реальні значення K_o і N будуть меншими.

Як бачимо з розрахунків, при використанні:

– конічних отворів поршня отримаємо значення: $K_o < 0,06$, $\mu = 0,95$ і $\varphi_{ш} = 0,98$;

– циліндричних отворів поршня – $K_o < 0,9$, $\mu = \varphi_{ш} = 0,82$.

Більше ніж на порядок менше значення коефіцієнта живого перетину поршня з конічними отворами призводить до аналогічного підвищення прискорення і, як наслідок, зменшення розмірів жирових кульок емульсії. Цьому сприяє і більш високе значення коефіцієнта швидкості конічних отворів. Але необхідна потужність опору поршня зросте і питомі енерговитрати гомогенізатора можуть зрости більш суттєво, ніж при використанні циліндричних отворів.

У формулі потужності (5.61) при зміні форми і кількості отворів буде змінюватись коефіцієнт опору C і маса поршня, що може призвести до результатів, які відрізняються від прогнозованих. Тому визначати оптимальний варіант форми отворів поршня ППГ слід експериментальним шляхом.

5.3. Оптимізація параметрів роторного пульсаційного апарата

Для визначення оптимальних параметрів ПА з ВР введемо фактор, який характеризує збільшення прискорення емульсії на 1 кВт/т питомих енерговитрат процесу гомогенізації – ефективність гомогенізації E_ϕ [271, 301]

$$E_{\phi} = \frac{a_e}{E_{num}}. \quad (5.134)$$

При збільшенні цього фактору збільшується енергоефективність ПА з ВР. Крім того, E_{ϕ} дає змогу визначити оптимальні параметри ПА з ВР, що графічно показано на рис. 5.28 та 5.29.

Аналізуючи графіки, можна зробити висновок, що найбільш впливовим фактором на ефективність гомогенізації є кількість отворів в роторі і статорі. При збільшенні їх кількості з 4 до 12 ефективність використання енергії в апараті зменшується в 8–11 разів. Ефективність гомогенізації підвищується при збільшенні діаметра ротора, зменшенні кількості отворів та радіусу кривошипу і не залежить від частоти обертання кривошипу.

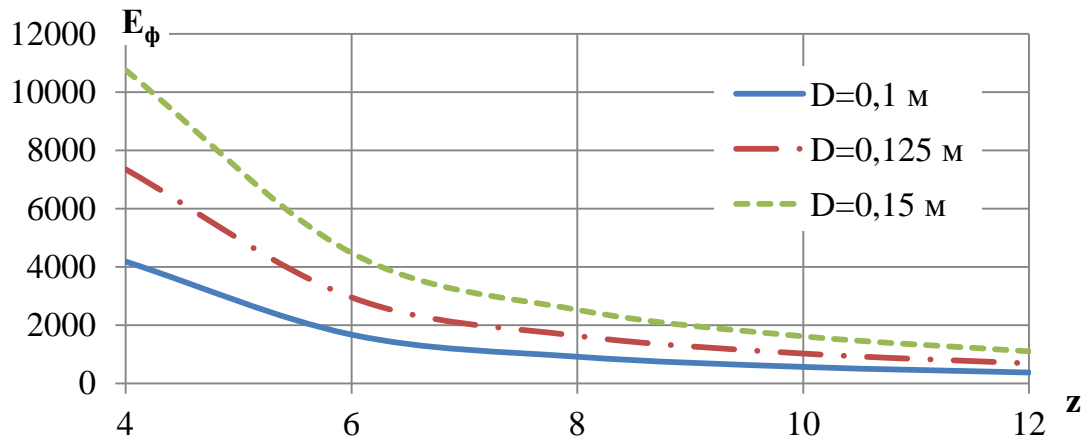


Рис. 5.28. Графік залежності ефективності гомогенізації E_{ϕ} від діаметра ротора D та кількості отворів z в ПА з ВР.

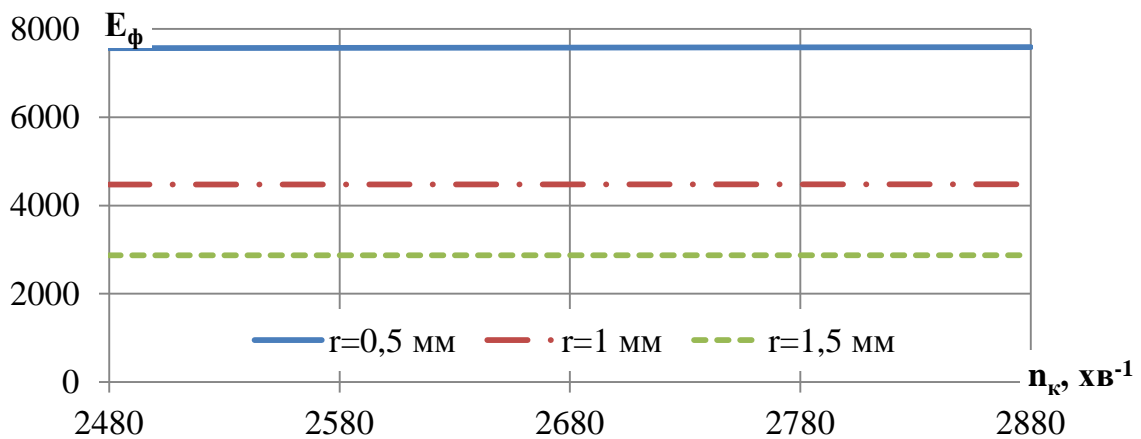


Рис. 5.29. Графік залежності ефективності гомогенізації E_{ϕ} від радіусу кривошипу r та частоти обертання кривошипу n_k .

Отже, при проектуванні ПА з ВР для регулювання ступеня диспергування необхідно змінювати частоту вібрації, кількість отворів зробити мінімальною, а амплітуду вібрації і діаметр ротора зменшувати для отримання необхідної продуктивності.

Акустичні резонансні явища в ПА з ВР. В РПА класичного типу виявлено явище резонансу – збіг частоти вимушених коливань ротора та пульсацій рідини в отворах і пазах ротора. Канал статора є задавальною коливальною системою з розподіленими параметрами. У каналі статора, при певних співвідношеннях, внаслідок віддзеркалення коливань від відкритого кінця в каналі утворюється нерухома хвиля і виникає акустичний резонанс. При роботі пульсаційного апарата в резонансному режимі значно збільшується його ефективність – амплітуда пульсацій рідини збільшується до 4 разів, а витрати енергії зменшуються на 40–60% [330]. Тому важливою задачею проектування апарата з вібруючим ротором є розрахунок апарата для утворення нерухомої хвилі, частота якої співпадає з частотою вібрації ротора.

Акустичні резонансні явища в дослідному апараті виглядають таким чином. При збігу каналів ротора і статора по каналу останнього поширюється імпульс стиску, тобто по каналу переміщається із швидкістю звуку передній фронт імпульсу підвищеного тиску [330]. При віддзеркаленні від відкритого кінця задній фронт імпульсу стискування повертається на початок каналу. При цьому можливі два випадки. Перший - до моменту повернення - канали співпали, в цьому випадку перепад тиску між ротором і статором зростає. Другий - до моменту повернення імпульсу розрядки канал закритий і цей імпульс, змінивши знак, повертається до відкритого кінця каналу, відбивається без втрати знаку і повертається до початку каналу. Якщо канали співпадають, то перепад тиску зменшується. Збільшення перепаду тиску позитивно впливає на розвиток процесу кавітації.

Механізм інтенсифікації диспергування при виникненні резонансу полягає, по-перше, в тому, що щільність енергії нерухомої хвилі в 4 рази більше ніж рухомої. По-друге, кавітуючі пухирці і частки дисперсної фази рухаються в

полі нерухомих хвиль в зустрічних напрямках, що посилює дію кавітації. По-третє, тверді частки прискорюються при русі до пучностей і сповільнюються при наближенні до вузлів тиску, що збільшує відносну швидкість обтікання і кількість взаємних зіткнень.

Кавітація, хоча і не є визначальною в процесі диспергування жирової фази молока, але значно інтенсифікує останню фазу - руйнування деформованих (витягнутих) під впливом градієнту швидкості жирових часток. Тому її інтенсифікація позитивним чином впливає на якість гомогенізації.

У випадку, коли пази ротора співпадають (рис. 5.30), основна частота статора дорівнює [330, 270]

$$f_c = \frac{k \cdot c}{2l_c}, \quad (5.135)$$

де l_c - довжина каналу статора, м;

c - швидкість звуку в двофазному середовищі, м/с;

$k = 1, 2, 3$ тощо.

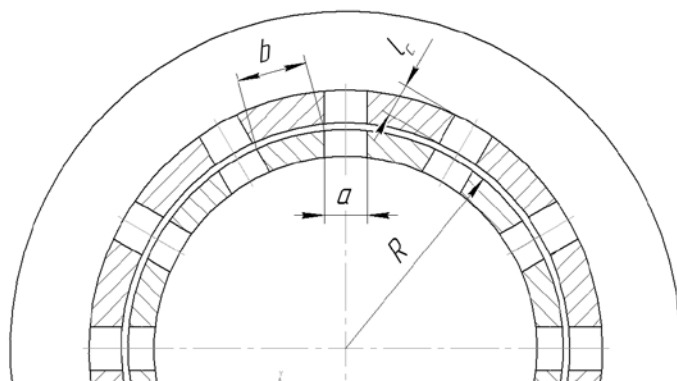


Рис. 5.30. Схема РПА

Якщо канал статора закритий проміжком між каналами ротора, власна частота його коливань визначається з виразу [88, 270]

$$f_k = \frac{k \cdot c}{4l_c}, \quad (5.136)$$

де $k = 1, 3, 5$ тощо.

Крім того, в каналі статора можливий нелінійний резонанс, який визначається за формулами (5.135) і (5.136) з подвоєнням знаменника. Для

корпусу ротора, в першому наближенні, резонансні частоти визначаються виразом (5.136), а також можливістю виникнення нелінійного резонансу. Умовою спільного резонансу в каналі статора і в камері озвучування (модуляторі) є рівність $f_c = f_k$, а частота коливань ротора повинна співпадати з ними $f_p = f_c = f_k$.

Основна частота коливань, що генерована модулятором роторного апарата, визначається так

$$f_m = n_p \cdot z / 60, \quad (5.137)$$

де n – частота обертання ротора, об/хв.;

z – кількість отворів ротора.

Частота резонансних коливань визначається задавальною системою - каналом або камерою озвучування (статором), незалежно від механізму збудження (рівняння (5.137)). Очевидно, найкращий випадок - рівність виразу (5.137) виразам (5.135) або (5.136). Конкретний результат має бути підтверджений експериментально.

Умова виникнення резонансного процесу визначається співвідношенням [330]

$$\tau_1 / \tau_2 = 2; 6; 10; \dots; 4k + 2, \quad (5.138)$$

де τ_1 – час, коли канал статора закритий, с;

τ_2 – час пробігу імпульсу тиску по довжині каналу, с;

$k = 0, 1, 2, 3$ тощо.

Час, коли канал статора закритий, є таким [330]

$$\tau_1 = (a_p + b) / \omega_p R, \quad (5.139)$$

де a_p – ширина каналу ротора, м;

b – ширина зазору між каналами, м;

R – радіус ротора, м.

Час пробігу імпульсу тиску по довжині каналу

$$\tau_2 = l_c / c. \quad (5.140)$$

При умові $\tau_1 = \tau_2$, отримаємо [270]

$$\frac{(a_p + b)}{\omega_p R} = \frac{l_c}{c} (4k + 2). \quad (5.141)$$

Звідки
$$\omega_p = \frac{(a_p + b) c}{R l_c (4k + 2)}. \quad (5.142)$$

Для дослідного ПА з ВР $a_p = b = d_p = \pi D / 2z$. Тому

$$n_p = \frac{60c}{z l_c (4k + 2)}. \quad (5.143)$$

Оптимальна частота обертання ротора, яка визначена у попередньому підрозділі для умови створення резонансного режиму пульсацій, становить $n_p = n_k / z$. Тоді

$$l_c = \frac{60c}{(4k + 2)n_k}. \quad (5.144)$$

Для оптимальної частоти, при якій створюються максимальні умови для руйнування жирових кульок молока ($n_k = 2880$ об/хв), враховуючи, що $c = 140$ м/с

$$l_c = \frac{2,917}{(4k + 2)}. \quad (5.145)$$

Результати розрахунків зведені у табл. 5.1.

Таблиця 5.1

Довжина каналів статора для виникнення стоячої хвилі в ПА з ВР

k	100	110	120	130	140	150	160	170	180	190
$4k + 2$	402	442	482	522	562	602	642	682	722	762
l_c , мм	7,26	6,60	6,05	5,59	5,19	4,85	4,54	4,28	4,04	3,83

Для виникнення явища акустичного резонансу в класичних пульсаційних апаратах радіальний зазор між статором і ротором (для випадку відносно великих зазорів як в дослідному апараті) визначається з виразу [330, 88]

$$\delta = \frac{(0,438...0,435)kD}{z_p}, \quad (5.146)$$

де $k = 1, 2, 3$ і т.д.

Виникнення стоячої хвилі в ПА з ВР призводить до підвищення пульсацій та інтенсивності кавітації, що збільшує ефективність диспергування і гомогенізації.

Отже, досліджені умови виникнення акустичного резонансу в ПА з ВР. Отримано залежності, що дозволяють розрахувати довжину статора та радіальний зазор в ПА з ВР для отримання максимально ефективної гомогенізації молока.

Висновки за розділом 5

1. У результаті аналітичних досліджень знайдені математичні залежності для визначення потужності, продуктивності та питомих енерговитрат ПА з ВР, СГРЖФ та ППГ.

2. Для досягнення дисперсності молочної емульсії 0,8 мкм питомі енерговитрати становлять:

- для ПА з ВР 1,5–1,8 кВт·год/т (при $z=4$, $r=2$ мм і $n_k=2880$ хв⁻¹);
- для СГРЖФ 1,0–1,5 кВт·год/т (при $J_g=30-35\%$, $J_{н.м}=3,2-3,5\%$, $s_k=6$ мм², $d_g=0,8$ мм);
- для ППГ 0,3–0,4 кВт·год/т (при $n = 7600-9000$ хв⁻¹ і $r=6-10$ мм).

3. Аналітично визначені оптимальні конструктивно-технологічні та гідравлічні показники ПА з ВР, СГРЖФ та ППГ для досягнення середньої дисперсності молочної емульсії 0,8–1,2 мкм та мінімальних питомих енерговитрат:

- встановлено, що для підвищення ефективності СГРЖФ необхідно зменшувати переріз і використовувати конічну або коноїдну форму внутрішнього профілю робочої камери, зменшувати подачу знежиреного молока, збільшувати кількість каналів подачі вершків, забезпечувати

мінімально можливу жирність готового продукту (при використанні нормалізації) ;

– визначено, що з умови зниження питомих енерговитрат та підвищення ступеня диспергування ефективно підвищувати дисперсність емульсії ППГ за рахунок збільшення частоти коливань, знижуючи амплітуду коливань поршня ;

– на основі введеного показника коефіцієнта живого перетину отворів поршня ППГ стало можливим встановити раціональні варіанти форми отворів поршня: у вигляді конусів з кутом $45-55^{\circ}$, обернених меншими основами назустріч одне одному або циліндричних отворів;

– для підвищення ефективності ПА з ВР необхідно: збільшення діаметра ротора, зменшення кількості отворів та радіусу кривошип.

4. Досліджені умови виникнення акустичного резонансу в пульсаційному апараті з вібруючим ротором. Отримано залежності, що дозволяють розрахувати довжину статора та радіальний зазор в ПА з ВР, для підвищення ефективності гомогенізації молока.

РОЗДІЛ 6

ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНІ ДОСЛІДЖЕННЯ ГІДРОДИНАМІЧНОГО
ДИСПЕРГУВАННЯ ЖИРОВОЇ ФАЗИ МОЛОЧНОЇ ЕМУЛЬСІЇ6.1 Диспергування під впливом відносних швидкостей руху
дисперсної та дисперсійної фаз в струминному гомогенізаторі6.1.1. Визначення впливу швидкості знежиреного молока та відстані
між направляючими на дисперсність молочної емульсії

У відповідності з методикою проведення експериментальних досліджень (розділ 2) та результатами теоретичних досліджень (підрозділ 3.2) проведені експериментальні дослідження впливу швидкості подачі знежиреного молока в СГРЖФ (рис. 6.1) та порівняння отриманих даних з теоретичними за формулою (3.9) (рис. 3.3).

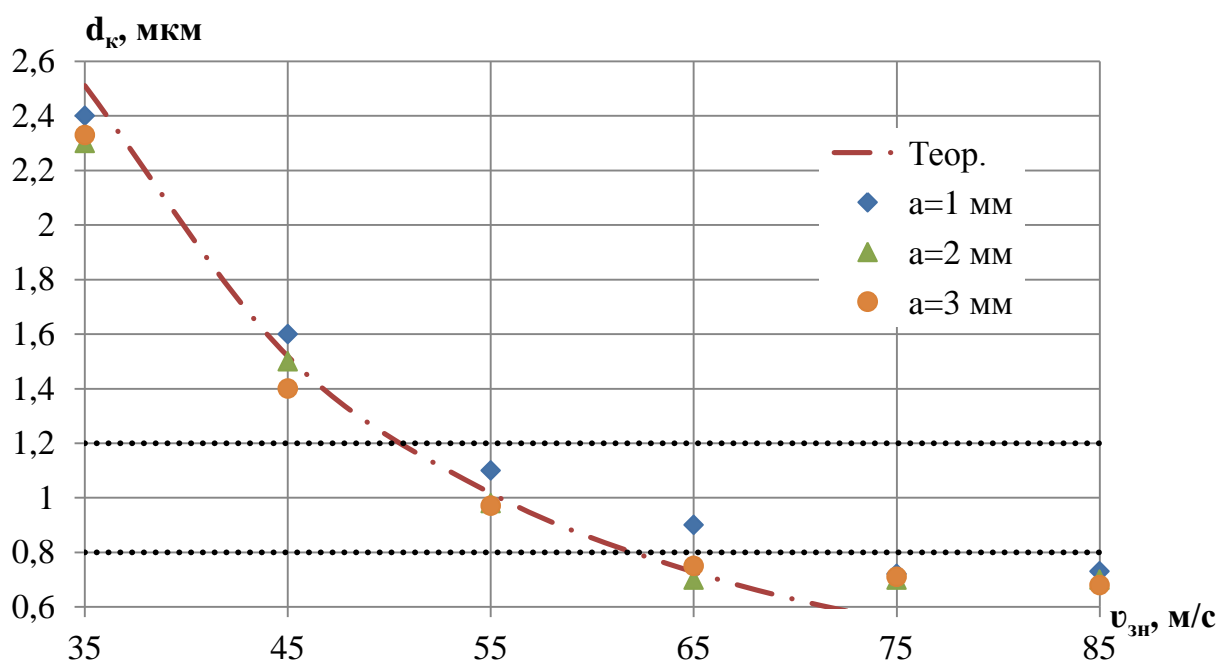


Рис. 6.1. Залежність середнього діаметра жирових кульок d_k від відстані між направляючими СГРЖФ a та швидкості знежиреного молока v_{3n} при $d_e=0,7$ мм, $v_e=80$ м/с, $J_e=30\%$ (для теоретичного графіку прийнято $We_k=130$, $k_c=0,7$)

Як показали отримані дані, зміна відстані між направляючими (площі перетину робочої камери) практично не впливає на дисперсність молочної емульсії, що узгоджується з результатами теоретичних досліджень. Незначне збільшення розмірів жирових кульок при $a=1$ мм (на 2–5%) пояснюється підвищенням коефіцієнта Рейнольдса і турбулізації рідини. Збільшення турбулентності може бути причиною неефективної дисипації потужності, що узгоджується з результатами дослідження струминних апаратів [78, 79]. Для СГРЖФ основним чинником руйнування жирових кульок є швидкість ковзання жирових кульок, яка підвищується при збільшенні швидкості потоку знежиреного молока. Для отриманні середнього розміру жирових кульок 0,8 мкм необхідно забезпечити швидкість знежиреного молока 60–65 м/с.

Експериментальні дані добре співпадають з теоретичними при $We_k=130$, $k_c=0,7$ в діапазоні $35 < v_{zn} < 70$. Але дійсне критичне число Вебера можна розрахувати лише після експериментального визначення коефіцієнта струминного диспергування.

При швидкості більше 70 м/с дисперсність майже не збільшується. Аналогічний характер має графік залежності дисперсності від тиску для клапанної [92] і протитечійно-струминної [264] гомогенізації, що свідчить про подібність механізмів диспергування жирових кульок в них.

6.1.2. Визначення впливу коефіцієнта струминного диспергування на середній розмір жирових кульок молока

Використання вершків більшої жирності підвищує дисперсність гомогенізованої емульсії (рис. 6.2). Це пояснюється підвищенням швидкості ковзання жирових кульок вершків внаслідок зменшення кількості плазми, що подається разом в вершками. На рисунку штрихпунктирною лінією показана залежність між розміром жирових кульок та швидкістю подачі вершків при руйнуванні жирових кульок аналогічно клапанній гомогенізації за формулою Н.В. Барановського. При $v_g > 80$ –100 м/с домінуючим принципом диспергування є клапанний – величина дисперсності близька до розрахованої за формулою (4.14).

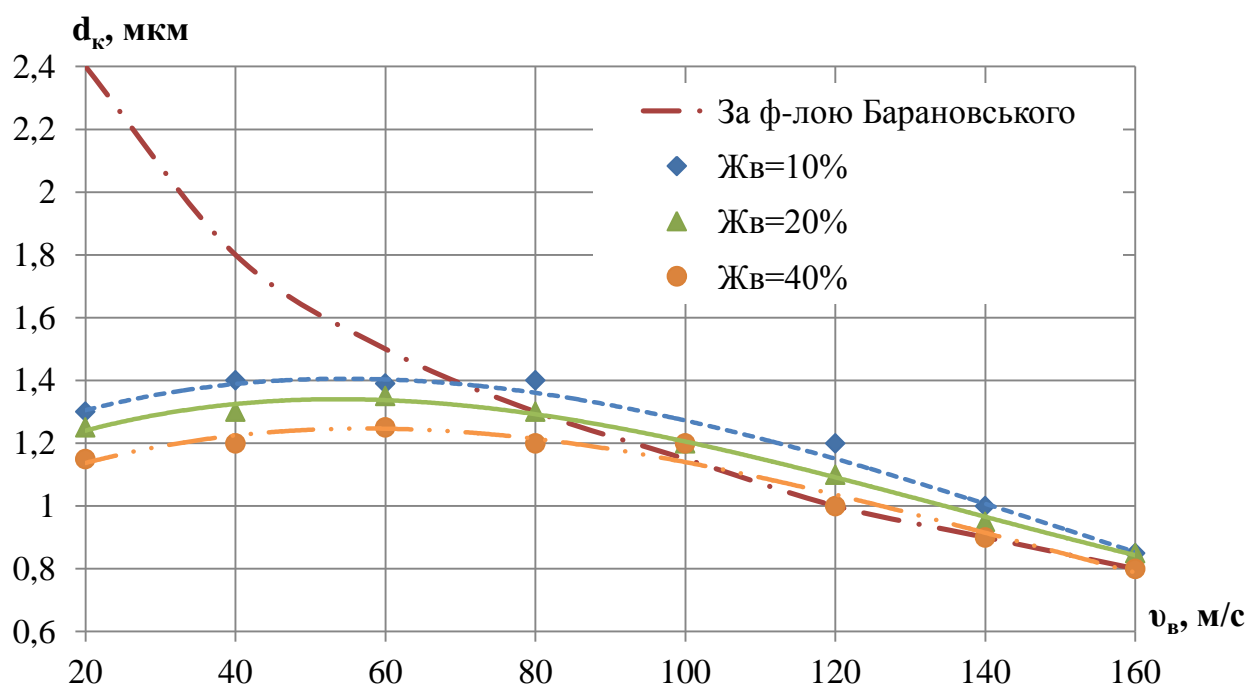


Рис. 6.2. Залежність середнього діаметра жирових кульок d_k від швидкості знежиреного молока $v_{зп}$ СГРЖФ та жирності вершків $Ж_в$ (при $v_{зп} = 60$ м/с).

В діапазоні $40 < v_в < 80$ розміри жирових кульок максимальні, а при $v_в < 30$ м/с зменшуються на 6–10%. Зменшення дисперсності при швидкостях струменя вершків більше 30 м/с можливо пояснити наявністю стійкого потоку вершків, який руйнується лише біля протилежної до розташування каналу вершків стінки камери. В цій зоні швидкість струменя знежиреного молока мінімальна, що обумовлює менші значення швидкості обтікання жирових кульок.

Якщо не враховувати диспергування по типу клапанної гомогенізації, яке енергетично неефективне (в діапазоні $20 < v_в < 80$ м/с), найбільшого ступеня гомогенізації в СГРЖФ можливо досягти при $v_в < 20$ м/с. Шляхом прогнозування засобами табличного процесора Excel при $v_в < 5–10$ м/с коефіцієнт впливу швидкості потоку вершків СГРЖФ має максимальне значення $k_{сш} = 1$. При $40 < v_в < 80$ $k_{сш} = 0,75–0,80$, а при $20 < v_в < 40$ $k_{сш} = 0,8–0,85$.

Зменшення діаметра каналу вершків призводить до зменшення розмірів жирових кульок молока (рис. 6.3).

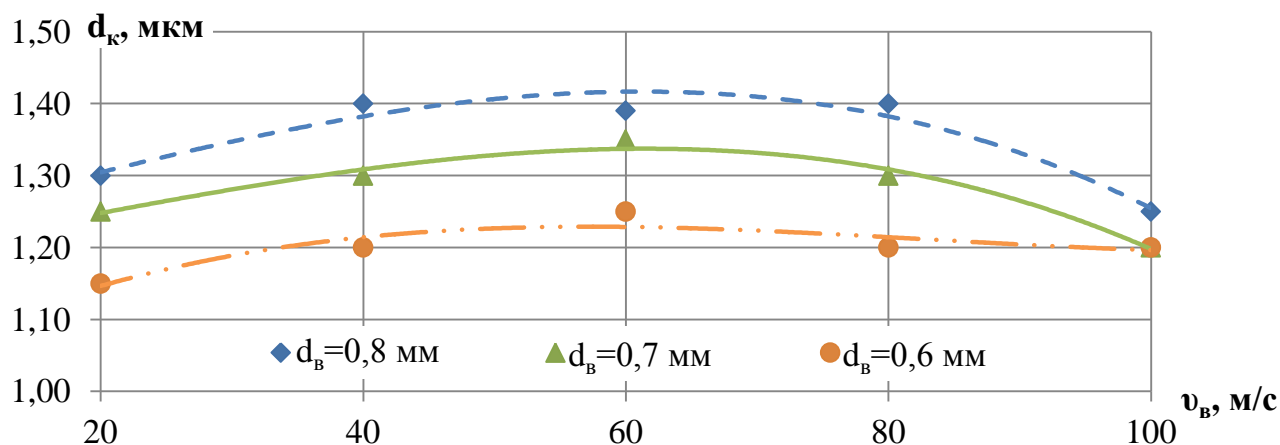


Рис. 6.3. Залежність середнього діаметра жирових кульок d_k від швидкості v_B і діаметра каналу подачі молочних вершків d_B СГРЖФ (при $v_{zn}=60$ м/с).

Це відбувається внаслідок зменшення центральної зони струменя вершків зі зниженою швидкістю обтікання жирових кульок (рис. 3.2). Зменшення діаметра каналів з 0,8 до 0,6 мм призводить до підвищення дисперсності на 8–10%. Логічно припустити, що максимальну швидкість обтікання можливо отримати при входженні в потік знежиреного молока лише однієї жирової кульки. При цьому максимальне значення коефіцієнта впливу діаметра каналу жирової фази k_{cd} буде при $d_e=d$. Але перевірка цього припущення на практиці викликає труднощі. Прогнозування, виконане засобами Microsoft Excel (рис. 6.4), показує, що при $d_e=d$ середній розмір жирових кульок дорівнює 0,26 мкм, отже $k_{cd}=1$ при $d_e=0,26$ мм.

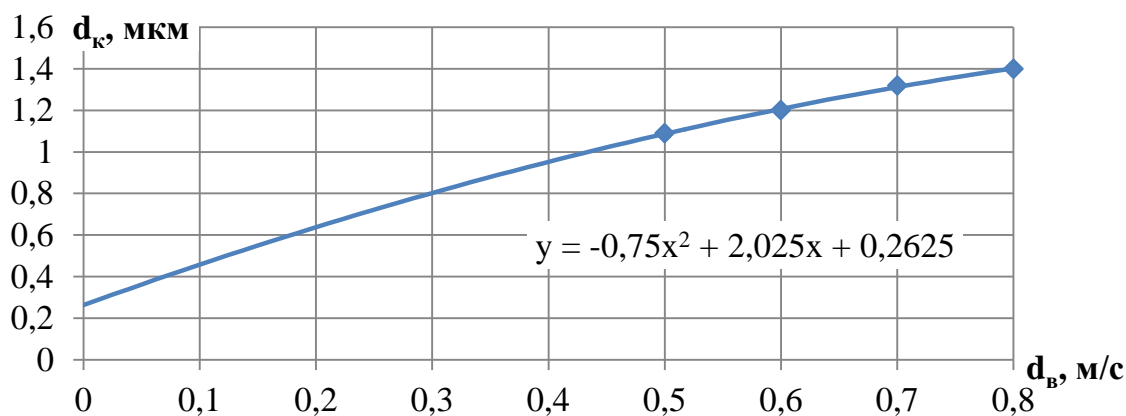


Рис. 6.4. Прогнозування середнього розміру жирових кульок молока d_k для $d_e < 0,5$ мм.

Тоді формула для визначення k_{cd} має вигляд

$$k_{cd} = \sqrt{\frac{0,26}{2,025d_e - 0,75d_e^2 + 0,2625}} \quad (6.1)$$

Наприклад:

– при $d_e=0,6$ мм $k_{cd}=0,46$;

– при $d_e=0,7$ мм $k_{cd}=0,44$;

– при $d_e=0,8$ мм $k_{cd}=0,43$.

Графік залежності дисперсності емульсії від жирності вершків (рис. 6.5) свідчить про зниження темпів зменшення розмірів жирових кульок при підвищення жирності вершків.

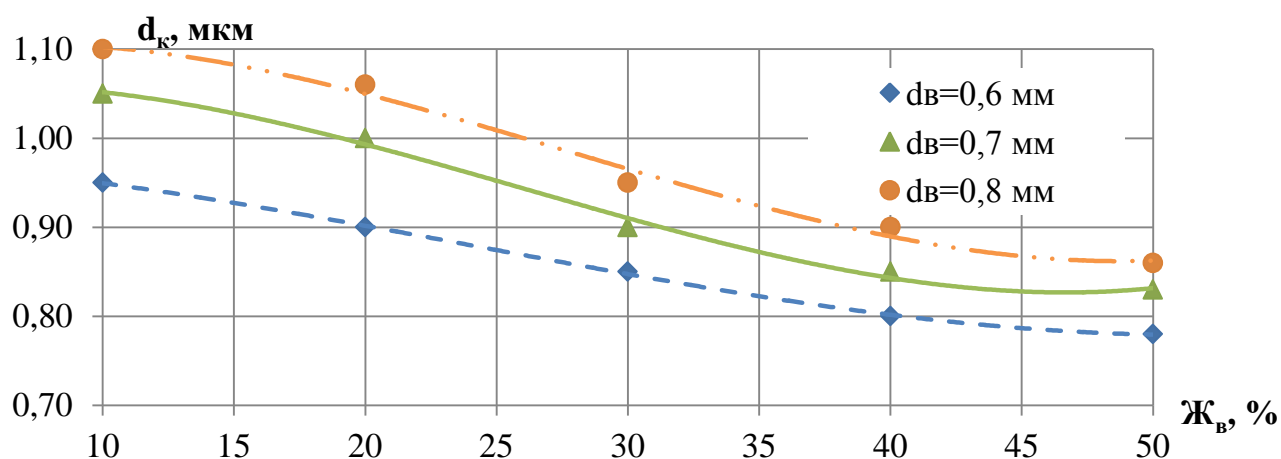


Рис. 6.5. Залежність середнього діаметра жирових кульок d_k від діаметра каналу подачі вершків d_e СГРЖФ та жирності вершків J_v (при $v_{zn}=80$ м/с)

При жирності вершків більше 40% дисперсність емульсії практично не зменшується. Прогнозована мінімальна дисперсність молока досягається при $J_v=45-55\%$, де коефіцієнт $k_{cжс}=1$. Для інших значень жирності вершків $k_{cжс}$ СГРЖФ наведені на графіку (рис. 6.6). В діапазоні $J_v > 30\%$ значення коефіцієнта жирності струминного диспергування не відрізняються для різних d_e . При $J_v < 30\%$ істотний вплив спричиняє висока турбулентність потоку і механізми руйнування, пов'язані з руйнуванням турбулентними завихреннями, тому значення $k_{cжс}$ для $d_e=0,8$ мм збільшуються на 2–4% у порівнянні з $d_e=0,6$ мм.

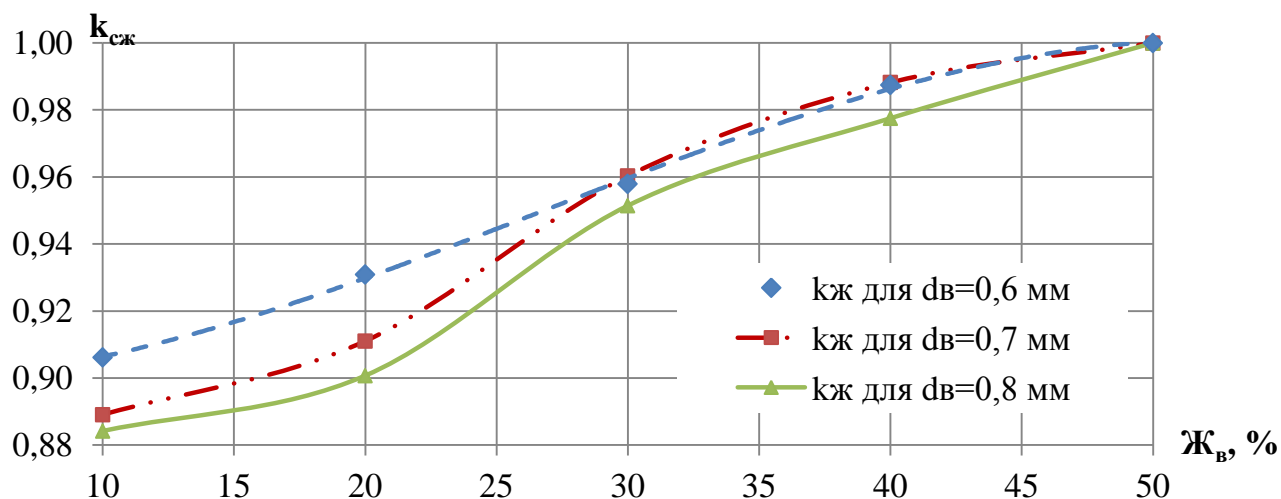


Рис. 6.6. Залежність коефіцієнта жирності вершків для СГРЖФ $k_{сж}$ від жирності вершків $Ж_{в}$, % (при $v_{зн}=80$ м/с)

Отже, для підвищення ступеня диспергування необхідно зменшувати діаметр каналу подачі вершків, використовувати вершки жирністю 30–50% і забезпечувати швидкість подачі вершків менше 30–40 м/с або більше 80–100 м/с.

Таким чином для даних, показаних на рис. 6.1, коефіцієнт струминного диспергування буде рівним (при $k_{cd}=0,44$; $k_{су}=0,75$; $k_{сж}=0,96$) $k_c = 0,44 \cdot 0,75 \cdot 0,96 = 0,32$. Критичне число Вебера, що відповідає експериментальним даним, дорівнює $We_{\kappa}=28$. Порівняно з протитечію-струминною гомогенізацією ($We_{\kappa}^c=500$ [264]) це значення значно менше. Але пряме порівняння цих значень некоректне внаслідок використання модифікованого критерія Вебера для протитечію-струминної гомогенізації – тобто такого We_{κ} , де замість швидкості ковзання жирової кульки використана швидкість потоку молочної емульсії.

За отриманими даними критичного значення критерія Вебера та формули (4.13) коефіцієнт гомогенізації для СГРЖФ буде дорівнювати

$$K_h = \sqrt{\frac{28 \cdot 0,024 \cdot 0,1}{8 \cdot 980}} \sqrt[3]{\frac{6}{3,14}} = 3,3 \cdot 10^{-3} \text{ м}^{3/2}/\text{с}.$$

6.1.3. Локалізація зони максимальної швидкості для подачі вершків

Для перевірки формули (3.14) для визначення оптимальної координати подачі вершків в СГРЖФ провели дослідження, які підтверджують існування оптимальної зони, де дисперсність емульсії молока найбільша (рис. 6.7).

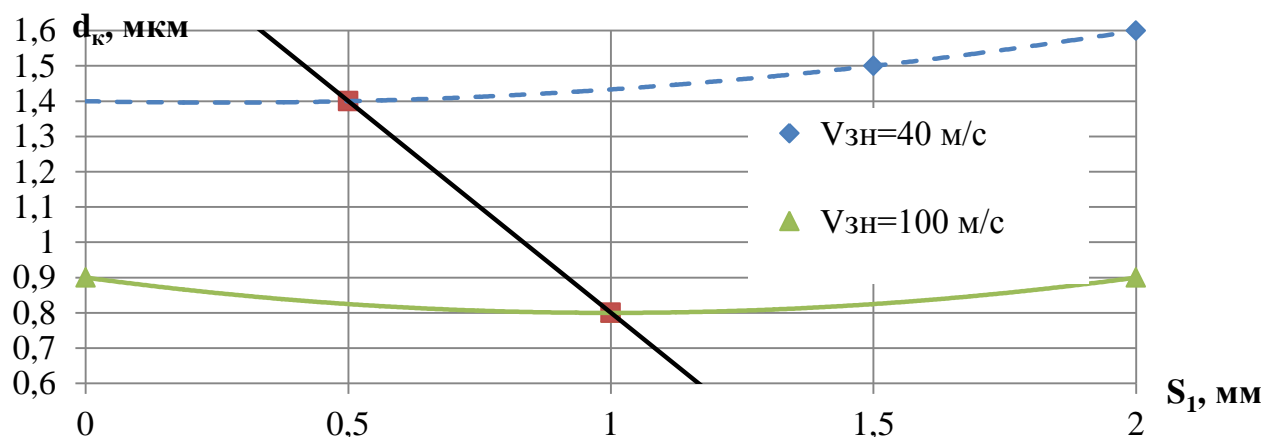


Рис. 6.7. Середній діаметр жирових кульок d_k в залежності від координати подачі вершків S_1 і швидкості подачі знежиреного молока $v_{зн}$.

Для побудови графіка швидкість знежиреного молока виражали через надлишковий тиск за формулою (5.5). При відхиленні точки введення жирової фази на 1 мм спостерігається зниження дисперсності молочної емульсії в середньому на 0,1 мкм.

6.2 Диспергування жирової фази молока під впливом прискорення руху молочної емульсії в умовах багатократної обробки і резонансних явищ

6.2.1. Експериментальні дослідження впливу прискорення емульсії на дисперсні показники жирової фази молока в процесі пульсаційної гомогенізації

6.2.1.1 Вплив амплітуди і частоти коливань поршня пульсаційного гомогенізатора на дисперсність жирової фази молока

У відповідності з розробленою програмою експериментальних досліджень (підрозділ 2.5) з використанням розробленої установки ППГ був

проведений експеримент для визначення впливу амплітуди і частоти коливання поршня на середній розмір жирових кульок молока при використанні поршня з циліндричними (рис. 6.8) і конічними (рис. 6.9) отворами.

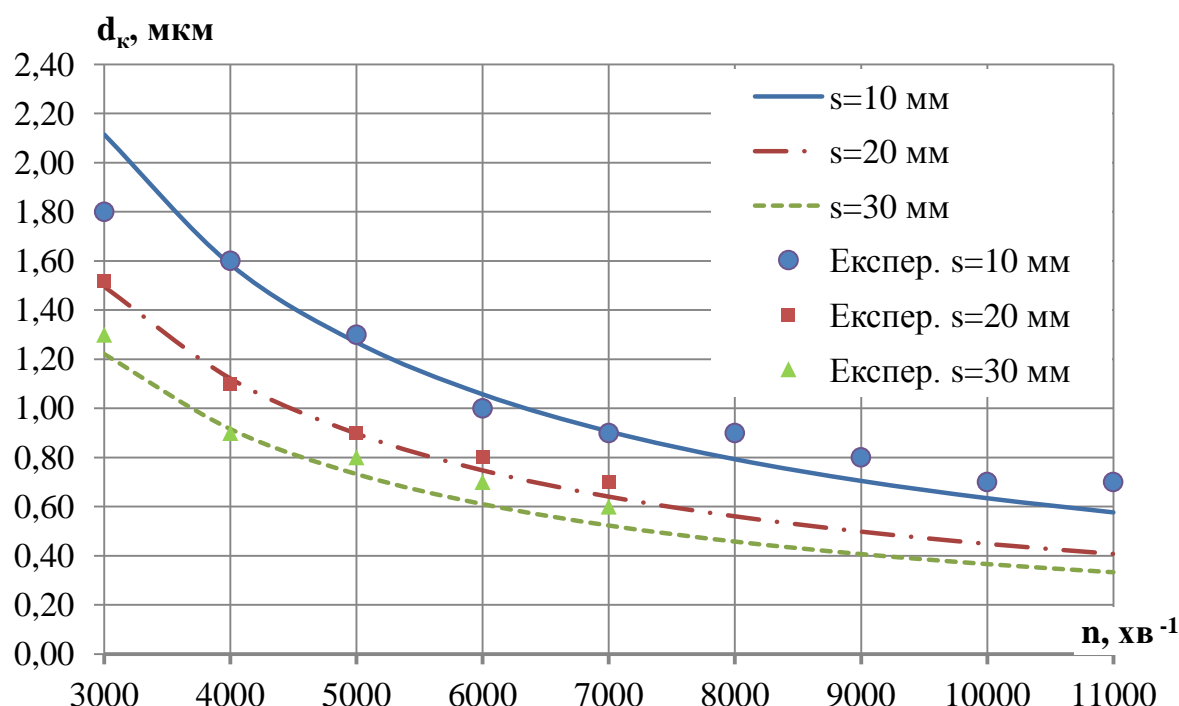


Рис. 6.8. Співставлення аналітичних і експериментальних даних впливу амплітуди s і частоти n коливання поршня ППГ на середній діаметр жирових кульок молока d_k для конічних отворів поршня (при $D_n=60$ мм; $K_o=0,04$; $\varphi=0,96$).

Використано поршень діаметром 60 мм з діаметром штока 10 мм. Було застосовано отвори циліндричної форми діаметром 5 мм і конічні отвори з діаметрами 2 і 7,5 мм. Товщина поршня склала 15 мм при використанні отворів циліндричної та 12 мм – конічної форми. Щільність матеріалу поршня – 1500 кг/м^3 . В формулі (3.12) використані коефіцієнти $K_o=0,48$ для циліндричних і $K_o=0,04$ для конічних отворів.

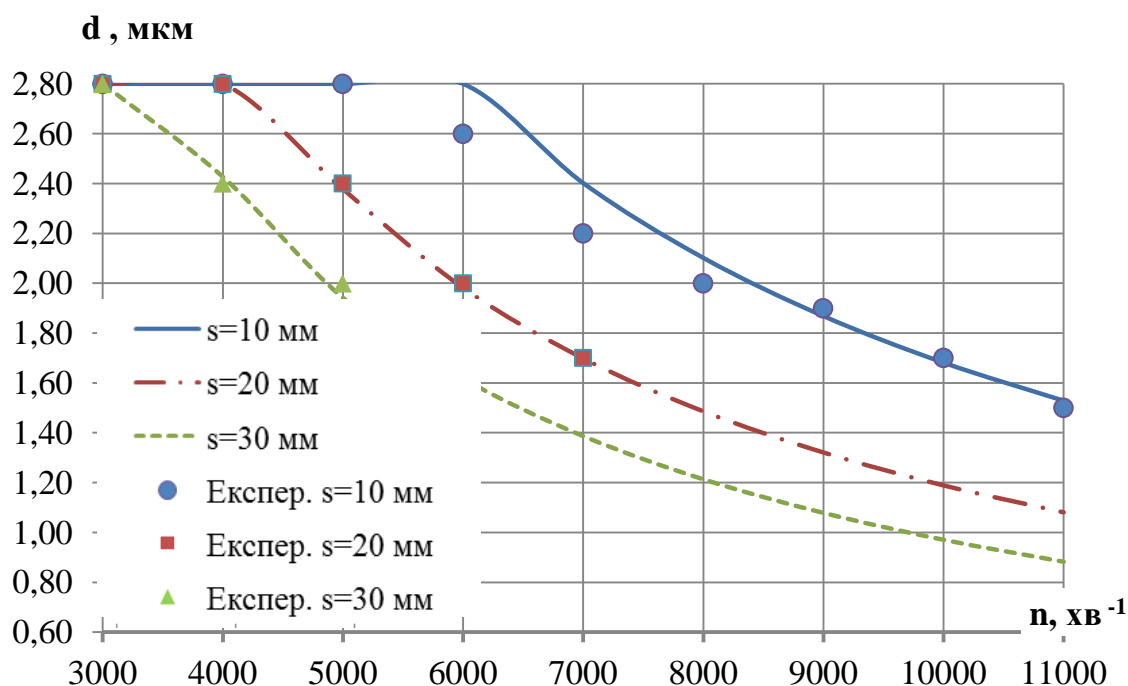


Рис. 6.9. Співставлення аналітичних і експериментальних даних впливу амплітуди s і частоти n коливання поршня в ППГ на середній діаметр жирових кульок молока d для циліндричних отворів поршня (при $D_n=60$ мм; $K_o=0,48$; $\varphi=0,82$)

Продуктивність гомогенізатора за результатами кожного дослідження визначалась на основі формули (4.40) для отримання рівної кратності обробки емульсії ($K=12$)

$$Q = \frac{\pi D_n^2 s n}{20}. \quad (6.2)$$

На графіках (рис. 6.8, 6.9) крім експериментальних даних показані теоретичні криві згідно формули (4.51) при $K_n=0,225 \cdot 10^{-3} \text{ м}^3/\text{с}$. Коефіцієнт детермінації для кожного графіку не менше 94%, що свідчить про добре співпадіння експериментальних даних з теоретичними в діапазоні $0,7 \leq d_k \leq 2,6$ мкм.

6.2.1.2. Залежність прискорення руху потоку емульсії та дисперсності жирової фази молока

Результати, отримані при побудові графіків (рис. 6.7 і 6.9) за допомогою формул (4.43) і (4.50) представимо у вигляді залежності $d=f(a_e)$ (рис. 6.10).

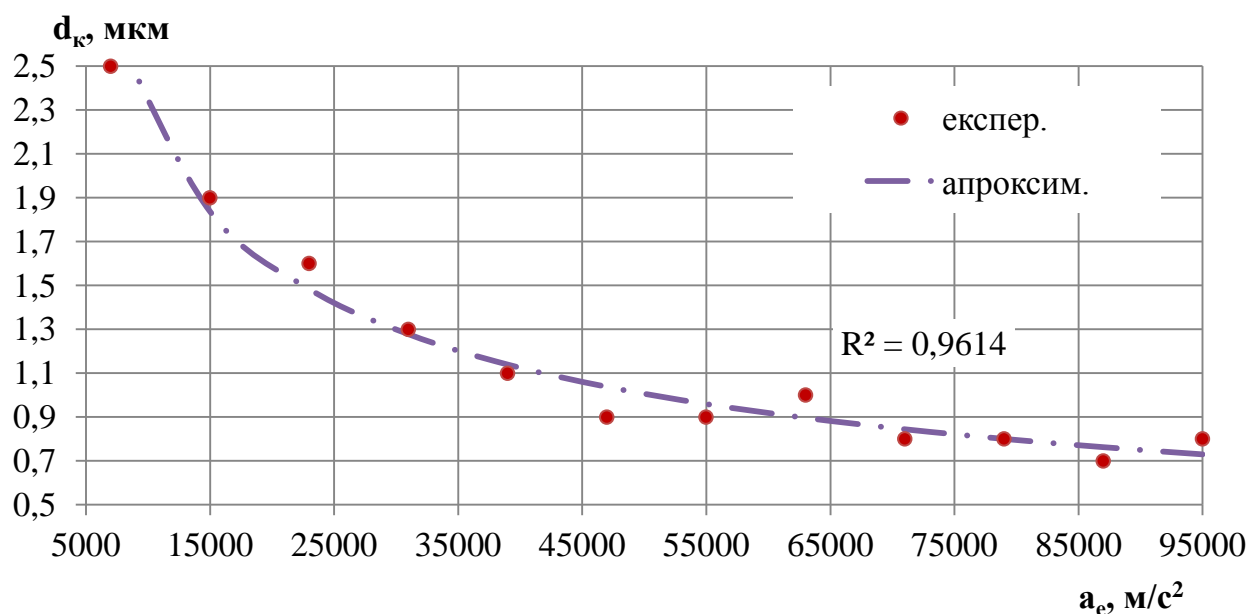


Рис. 6.10. Залежність середнього діаметра жирових кульок d_k від максимального прискорення потоку емульсії в отворах поршня ППГ $a_{o \max}$.

Отримані дані показують високу кореляцію ($R^2 > 0,96$) між прискоренням потоку емульсії та середнім діаметром жирових кульок після обробки в ППГ, що доводить гіпотезу, про те, що основний фактор руйнування жирових кульок молока в ППГ – прискорення потоку молочної емульсії.

6.2.1.3. Залежність дисперсності жирової фази молока та кратності її обробки

Для зміни кратності обробки – кількості проходжень одного об'єму емульсії крізь отвори поршня – змінювали подачу молока у робочу камеру ППГ у відповідності з формулою (4.40) варіюванням s і n , змінюючи прискорення емульсії у відповідності з формулами (4.35) і (4.43).

При підвищенні кратності обробки відбувається підвищення середньої дисперсності емульсії (рис. 6.11).

При $K < 4$ спостерігається підвищення розміру жирових кульок, що пояснюється значною нерівномірністю обробки емульсії. При цьому частина об'єму продукту проходить крізь отвори поршня ППГ без набуття необхідного для диспергування прискорення.

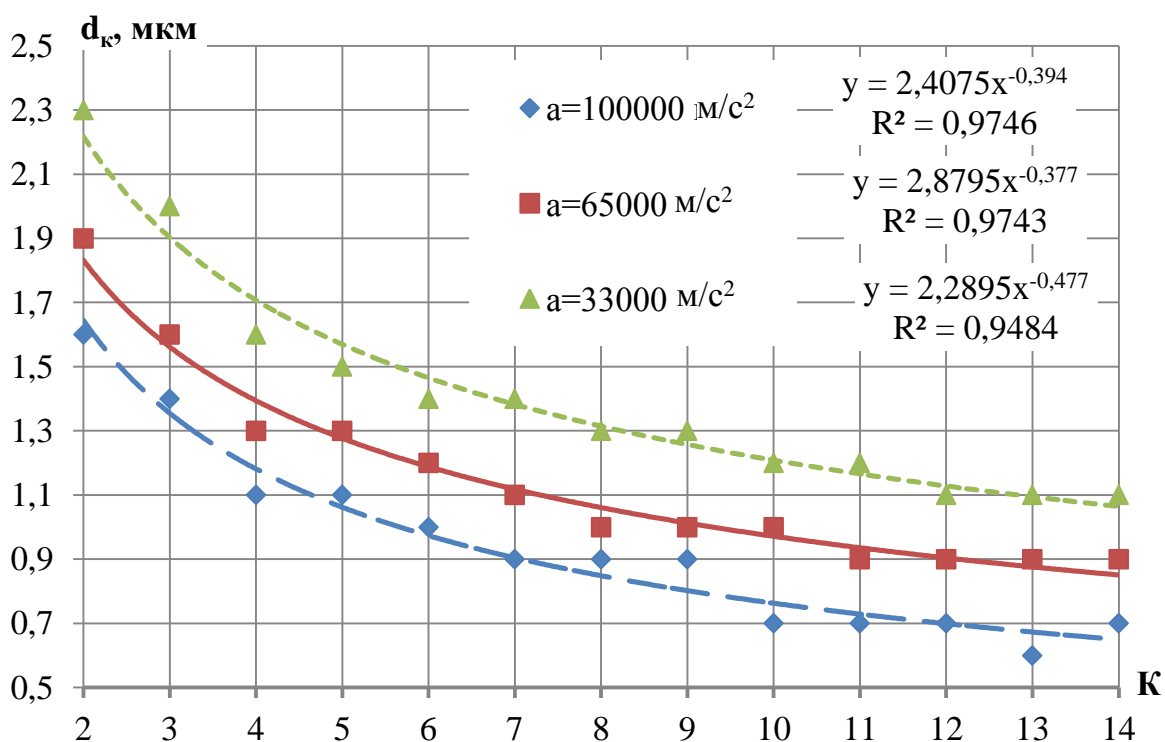


Рис. 6.11. Залежність середнього діаметра жирових кульок після обробки в ППГ d_k від кратності обробки K .

Підвищення дисперсності відбувається до значень $K=12$. А при $K>12$ середній діаметр жирових кульок майже не зменшується. Характер зміни дисперсності в залежності від кратності обробки подібний до клапанної гомогенізації, але має характерну особливість – помітне зростання графіку при $K \leq 4$.

Зважаючи на пропорційну залежність питомих енерговитрат від кратності обробки (формула (5.62)), оптимальна кратність обробки повинна бути найменша, але для її визначення недостатньо даних по визначенню середнього розміру жирових кульок молока. Необхідно визначити рівномірність дисперсного складу емульсії. При високій нерівномірності прискорення шарів емульсії, які проходять крізь отвори ППГ при $K < 4$, слід очікувати також високий ступінь нерівномірності дисперсного складу емульсії після обробки. Мірою рівномірності розподілу розмірів часток є коефіцієнт варіації V , тому були досліджені зміни коефіцієнта варіації розмірів жирових кульок від кратності обробки (рис. 6.12).

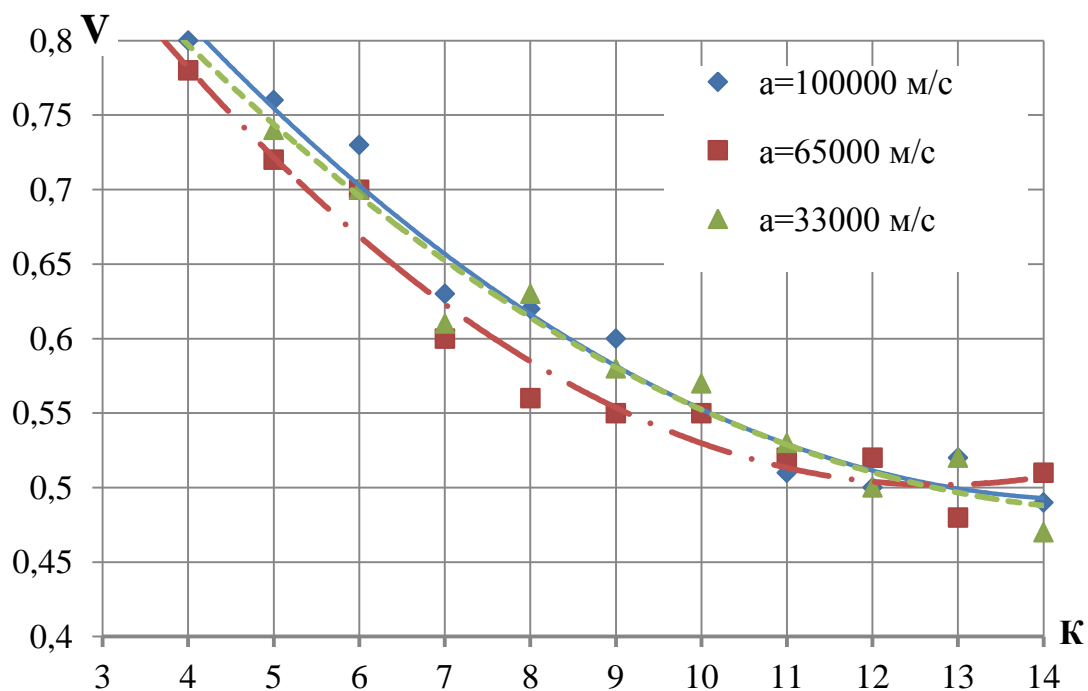


Рис. 6.12. Залежність коефіцієнта варіації V розміру жирових кульок від кратності обробки K та прискорення потоку емульсії a_{max} при гомогенізації в ППГ

Отримані дані за характером близькі до залежностей $d_k=f(K)$. Коефіцієнт варіації майже лінійно зростає при $K < 7$ для всіх значень прискорень. При $7 \geq K \geq 12$ значення V зменшуються повільніше у діапазоні 0,5–0,6. Значення, характерні для емульсії з достатньої рівномірністю дисперсного складу є $V < 0,5$. Ці значення коефіцієнта варіації є типовими для емульсії, обробленої в різних типах гомогенізаторів [217, 221, 264]. Дисперсний склад емульсії ППГ набуває достатньої рівномірності ($V < 0,5$) при $K \geq 12$. Таким чином мінімально необхідною кратністю обробки молочної емульсії в ППГ, за якою досягається достатня рівномірність дисперсного складу молока є $K=12$.

6.2.1.4. Вплив коефіцієнта живого перетину поршня на дисперсність жирової фази молока

Для експериментальних досліджень впливу коефіцієнта живого перетину отворів поршня ППГ на дисперсність молочної емульсії у

відповідності з результатами теоретичних досліджень (п. 5.2.2.2) були виготовлені поршні з циліндричними та конічними отворами. Параметри поршнів з конічними отворами: $D_n=60$ мм, $\theta=49^\circ$, $\mu=0,95$ і $\varphi=0,98$, $D_o=7,5$ мм, $d_o=2$ мм, $h_n=12$ мм. Перший поршень з $N=36$ шт і $K_o=0,04$ (рис. 6.13. а) і другий поршень з $N=18$ шт і $K_o=0,02$ (рис. 6.13 в).

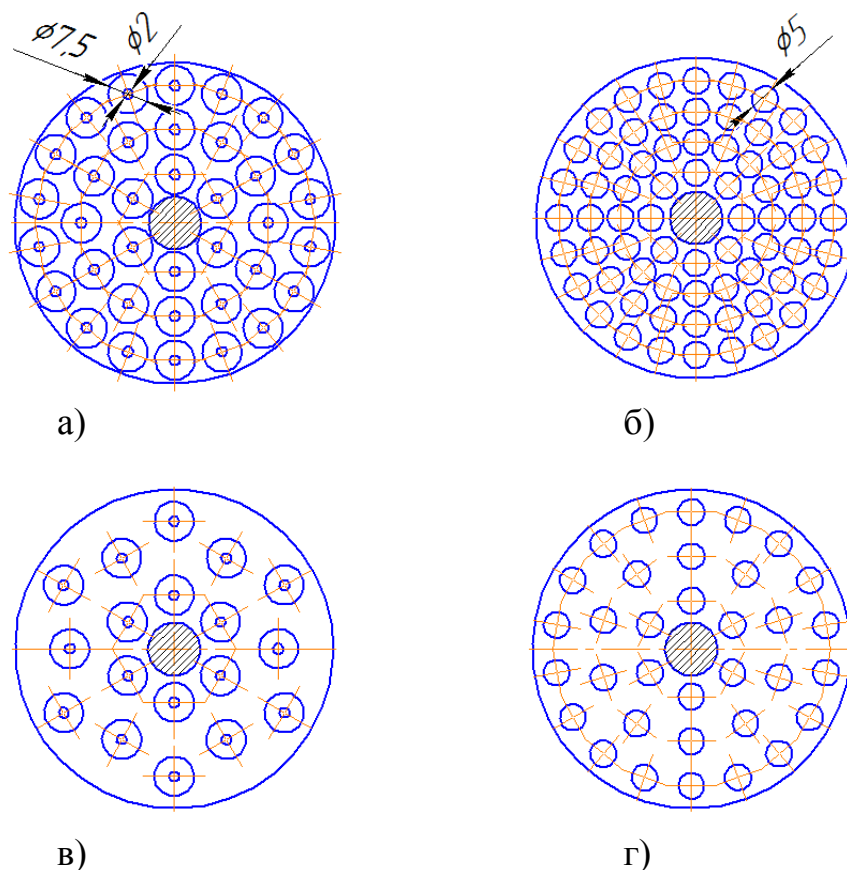


Рис. 6.13. Розташування отворів в поршнях конічної а) з $N=68$ і в) з $N=34$ та циліндричної форми б) з $N=36$ і г) з $N=18$.

Параметри поршнів з циліндричними отворами: $D_n=60$ мм, $\mu=\varphi=0,82$, $d_o=5$ мм, $h_n=15$ мм. Перший поршень з $N=68$ шт (рис. 6.13. б) і $K_o=0,48$ і другий поршень з $N=34$ шт і $K_o=0,24$ (рис. 6.13 г).

Проведені експериментальні дослідження (рис. 6.14) свідчать про збільшення розмірів жирових кульок по відношенню до теоретичних розрахунків за формулою (4.51).

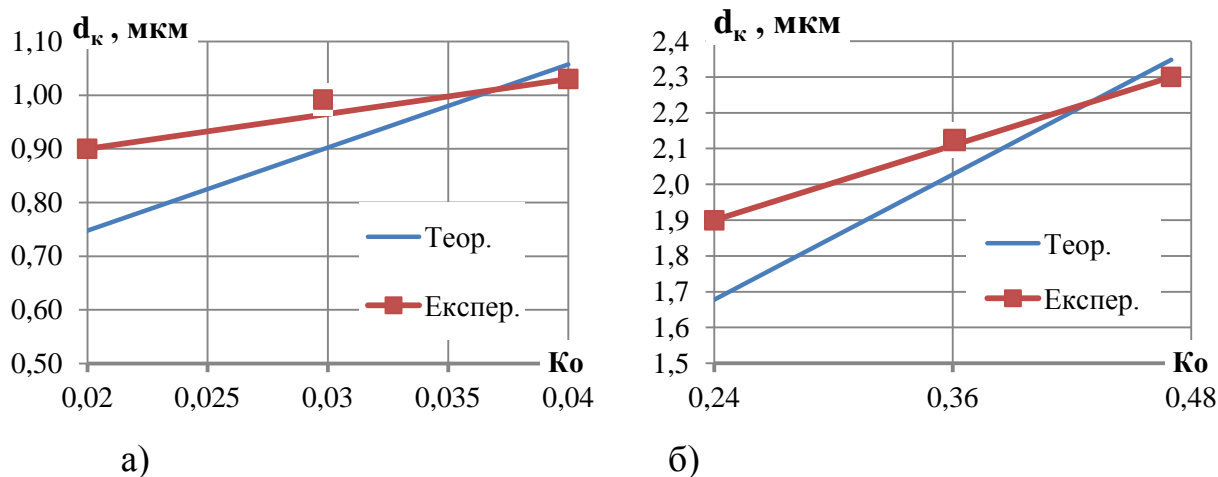


Рис. 6.14. Залежність середнього діаметра жирових кульок d_k від коефіцієнта живого перетину поршня K_0 для а) конічних отворів при $n=6000 \text{ хв}^{-1}$, $s=10 \text{ мм}$ б) циліндричних отворів при $n=9000 \text{ хв}^{-1}$, $s=10 \text{ мм}$.

Як показали дані дослідження при зменшенні K_0 у 2 рази відхилення експериментальних значень від теоретичних сягає 18% у разі використання циліндричних і 13% – конічних отворів. Зменшення дисперсності емульсії при зменшенні K_0 у 2 рази для конічних отворів на 5% більше, ніж для циліндричних. Таку відмінність можна пояснити нерівномірністю розташування отворів по поверхні поршня, внаслідок чого збільшується кількість застійних зон і місцевих завихрень між отворами, розміри яких зростають при:

- збільшенні діаметра (для конічних отворів – більшого діаметра) отворів поршня;
- зменшенні кількості отворів.

6.2.2. Експериментальні дослідження дисперсності жирової фази молока при обробці в пульсаційному гомогенізаторі з ротором, що вібрує в умовах резонансних явищ

6.2.2.1. Диспергування в роторному апараті в умовах вібрації та багатократної обробки

Перед повнофакторним експериментом був проведений пошуковий експеримент, який дозволяє оцінити більшість статистичних характеристик

змінних об'єкту дослідження. Проте цих відомостей недостатньо для постановки основного експерименту. Основним його завданням є дослідження впливу різних чинників на мінливість середніх значень спостережуваних випадкових величин і їх кількісна оцінка.

Для двофакторного дисперсійного аналізу ПА з ВР:

- А – частота обертання ротора, об/хв;
- В – ступінь відкриття заслінки, %;
- АВ – фактор взаємодії : частота обертання ротора + ступінь відкриття заслінки.

заслінки.

Методика планування експерименту надана у підрозділі 2.5 цієї роботи. Результати представлені у таблицях 6.1 і 6.2 [259].

Таблиця 6.1

Оцінка впливу факторів на середній розмір жирової кульки

Фактори	Оцінка впливу факторів, долі одиниці			
	Однократна обробка	Двократна обробка	Однократна обробка з вібрацією	Двократна обробка з вібрацією
А	0,684	0,669	0,784	0,870
В	0,275	0,214	0,152	0,072
АВ	0,005	0,016	0,005	0,004
Вплив повторень	0,005	0,007	0,012	0,007
Вплив випадкових чинників	0,031	0,094	0,048	0,047

Таблиця 6.2

Оцінка впливу факторів на питомі енерговитрати

Фактори	Оцінка впливу факторів, долі одиниці			
	Однократна обробка	Двократна обробка	Однократна обробка з вібрацією	Двократна обробка з вібрацією
А	0,723	0,530	0,507	0,630
В	0,072	0,292	0,277	0,315
АВ	0,116	0,017	0,044	0,028
Вплив повторень	0,004	0,003	0,008	0,004
Вплив випадкових чинників	0,084	0,158	0,164	0,023

Як показує дисперсійний аналіз, найбільш суттєвим на процес диспергування емульсії є вплив чинника А – частоти обертання ротора – більше 50%; В – ступінь відкриття заслінки оказує менш істотний вплив – 7–32%. Чинник взаємодії АВ в математичній моделі буде незначущий (може бути відсутнім), що узгоджується з теоретичними дослідженнями.

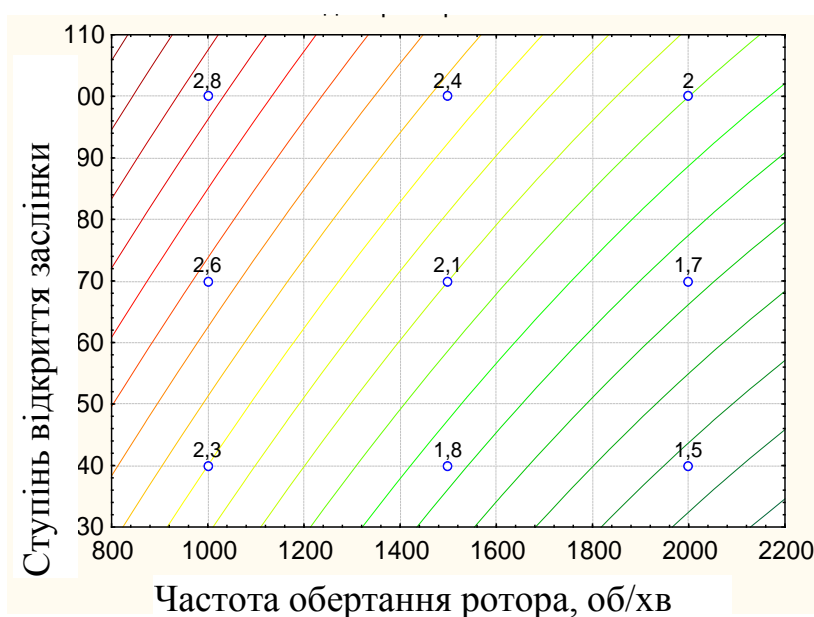
У відповідності зі складеним планом (підрозділ 2.5 цієї роботи) був проведений повнофакторний експеримент щодо визначення впливу часу обробки (ступеня відкриття заслінки), частоти обертання ротора, кратності обробки та вібрації ротора на розміри жирових кульок [259].

Для однократної обробки без вібрації розмір часток рівномірно зменшується з підвищенням частоти обертання ротора (рис. 6.15, а), що пояснюється збільшенням щільності енергії, яка підводиться до робочого об'єму продукту. Подібний характер має вплив ступеня відкриття заслінки, що пояснюється збільшенням часу диспергування.

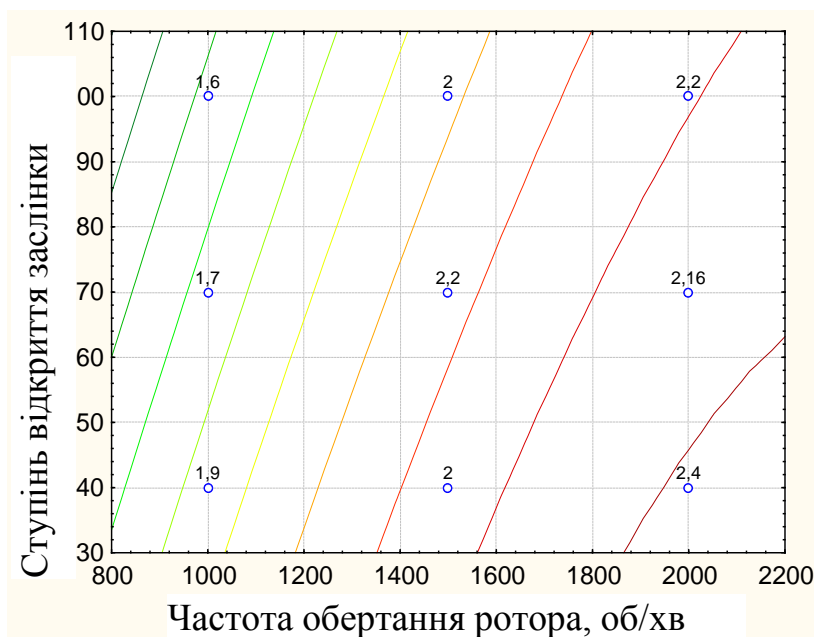
Енерговитрати очікувано мінімальні при мінімальній частоті обертання та мінімальному опорі всмоктуванню емульсії – повністю відкритій заслінці (рис. 6.15, б).

Розкодована модель прогнозування розміру жирової частки

$$y_i = 3,18 - 0,00144x_1 + 0,00883x_2 + 0,000000203x_1^2 \quad (6.3)$$



а)



б)

Рис. 6.15. Поверхня і лінії рівнів функції відгуку при однократній обробці: а – розмір часток, б – питомі енерговитрати.

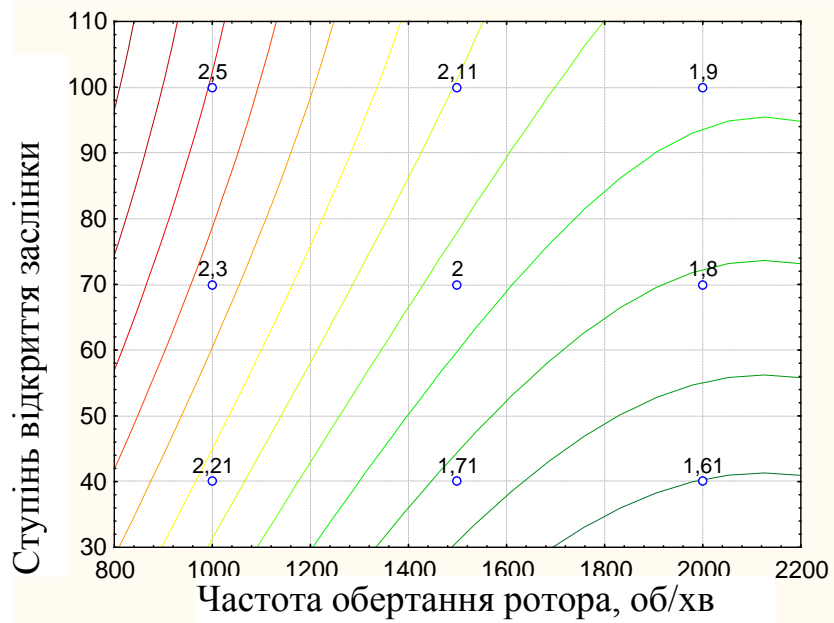
Розкодована модель енерговитрат

$$y_i = 3,52 - 0,00252x_1 + 0,005x_2 + 0,000000588x_1^2. \quad (6.4)$$

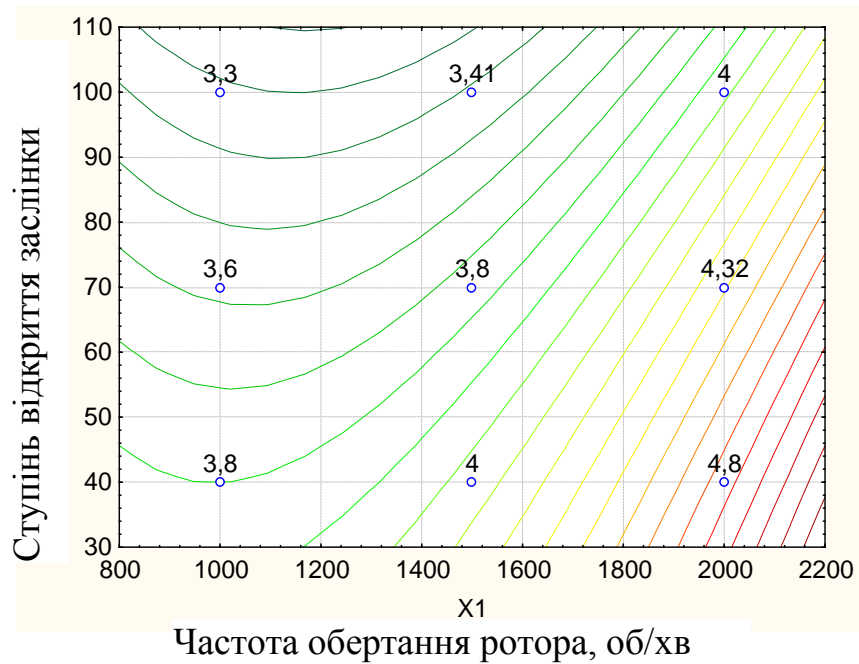
Мінімальний розмір часток становить 1,6 мкм при частоті 1900–2000 об/хв. і ступені відкриття заслінки 40% при питомих енерговитратах 2,2 - 2,4 кВт·год/т. Мінімальні енерговитрати – 1,6 кВт·год/т при розмірі часток 2,8 мкм.

Для двократної обробки характерно підвищення ступеня дисперсності емульсії на 10–15% після обробки при частотах 1000–1600 об/хв і мінімальному відкритті заслінки у порівнянні з однократною (рис. 6.16, а).

При частотах 1800-2000 об/хв якість обробки практично не відрізняється від однократної, але енерговитрати зростають майже в 2 рази (рис. 6.16, б). Таким чином, збільшення кратності обробки у пульсаційному апараті неефективне і не призводить до збільшення ефективності гомогенізації як це спостерігається наприклад в клапанних гомогенізаторах.



а)



б)

Рис. 6.16. Поверхня і лінії рівнів функції відгуку при двократній обробці: а – розмір часток, б – питомі енерговитрати.

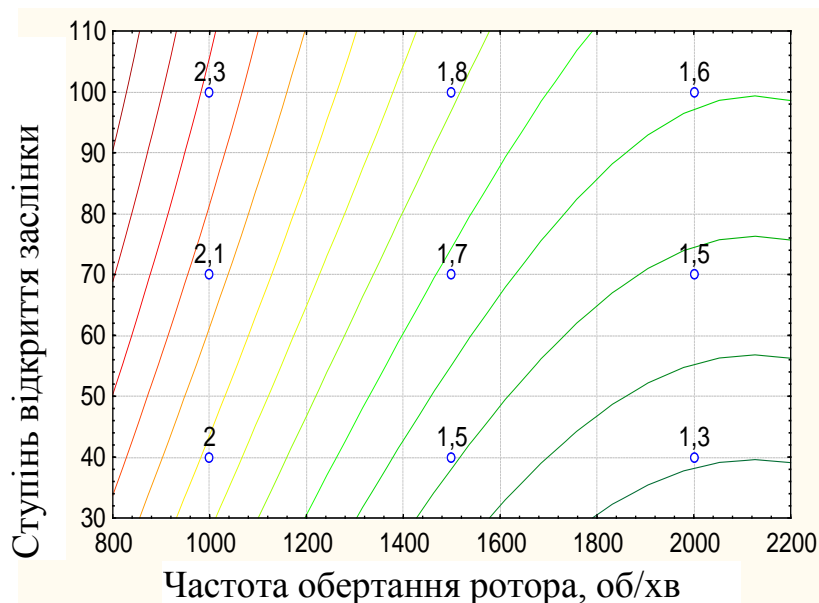
Розкодована модель прогнозування розміру жирової частки

$$y_i = 3,459 - 0,00195x_1 + 0,00547x_2 + 0,00000046x_1^2 \quad (6.5)$$

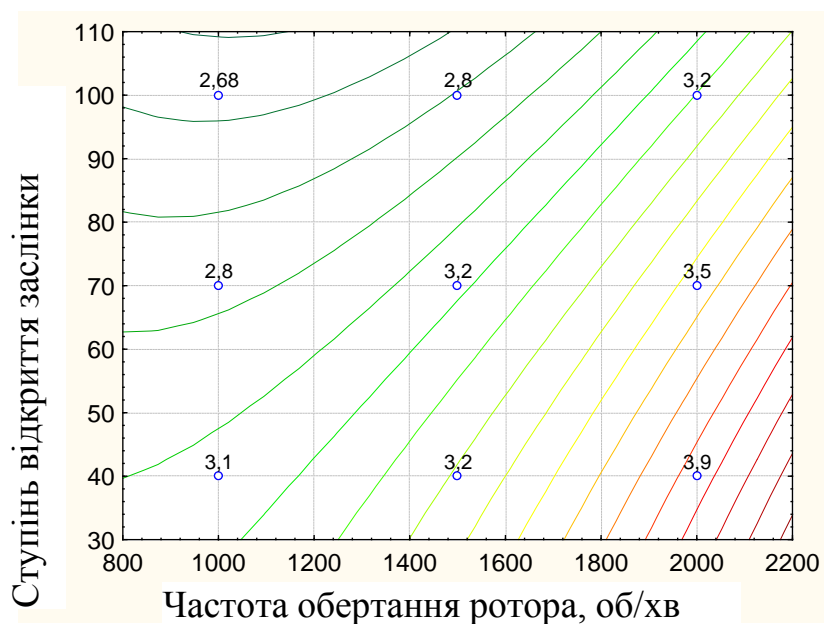
Розкодована модель енерговитрат

$$y_i = 4,815 - 0,001599x_1 - 0,00273x_2 - 0,00000527x_1x_2 + 0,000000928x_1^2 \quad (6.6)$$

Розмір часток емульсії після однократної обробки з вібрацією зменшується на 15–20% у порівнянні з обробкою без вібрації і сягає 1,3–1,5 мкм при частотах обертання 1500–1800 об/хв і відкритті заслінки 70% і нижче (рис. 6.17, а). Підвищення ступеня диспергування у цьому діапазоні частот узгоджується з теоретичними дослідженнями і пояснюється виникненням резонансу при синхронізації з частотою обертання кривошипу. Енерговитрати у цьому діапазоні факторного простору – 3,2–3,9 кВт·год/т (рис. 6.17, б).



а)



б)

Рис. 6.17. Поверхня і лінії рівнів функції відгуку при однократній обробці з вібрацією: а – розмір часток, б – величина питомих енерговитрат.

Однократна обробка з вібрацією дозволяє одержати емульсію з дисперсністю на 12–15% вищу і енерговитратами на 10–12% меншими, ніж двократна обробка без вібрації, що свідчить про істотний позитивний ефект використання вібруючого ротора.

Для підвищення енергоефективності необхідно обирати режими зі зниженою частотою вібрації ротора та збільшеним ступенем відкриття заслінки.

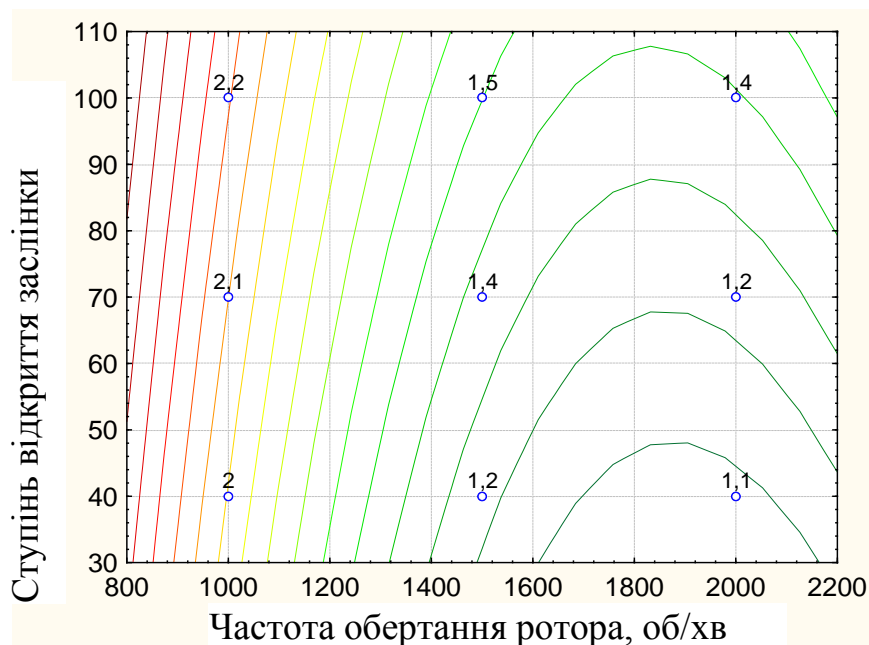
Розкодована модель прогнозування розміру жирової частки

$$y_i = 3,52 - 0,002252x_1 + 0,005x_2 + 0,000000528x_1^2. \quad (6.7)$$

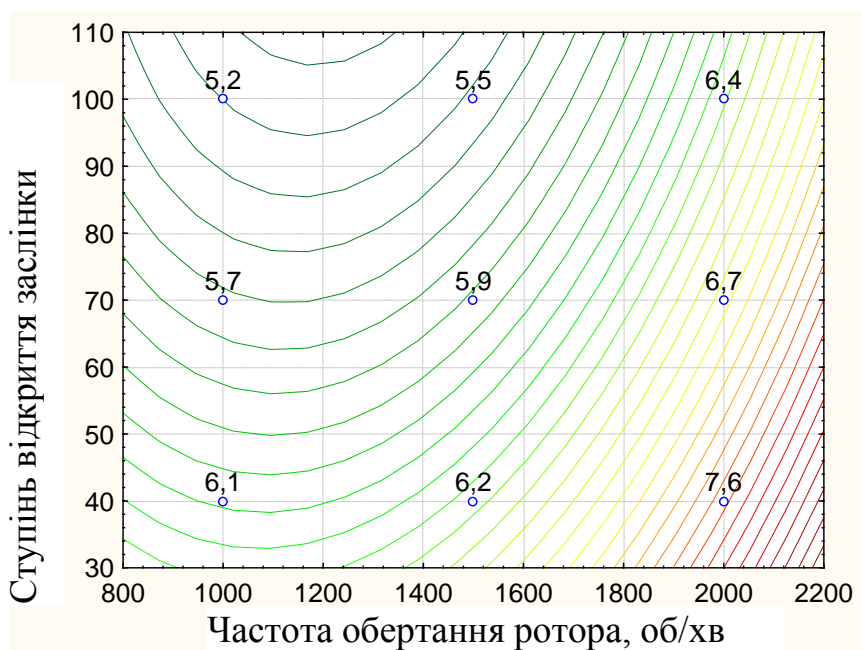
Розкодована модель прогнозування енерговитрат при однократній обробці з вібрацією

$$y_i = 3,826 + 0,000876x_1 - 0,00847x_2 + 0,000000516x_1^2. \quad (6.8)$$

При двократній обробці з вібрацією досягається найвищий ступінь диспергування жирової фази з розміром часток 1,1–1,3 мкм, що на 15–20% менше, ніж при однократній обробці з вібрацією (рис. 6.18, а). При цьому частота обертання складає 1400–1600 об/хв, відкриття заслінки – 40–80%, і енерговитрати – 6,2–7,6 кВт·год/т (рис. 6.18, б), що в 2 рази вище, ніж максимальні енерговитрати при однократній обробці з вібрацією.



а)



б)

Рис. 6.18. Поверхня і лінії рівнів функції відгуку при двократній обробці з вібрацією: а – розмір часток, б – величина питомих енерговитрат.

Якщо при рівному ступені диспергування емульсії (розмір часток 1,3–1,5 мкм) порівняти вібраційну однократну та вібраційну двократну обробку, то енерговитрати останньої в 1,8–2,0 рази більші.

Розкодована модель прогнозування розміру жирової частки

$$y_i = 5,045 - 0,004454x_1 + 0,00447x_2 + 0,0000012x_1^2 \quad (6.9)$$

Розкодована модель енерговитрат

$$y_i = 8,27 - 0,00396x_1 - 0,00803x_2 - 0,000005x_1 \cdot x_2 + 0,00000166x_1^2 \quad (6.10)$$

Таким чином, в результаті проведення експериментального дослідження ПА з ВР одержані рівняння залежностей енерговитрат та середнього розміру жирових кульок жирової емульсії у діапазоні частот обертання ротора 1000–2000 об/хв. і ступеня відкриття заслонки на виході з апарата 40–100% при температурі емульсії 60–65⁰С.

Встановлено, що:

– збільшення кратності обробки у пульсаційному апараті неефективно і не призводить до підвищення ступеня диспергування, як це спостерігається, наприклад, у клапанних гомогенізаторах;

– однократна обробка з вібрацією дозволяє одержати емульсію з дисперсністю на 12–15% вище, і енерговитратами на 10–12% менше, ніж двократна обробка без вібрації, що свідчить про істотний позитивний ефект використання вібруючого ротора;

– для підвищення енергоефективності необхідно обирати режими зі зниженою частотою вібрації ротора та збільшеним ступенем відкриття заслінки;

– для досягненні розмірів часток жиру в емульсії 1,3–1,5 мкм найбільш доцільно використовувати вібраційну однократну обробку, енерговитрати якої у 1,8–2,0 рази менші ніж у двократної обробки з вібрацією.

6.2.2.2. Дослідження синхронізації фаз між обертанням ротора та кривошипу

У розділі 4 визначено, що для досягнення виникнення резонансу і максимального ступеня диспергування молочного жиру в ПА з ВР оптимальна частота обертання ротора повинна бути синхронізована з частотою обертання кривошипу: $n_p = n_k / z$. Крім того, кут зсуву фаз між обертанням кривошипу та ротора повинен складати 270^0 . Для перевірки дійсності теоретичних розрахунків проведено дослідження впливу на середній діаметр жирових кульок частоти обертання кривошипу для 3 випадків: $n_p = n_k / z$, $n_p = 0,5n_k / z$ і $n_p = 2n_k / z$ (рис. 6.19). Результати свідчать про значне збільшення ефективності гомогенізації при $n_p = n_k / z$. Пояснити збільшення d_k при підвищенні частоти обертання ротора можна лише виникненням резонансних явищ – збільшенням амплітуди пульсації емульсії в переривнику ПА з ВР.

Внаслідок збільшення прискорення емульсії в переривнику при збільшенні частоти обертання кривошипу та ротора діаметр жирових часток зменшується. При n_k більше 2400 об/хв темпи зменшення жирових часток уповільнюються і можна прогнозувати, що досягти $d_k=0,8$ мкм можливо тільки при підвищенні значень n_p значно більше, ніж $n_p = 2n_k / z$.

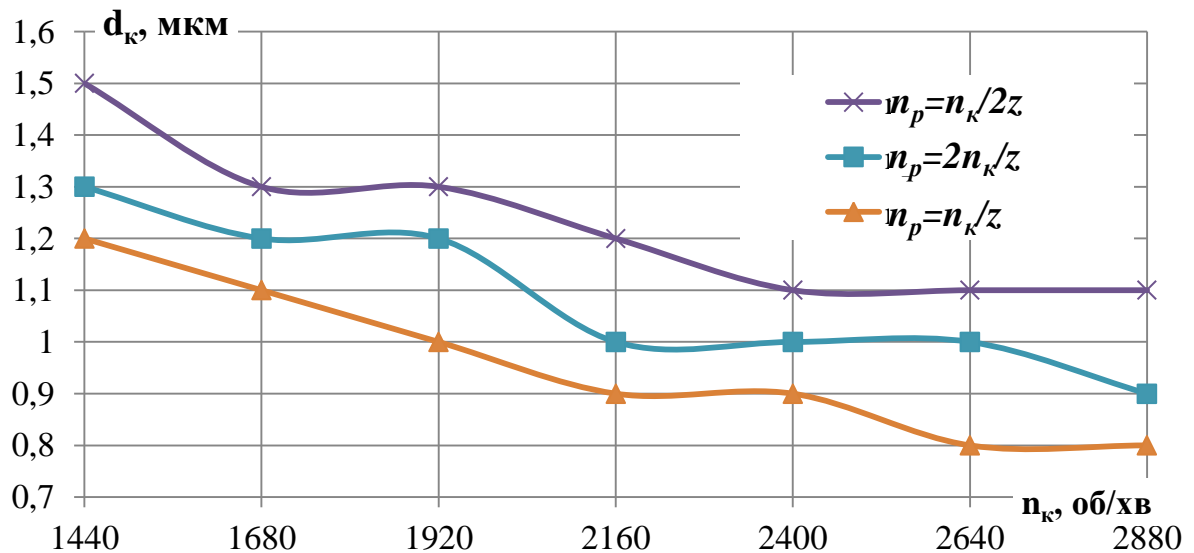


Рис. 6.19. Графік зміни діаметра жирових кульок d_k в залежності від частоти обертання кривошипу n_k для $n_p = n_k / z$, $n_p = 0,5n_k / z$ і $n_p = 2n_k / z$.

На рис. 6.20. показана залежність між кутом зсуву фаз оберտального та коливального рухів ротора та розмірами жирових кульок, яка свідчить про збільшення ефективності диспергування при оптимальному, за теоретичними розрахунками, куті зсуву $\beta = 3\pi/2$.

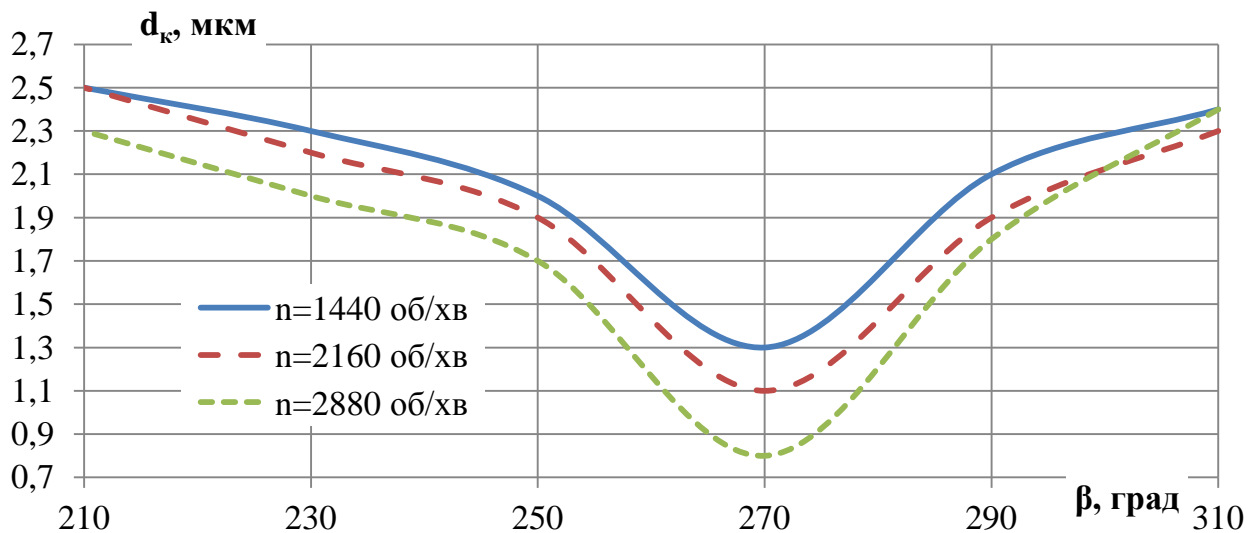


Рис. 6.20. Залежність діаметра жирової кульки d_k від кута зсуву фаз оберտального та коливального рухів ротора β та частоти обертання кривошипу n_k .

При збільшенні або зменшенні кута зсуву фаз на 20 град розміри жирових кульок збільшуються в 1,8–2,2 рази, а при збільшенні (зменшенні) цього кута на 40–60 градусів гомогенізація практично не відбувається. Це свідчить про високу ступінь підвищення амплітуди коливань при резонансі пульсацій, та, як наслідок – прискоренні потоку емульсії.

6.2.2.3. Вплив амплітуди коливання ротора на середній діаметр жирових кульок молока

Результати експерименту визначення залежності середнього розміру жирових кульок молока від частоти обертання ротора та радіуса кривошипу (що визначає амплітуду осьових коливань ротора) (рис. 6.21) свідчать про задовільне співпадіння теоретичних розрахунків (застосовуючи емпіричну залежність (4.12 та 4.110)) та експериментальних даних (відносна похибка не перевищує 10%) [64].

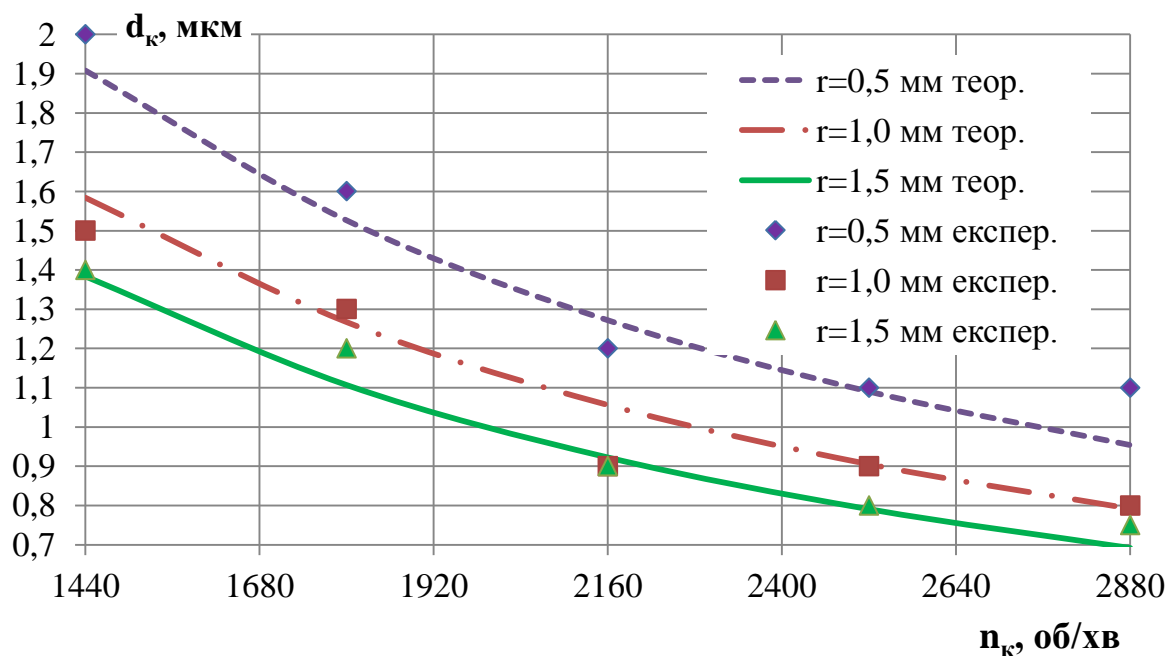


Рис. 6.21. Графік співставлення теоретичних та експериментальних результатів визначення середнього розміру жирових кульок молока d_k від частоти обертання n_k та радіуса кривошипа r .

Однакову дисперсність можливо отримати при різних n_k та r . За результатами визначення фактору ефективності гомогенізації (рис. 5.29) оптимальними будуть режими з мінімальним r незалежно від n_k і n_p . Наприклад $d_k=0,8$ мкм можливо отримати при $r=1,5$ мм і $n_k=2520$ об/хв та при $r=1,0$ мм і $n_k=2880$ об/хв. Але при $r=1,0$ мм питомі енерговитрати є меншими.

Отже при створенні промислових зразків ПА з ВР при виборі раціональних режимів гомогенізації слід обирати режими з мінімальною амплітудою вібрації ротора. Це пояснюється тим, що при збільшенні амплітуди осевих вібрацій ротора, прискорення збільшується менш істотно, ніж при збільшенні частоти обертання.

У розділі 4 було визначено, що руйнування жирових кульок для ПА з ВР відбувається при збільшенні швидкості ковзання жирової кульки відносно оточуючої плазми пропорційно прискоренню емульсії. Для перевірки цієї гіпотези змінювали частоту обертання валу кривошипу n_k в діапазоні 1440–2880 об/хв і радіус кривошипу r у діапазоні 0,5–1,5 мм. Для кожного дослід згідно формули (4.110) розраховувалось значення середнього прискорення молочної емульсії a_e і визначався середній розмір жирових кульок (рис. 6.22) [64].

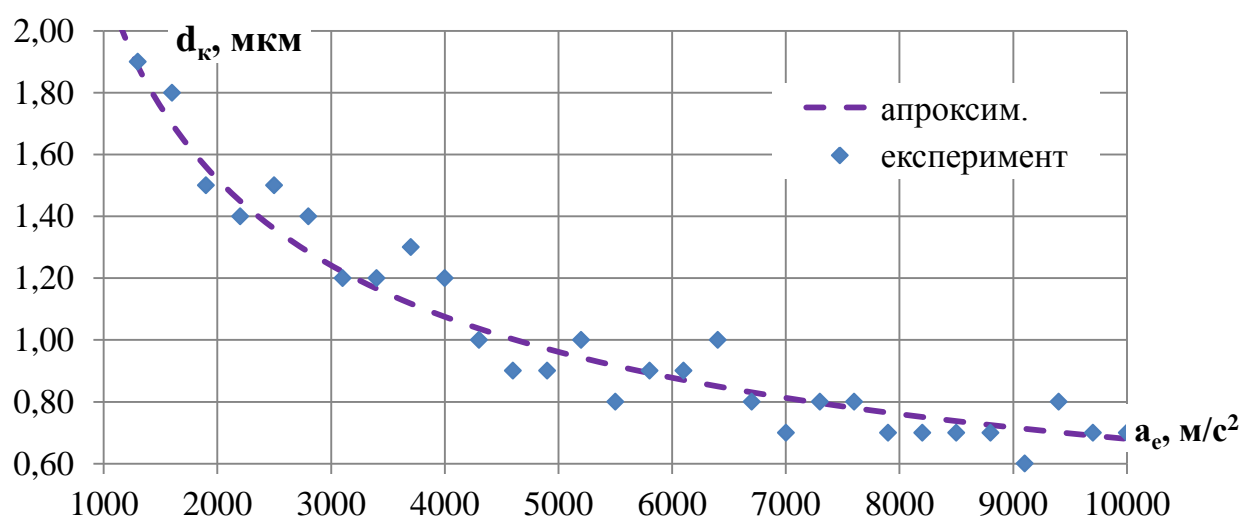


Рис. 6.22. Діаметр жирових кульок d_k в залежності від середнього прискорення емульсії a_e

Результати з достовірністю 92% апроксимуються виразом

$$d_k = \frac{68 \cdot 10^{-6}}{\sqrt{a}}. \quad (6.11)$$

Розрахунки за цією формулою для $n_p = n_k / z$ представлені штриховою лінією на рис 6.22.

Подібність отриманої формули з виразом руйнування краплі Релея-Тейлора свідчить про подібність механізмів руйнування крапель для нестійкості Релея-Тейлора з диспергуванням жирових кульок у ПА з ВР. Причому характер залежності подібний, наприклад, до залежності середнього діаметра жирових кульок від тиску для клапанної гомогенізації [92], а також для струминної та пульсаційної гомогенізації [217, 264]. Загалом, при підвищенні інтенсивності впливу, темпи збільшення дисперсності знижуються.

Різниця у значеннях коефіцієнта гомогенізації для ППГ і ПА з ВР обумовлена істотними відмінностями гідродинамічних умов диспергування молочного жиру в цих гомогенізаторах. В ПА з ВР існують великі градієнти швидкостей в зазорі між ротором і статором та значно більш розвинута кавітація, що знижує значення K_h . Але основною причиною значно меншого значення коефіцієнта гомогенізації для ПА з ВР є резонансні явища, в результаті яких підвищується амплітуда та прискорення руху емульсії. При неоптимальному куті зсуву фаз (рис. 6.20) середнє прискорення a_e , яке визначається формулою (4.110) змінюється незначно. І в умовах відсутності резонансу таких значень a_e недостатньо для руйнування жирової кульки. Поява резонансу зменшує розміри жирових кульок в 3 рази (з 2,4 до 0,8 мкм), що згідно з формулою (4.12) свідчить, що при резонансі значення a_e збільшується як мінімум в 9 разів, а коефіцієнт гомогенізації знижується мінімум в 3 рази та без резонансу для ПА з ВР $K_h > 68 \cdot 3 = 204 \text{ м}^{3/2}/\text{с}$, тобто близький за значенням до ППГ.

6.3. Енергетичні показники роторних, пульсаційних і струминних гомогенізаторів

6.3.1. Результати експериментальних досліджень енерговитрат струминної гомогенізації

Експериментальне визначення середньої потужності СГРЖФ та порівняння отриманих даних з результатами аналітичних досліджень за формулою (5.12) представлено на графіку (рис 6.23). Експериментальні значення потужності насосів подачі знежиреного молока і вершків на 4–10% більші за розрахункові, що пояснюється втратами тиску у з'єднувальних трубопроводах і патрубках СГРЖФ. В цілому, експериментальні дані добре узгоджуються з аналітичною моделлю СГРЖФ.

Питомі енерговитрати і оптимізація параметрів СГРЖФ. Використання тонких каналів подачі жирової фази СГРЖФ ($d_g < 1$ мм) суттєво знижує коефіцієнт витрат рідини, реальне значення якого важко визначити теоретично.

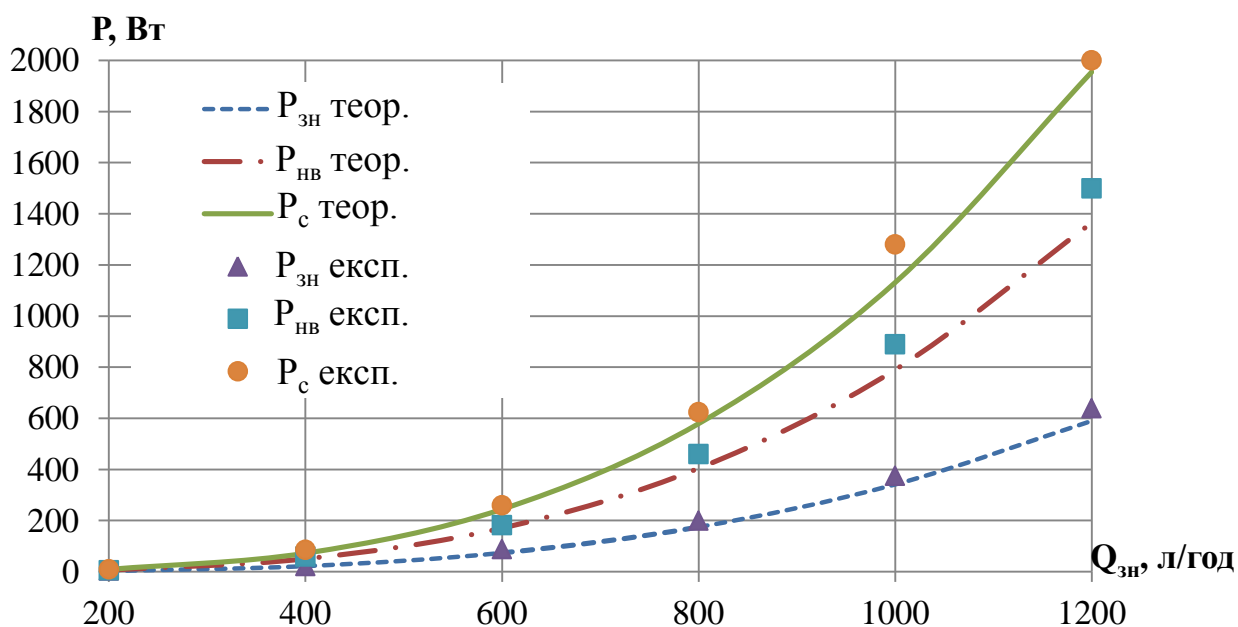


Рис. 6.23. Експериментальні та аналітичні дані залежності потужності СГРЖФ $P_{зн}, P_{нв}, P_c$ від подачі знежиреного молока $Q_{зн}$ (при $s_k=6$ мм², $d_g=0,8$ мм, $N_k=1$, $\mu_k=0,95$, $\mu_g=0,5$, $J_B=30\%$, $J_{н.м}=2\%$)

Експериментальне визначення коефіцієнта витрат каналу подачі вершків (рис. 6.24) показало, що залежність $\mu_e=f(d_e)$ при $0,6 < d_e < 0,8$ мм майже лінійна.

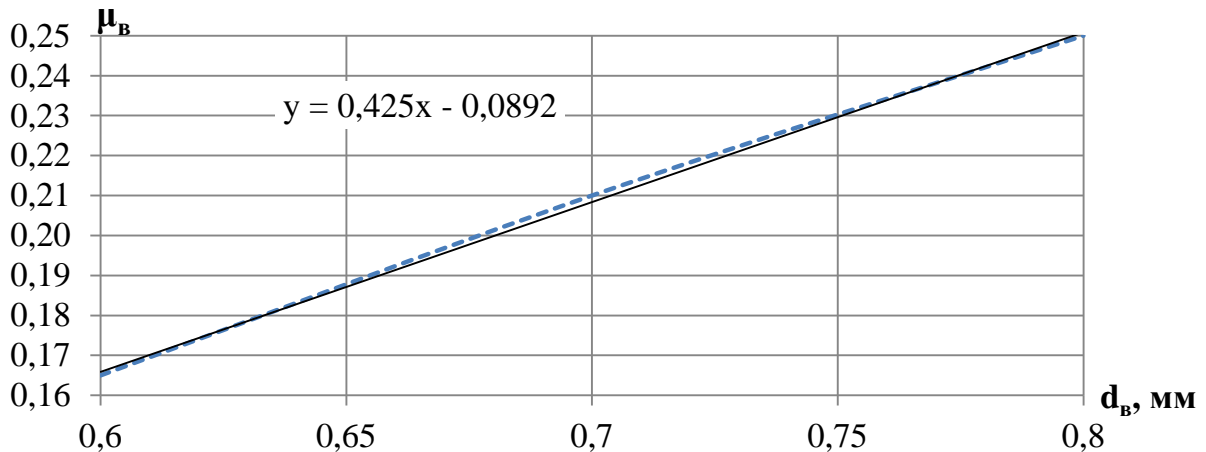


Рис. 6.24. Графік залежності коефіцієнта витрат каналу подачі вершків μ_e від діаметра каналу подачі вершків d_e .

Експериментально визначено, що при використанні сталевих каналів з внутрішнім діаметром 0,6–0,8 мм коефіцієнт витрат можна визначити за емпіричною формулою

$$\mu_e = 0,425d_e - 0,0892. \quad (6.12)$$

При зниженні μ_e у 1,5 рази при зменшенні d_e з 0,8 до 0,6 мм необхідна потужність насоса подачі вершків згідно формули (5.10) зростає в 2,3 рази. Відомо, що для циліндричного патрубку коефіцієнт стиснення струменя $\varepsilon_e=1$ [184], тому для каналу подачі вершків $\varphi_e=\mu_e$.

Результати визначення питомих енерговитрат СГРЖФ свідчать про значне зниження E_{num} при збільшенні діаметра каналу подачі вершків і підвищенні жирності вершків (рис. 6.25). Збільшення d_e з 0,6 до 0,7 мм призводить до зниження питомих енерговитрат у 4–7 разів, а подальше збільшення d_e з 0,7 до 0,8 мм призводить до зниження питомих енерговитрат у 1,8–2,3 рази. На рис. 6.25 на графіку питомих енерговитрат показана крива рівної дисперсності ($d_k=0,8$ мкм), дані для побудови якої отримані з графіку рис. 6.3.

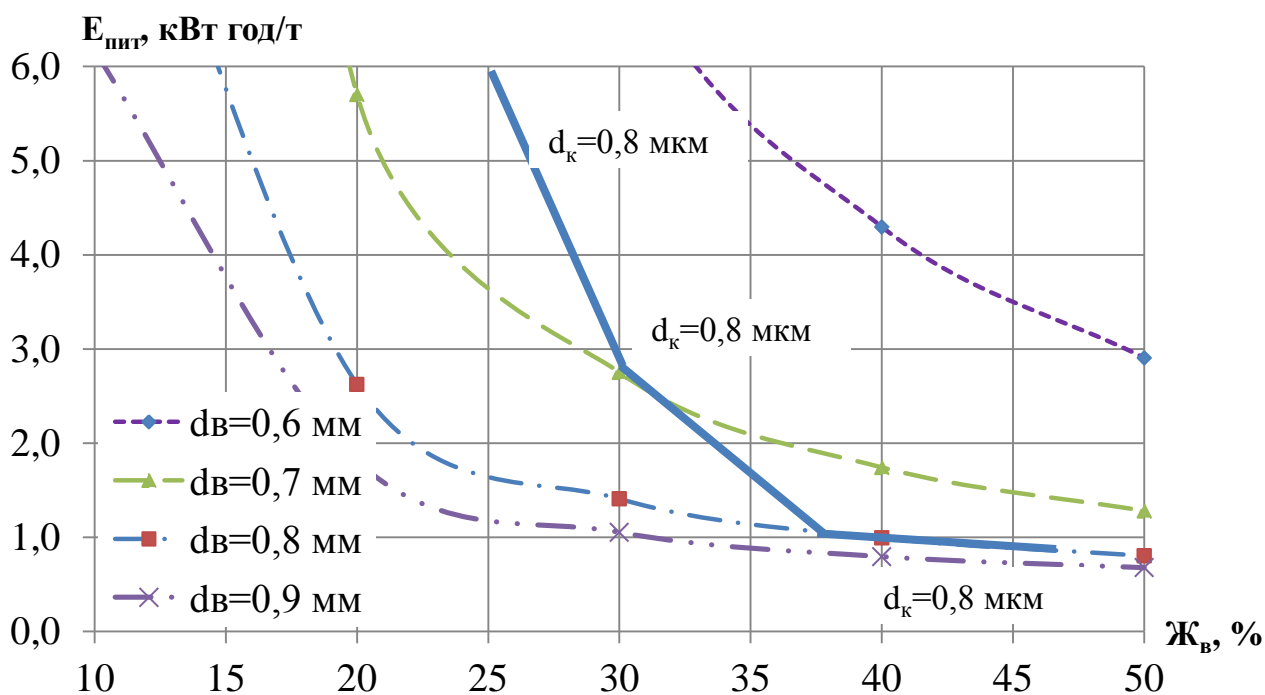


Рис. 6.25. Залежність питомих енерговитрат від жирності вершків J_v та діаметра каналу вершків d_k (при $v_{zn} = 60$ м/с).

Таке суттєве зростання питомих енерговитрат відбувається з двох причин:

- зниження коефіцієнта витрат рідини;
- збільшення необхідної швидкості потоку знежиреного молока для забезпечення необхідної жирності гомогенізованого продукту.

При збільшенні діаметра каналу вершків до 0,9 мм подальшого зниження питомих енерговитрат практично не відбувається. Отже раціональне значення діаметра $d_k = 0,9–1,0$ мм і жирності вершків 40–45%.

Згідно формул (5.10) та (5.23) при підвищенні швидкості потоку вершків питомі енерговитрати зростають. У відповідності з експериментальними даними графіку $d_k = f(v_v)$ (рис. 6.1), для оптимізації параметрів СГРЖФ необхідно зменшувати швидкість вершків. Збільшення швидкості вершків до 80 м/с і більше призводить до зниження енергетичної ефективності гомогенізації до рівня клапанної, а зниження v_v до 20–40 м/с – до підвищення ступеня диспергування. Отже, враховуючи формули (5.15) і (5.17), умову максимальної швидкості потоку вершків запишемо у вигляді

$$v_e = \frac{4Q_{3H}(\mathcal{J}_{H.M} - \mathcal{J}_{3H})}{(\mathcal{J}_e - \mathcal{J}_{H.M})N_k \pi d_e^2} < 40. \quad (6.13)$$

З рівняння 6.13 з урахуванням (3.10) визначимо сумарну площу каналів подачі вершків

$$N_k \frac{\pi d_e^2}{4} > \frac{\varepsilon_k s_k v_{3H} (\mathcal{J}_{H.M} - \mathcal{J}_{3H})}{40(\mathcal{J}_e - \mathcal{J}_{H.M})}. \quad (6.14)$$

Або,

$$d_e^2 > \frac{\varepsilon_k s_k v_{3H} (\mathcal{J}_{H.M} - \mathcal{J}_{3H})}{10\pi N_k (\mathcal{J}_e - \mathcal{J}_{H.M})}. \quad (6.15)$$

Враховуючи, що для отримання діаметра жирових кульок емульсії 0,8 мкм необхідна швидкість знежиреного молока $v_{3H}=60-65$ м/с, а мінімальний переріз камери $s_k=6$ мм², отримаємо

$$d_e > \sqrt{\frac{(\mathcal{J}_{H.M} - \mathcal{J}_{3H})}{10^5 N_k (\mathcal{J}_e - \mathcal{J}_{H.M})}}. \quad (6.16)$$

при $\mathcal{J}_{H.M}=3,5\%$, $\mathcal{J}_e=40\%$ площа каналів подачі вершків за (6.14) повинна бути більше $0,38 \cdot 10^{-6}$ м². При використанні одного каналу подачі вершків $d_e > 0,97$ мм, що узгоджується з результатами експериментальних досліджень (рис. 6.25), а при двох каналах – $d_e > 0,7$ мм.

Таким чином, молочну емульсію з середнім розміром жирових часток 0,8 мкм можливо отримати при швидкості потоку знежиреного молока 60–65 м/с, діаметрі каналу подачі вершків 0,9–1,0 мм, жирності вершків 40–45%. При цьому питомі енерговитрати процесу не перевищують 0,9 кВт·год/т.

6.3.2. Результати експериментальних досліджень енерговитрат поршньового пульсаційного апарата

Порівняння експериментальних даних середньої потужності ППГ для циліндричних і конічних отворів з розрахунковими за формулою (5.61) представлено на рис. 6.26 і 6.27.

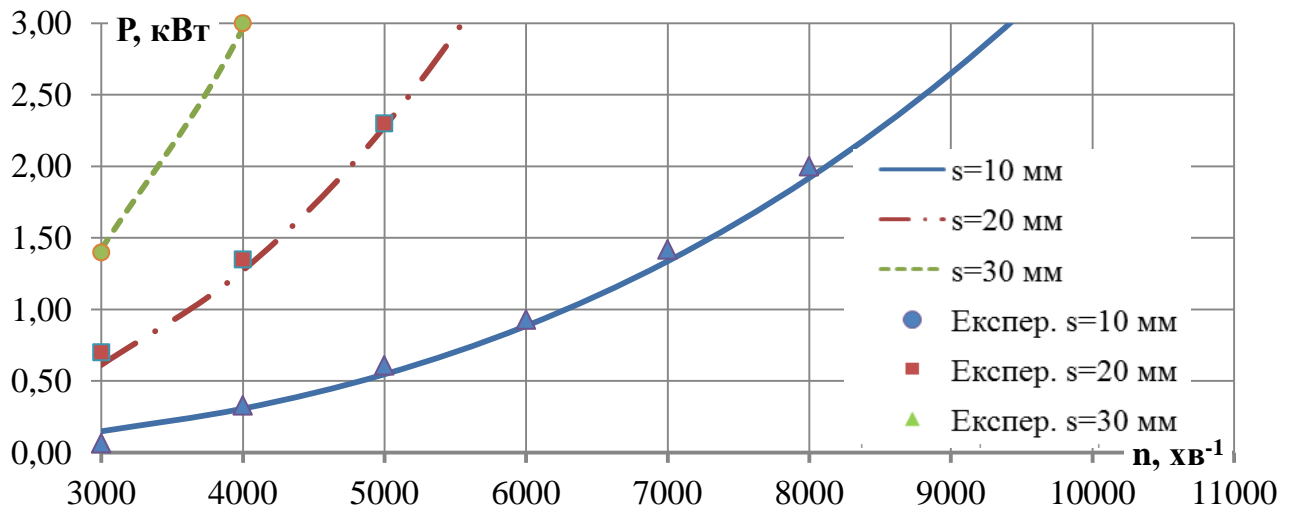


Рис. 6.26. Графік залежності експериментальної потужності ППГ P від частоти n і амплітуди s коливань поршня та порівняння її з теоретичними даними для конічних отворів поршня ($D_n = 60$ мм, $K_o = 0,04$).

Результати свідчать про відхилення не більше 5–10%, тобто теоретично отримана формула достовірна та придатна для розрахунку необхідної середньої потужності ППГ.

Середня потужність ППГ при використанні циліндричних отворів на 40–50% менша, ніж при використанні конічних отворів, що пояснюється значно меншим коефіцієнтом живого перетину поршня.

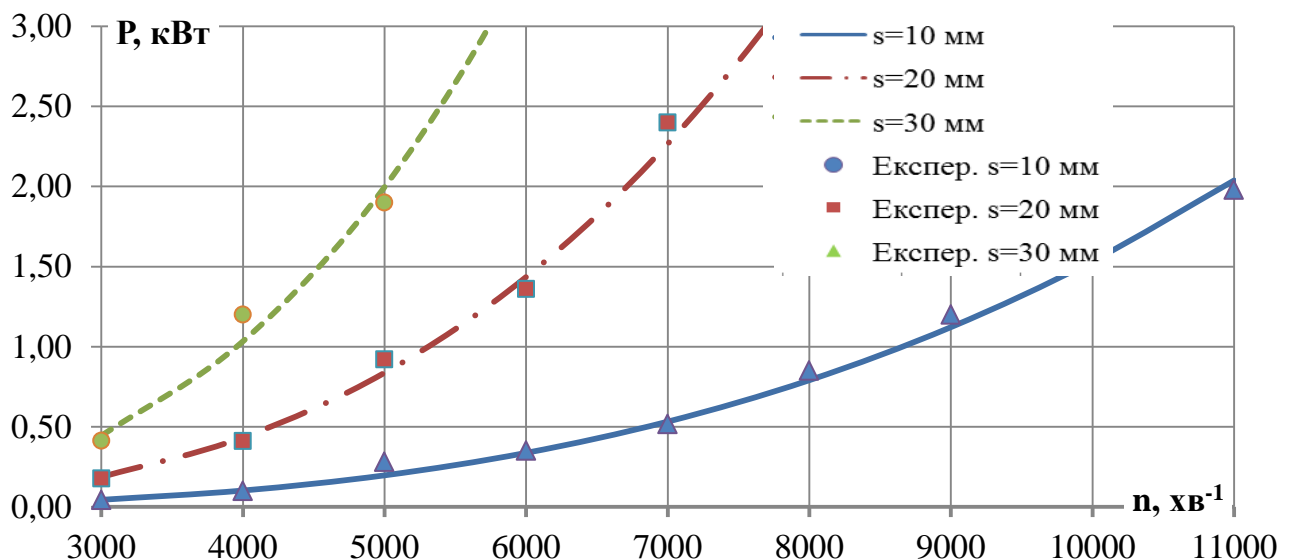


Рис. 6.27. Графік залежності експериментальної потужності ППГ P від частоти n і амплітуди s коливань поршня та порівняння її з теоретичними даними для циліндричних отворів поршня ($D_n = 60$ мм, $K_o = 0,47$).

Для двох поршнів з конічними та циліндричними отворами (рис. 6.13) експериментально визначена потужність гомогенізації показана на рис. 6.28.

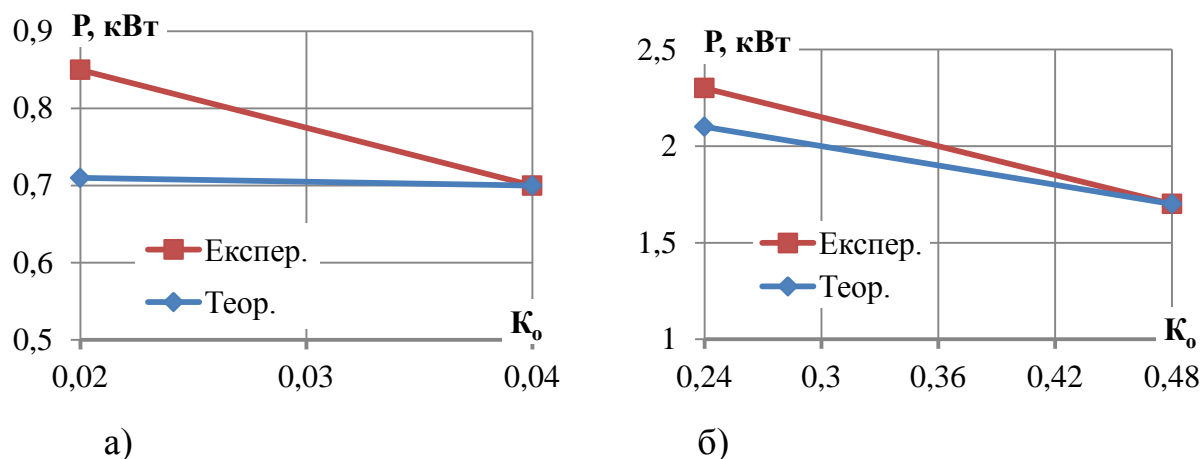


Рис. 6.28. Залежність потужності ППГ P від коефіцієнта живого перетину поршня K_o для а) конічних отворів при $n=6000 \text{ хв}^{-1}$, $s=10 \text{ мм}$ б) циліндричних отворів при $n=10000 \text{ хв}^{-1}$, $s=10 \text{ мм}$.

Згідно експериментальних даних (рис. 6.28), зі зниженням коефіцієнта живого перетину експериментальні значення потужності гомогенізації збільшується у порівнянні з теоретично розрахованими на 10% для поршня з циліндричними отворами і на 16% – з конічними. Це можливо пояснити збільшенням вихорів, які утворюються у зонах поруч з поршнем між його отворами (рис. 6.29).

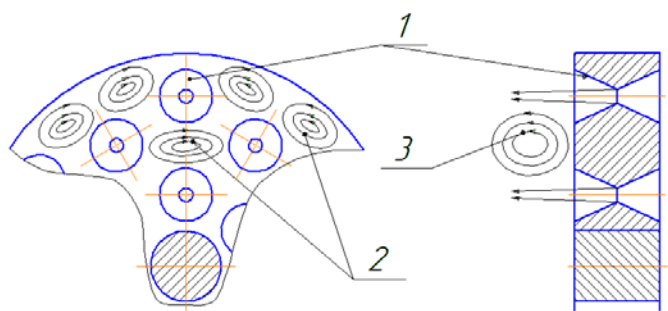


Рис. 6.29. Зони розташування вихорів у зонах між струменями емульсії, які формуються при русі поршня: 1 – отвори поршня; 2 – завихрення в горизонтальній площині; 3 – завихрення у вертикальній площині.

При зменшенні кількості отворів поршня (зниженням K_o) збільшуються розміри зон між струменями емульсії та, як наслідок, розміри завихрень між

струменями. Циркуляційний рух рідини у завихреннях призводить до втрат енергії. Тому при зниженні K_0 підвищується потужність ППГ.

Для визначення оптимальних показників коефіцієнта живого перетину ППГ введемо показник енергетичної ефективності гомогенізації [271]

$$E_r = \frac{I}{d_k E_{num}}. \quad (6.17)$$

Або з урахуванням (4.36)

$$E_r = \frac{Q}{d_k P_e}. \quad (6.18)$$

При зниженні енерговитрат і підвищенні ступеня диспергування жирової фази E_2 збільшується. Побудуємо графіки $E_r = f(K_0)$ для поршнів, зображених на рис. 6.13. Як показує аналіз графічних залежностей (рис. 6.30) при збільшенні K_0 ефективність гомогенізації зростає. Для поршня з конічними отворами E_r в 3,2 рази більше, ніж для поршня з циліндричними отворами, що свідчить про більш високу ефективність використання поршня з отворами конічної форми.

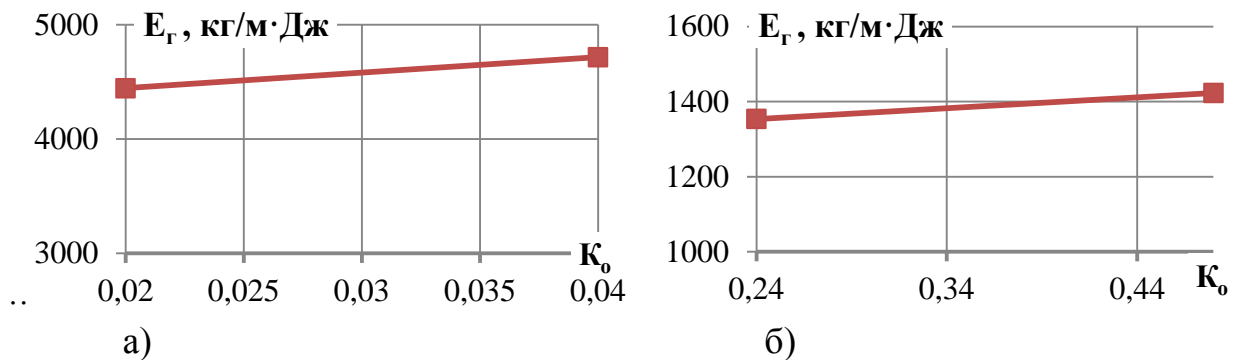


Рис. 6.30. Залежність показника енергетичної ефективності гомогенізації E_2 від коефіцієнта живого перетину поршня K_0 для а) конічних отворів при $n=6000 \text{ хв}^{-1}$, $s=10 \text{ мм}$; б) циліндричних отворів при $n=10000 \text{ хв}^{-1}$, $s=10 \text{ мм}$.

Отримані експериментальні дані свідчать про необхідність використання у ППГ поршня з максимальним значенням коефіцієнта живого перетину.

Питомі енерговитрати. Для визначення оптимального варіанту форми отворів поршня ППГ проведемо співставлення графіків питомих енерговитрат та дисперсності молочної емульсії від частоти коливань поршня (рис. 6.31, 6.32).

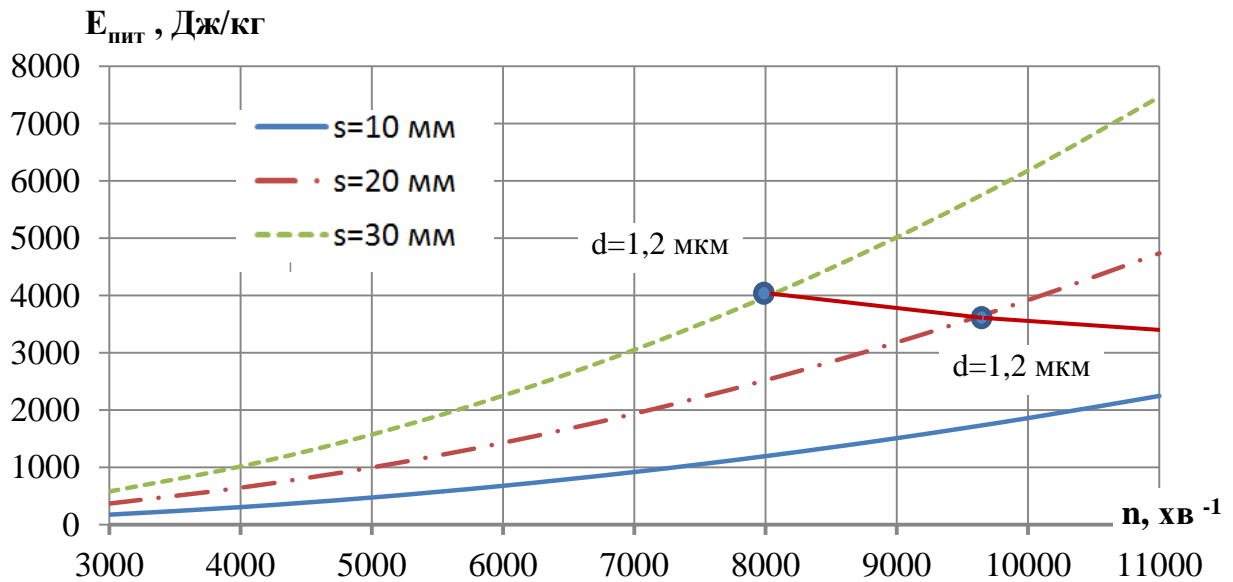


Рис. 6.31. Залежність питомих енерговитрат і дисперсності емульсії від частоти n і амплітуди s коливань поршня з циліндричними отворами ($D_n = 60$ мм, $K_o = 0,24$)

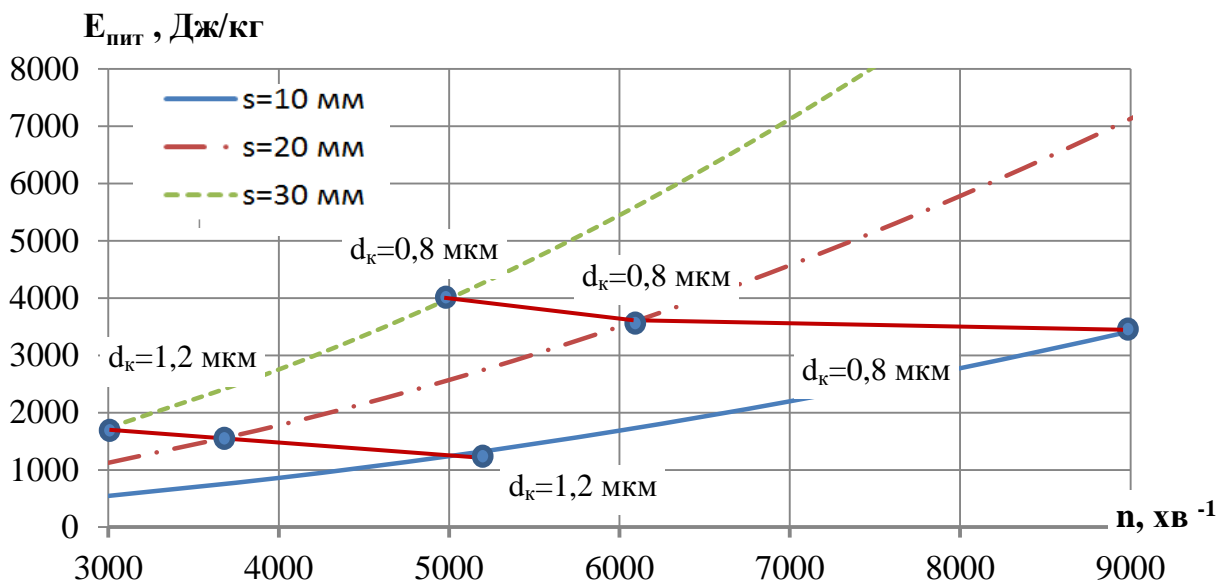


Рис. 6.32. Залежність питомих енерговитрат $E_{\text{пит}}$ і дисперсності емульсії від частоти n і амплітуди s коливань поршня з конічними отворами ($D_n = 60$ мм, $K_o = 0,04$)

Лінії рівної дисперсності (рис. 6.31, 6.32) свідчать про зниження питомих енерговитрат з підвищенням частоти вібрації поршня як з циліндричними, так і конічними отворами. Ці результати узгоджуються з результатами теоретичних досліджень.

Середній розмір жирової фази емульсії 1,2 мкм для поршня з

циліндричними отворами можливо отримати (рис. 6.31) при $s=30$ мм і $n=8000$ хв⁻¹ та $s=10$ мм і $n=9600$ хв⁻¹, причому в останньому випадку питомі енерговитрати нижчі на 10% і дорівнюють 3500–3700 Дж/кг.

Середню дисперсність жирової фази емульсії 0,8 мкм для поршня з конічними отворами можливо досягти (рис. 6.32) при $s=20$ мм і $n=6000$ хв⁻¹ та $s=10$ мм і $n=9000$ хв⁻¹, причому в останньому випадку питомі енерговитрати нижче на 5% і дорівнюють 3200–3600 Дж/кг (0,9–1,0 кВт·год/т).

Питомі енерговитрати для ППГ з циліндричними отворами поршня для отримання дисперсності емульсії 1,2 мкм в 3,3 рази більші, ніж для ППГ з конічними отворами поршня (відповідно 3600 і 1200 Дж/кг). Це пояснюється набагато меншим значенням коефіцієнта живого перетину поршня з конічними отворами – 0,04 у порівнянні з циліндричними – 0,24.

6.3.3. Результати експериментальних досліджень енерговитрат роторно-пульсаційного апарата

Експериментальні дослідження продуктивності ПА з ВР. За результатами теоретичних досліджень радіус кривошипу не впливає на продуктивність ПА з ВР внаслідок рівності пульсацій рідини всередину ротора та назовні при кожному циклі перекриття отворів переривника. За результатами експериментальних досліджень при $r=0,5$ мм продуктивність ПА з ВР на 3–6% менша за розраховану (рис. 6.33), а при $r=1,5$ мм – на 2–5% більша [141].

Це можна пояснити тим, що при розрахунках не була врахована сила Коріоліса. Однак, похибка теоретичних розрахунків не перевищує 7%, тому достовірність аналітичної залежності (3.64) достатня для інженерних розрахунків ПА з ВР.

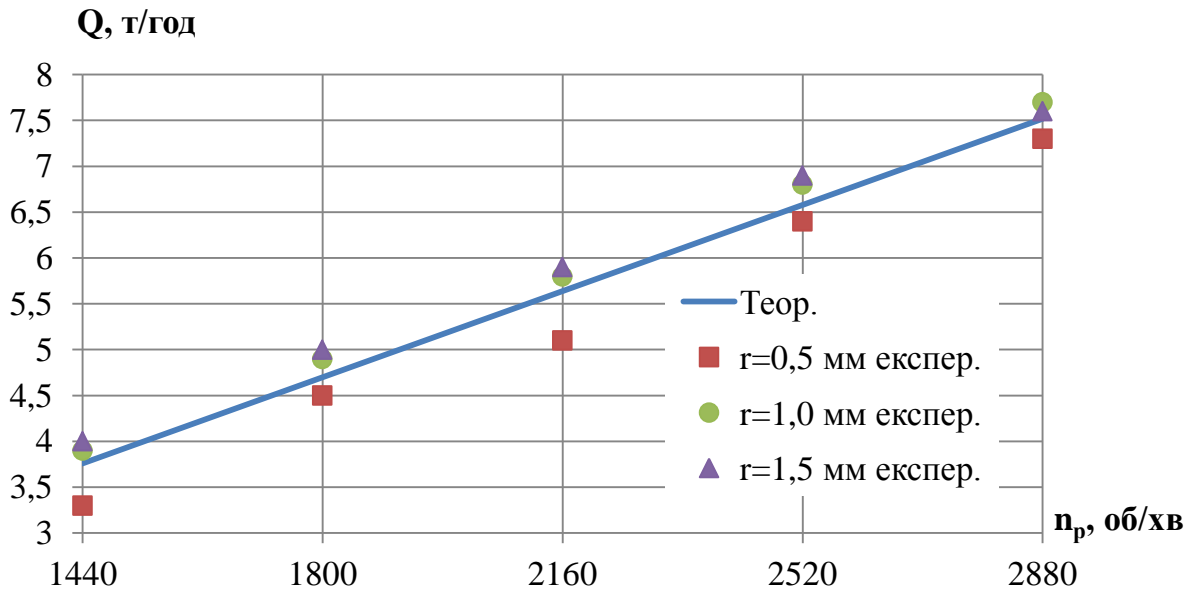


Рис. 6.33. Графік співставлення результатів експериментальних та теоретичних досліджень визначення продуктивності Q в залежності від частоти обертання ротора n_p та радіусу кривошипу r ПА з ВР.

Результати визначення енерговитрат ПА з ВР та співставлення їх з теоретичними розрахунками представлені на графіках 6.34 та 6.35.

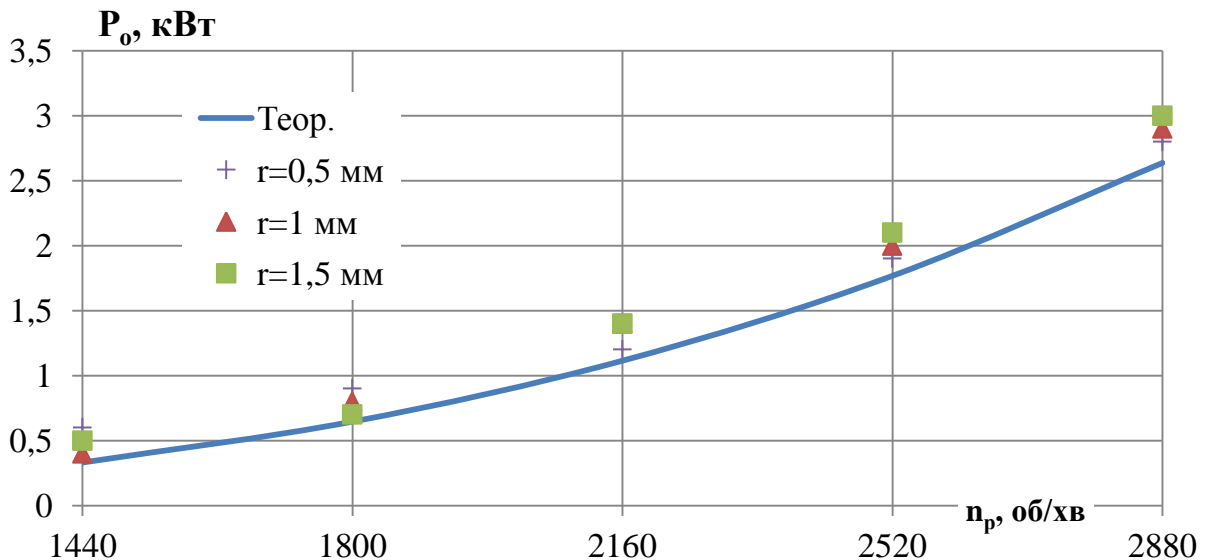


Рис. 6.34. Графік співставлення теоретичних та експериментальних даних споживаної потужності обертання ротора P_0 від радіуса кривошипу r та частоти обертання ротора n_p .

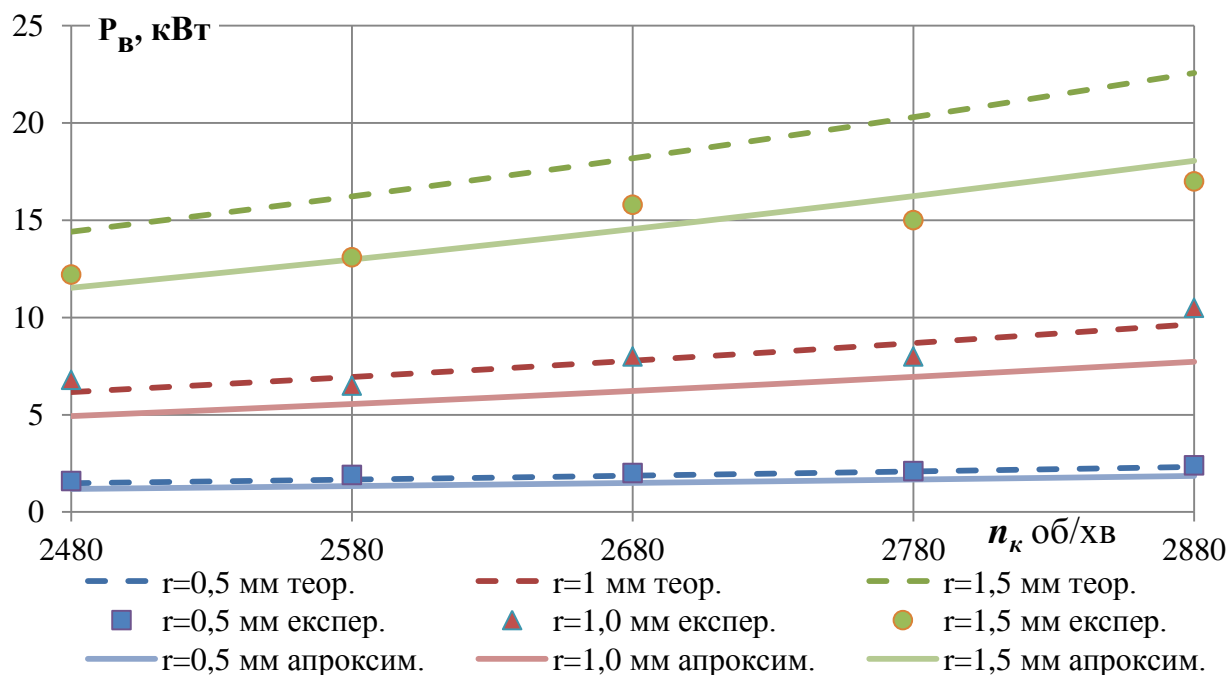


Рис. 6.35. Графік співставлення теоретичних та експериментальних даних і апроксимованих залежностей споживаної потужності вібрації P_v ПА з ВР від радіуса кривошипа r і частоти обертання ротора n_k .

Як свідчать дані рис. 6.35, потужність обертання не залежить від радіуса кривошипу та резонансних явищ. Відхилення експериментальних даних від теоретичної залежності становить 6%, тому отримана залежність (5.99) адекватна [301].

Потужність електродвигуна приводу вібрації ротора менше за розраховану на 18–22%, що викликано резонансними явищами. Апроксимована залежність для дійсної потужності вібрації $P_{вд}$ має вигляд

$$P_{вд} = 0,8P_v. \quad (6.19)$$

Коефіцієнт детермінації експериментальних даних та скоригованої потужності вібрації не перевищує 5%.

Таким чином, гомогенізація молока в ПА з ВР дозволяє отримати емульсію з дисперсністю жирової фази 0,8 мкм при частоті вібрації 2880 об/хв і амплітуді 1,8–2,2 мм. Необхідна сумарна потужність електродвигунів ПА з ВР складає 10,5 кВт при продуктивності 7,5 т/год і питомих енерговитратах 1,4–1,6 кВт·год/т.

6.4. Порівняння ефективності гомогенізуючих пристроїв за допомогою коефіцієнта гомогенізації

Визначені в результаті теоретичних і експериментальних досліджень коефіцієнти гомогенізації та додаткові фактори впливу на процес гомогенізації представлено у таблиці 6.5.

Таблиця 6.5.

Вплив чинників процесу диспергування на коефіцієнт гомогенізації

Тип гомогенізатора	Значення коефіцієнта а гомогенізації, $K_h \cdot 10^{-6} \text{ м}^{3/2}/\text{с}$	Наявність та інтенсивність впливу чинників диспергування					
		Кратність обробки	Наявність вібраційного впливу	Наявність резонансу	Рівномірність обробки	Турбулентність	Кавітація
Теоретичне значення	2400	1	–	–	+	–	–
СГРЖФ	3300	1	–	–	+	–	–
Клапанний	1600	1 (2)	–	–	–	+	+
ППГ	225	>12	+	–	–	–	–
ПА з ВР	68	1–2	+	+	+	+	+

Теоретичне значення коефіцієнта гомогенізації розраховане для значення критичного числа Вебера 14 (підрозділ 4.1), що відповідає останнім експериментальним дослідженням руйнування крапель рідини в повітряному середовищі. Різниця густини дисперсної та дисперсійної фаз на 2 порядки менше, ніж для рідини та повітря, що призводить до значно більшої залученості сусідніх шарів емульсії при русі жирової кульки. Тому очікувано, що критичне значення числа Вебера при диспергуванні молочного жиру молока буде більшим. Це припущення знайшло підтвердження при створенні умов диспергування молока в СГРЖФ, де відбувається однократний вплив на емульсію в умовах відсутності вібрації, вплив різниці швидкості фаз на руйнування жирових кульок максимальний, а інших чинників (кавітації та турбулентності) зведено до мінімуму. Експериментально визначене значення

We_k дорівнює 28. Цьому значенню за формулою (4.13) відповідає $K_h=0,0033$ м^{3/2}/с.

При клапанній гомогенізації крім високого прискорення потоку емульсії (та високої різниці швидкості дисперсної та дисперсійної фаз) суттєвий вплив на диспергування молочного жиру оказують висока турбулентність та кавітація. Вплив цих чинників призводить до зниження K_h до $1,6 \cdot 10^{-3}$ м^{3/2}/с.

Обробка молочної емульсії в клапанних гомогенізаторах не передбачає використання вібрації та резонансу, внаслідок чого вплив гідродинамічних чинників при проходженні емульсії крізь клапанну щілину істотно нерівномірний. Кратність дорівнює 1 або 2 для двоступінчастих головок (але тиск другої ступені зазвичай значно менше, ніж першої). При вібраційному впливі на емульсію, який відбувається в ППГ дисипація енергії концентрується на межі розділу фаз, підвищується рівномірність розподілу гідродинамічних умов за об'ємом емульсії. Додаються переваги багатократного проходження продукта крізь робочі органи гомогенізатора, що в сукупності призводить до значного зниження коефіцієнта гомогенізації.

В ПА з ВР створені умови для виникнення резонансних явищ в результаті яких підвищується амплітуда та зростає прискорення руху емульсії. Це знижує коефіцієнт гомогенізації мінімум в 3 рази. Крім того існують великі градієнти швидкостей в зазорі між ротором і статором, а отже і значно більша турбулентність та значно більш розвинута кавітація, ніж в ППГ. Ці причини обумовлюють найнижчий коефіцієнт гомогенізації серед розглянутих в таблиці 6.5.

6.5. Дисперсні характеристики молочної емульсії після диспергування

Зміни у фракційному складі молочної емульсії після гомогенізації в ПА з ВР, СГРЖФ і ППГ і порівняння дисперсних характеристик емульсії з клапанною гомогенізацією (при тиску 16 МПа) графічно представлені на рис. 6.36, а мікрофотографії жирових кульок – на рис. 6.37.

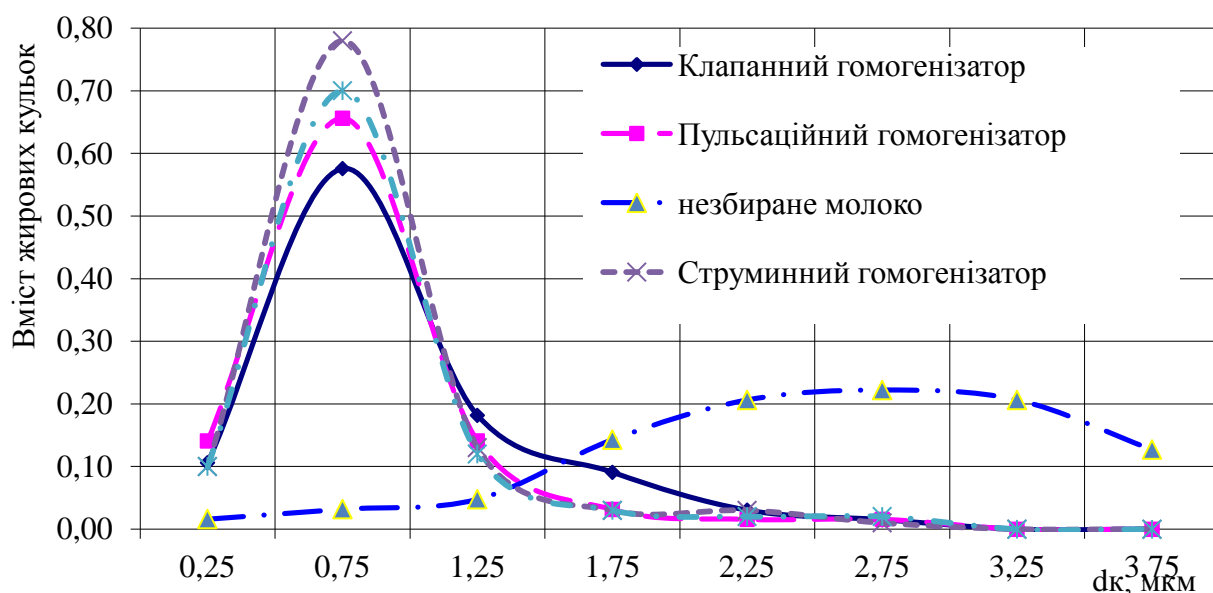


Рис. 6.36. Дисперсійний склад жирової фази молока до гомогенізації та після гомогенізації у розроблених апаратах і клапанному гомогенізаторі А1-ОГ2М.

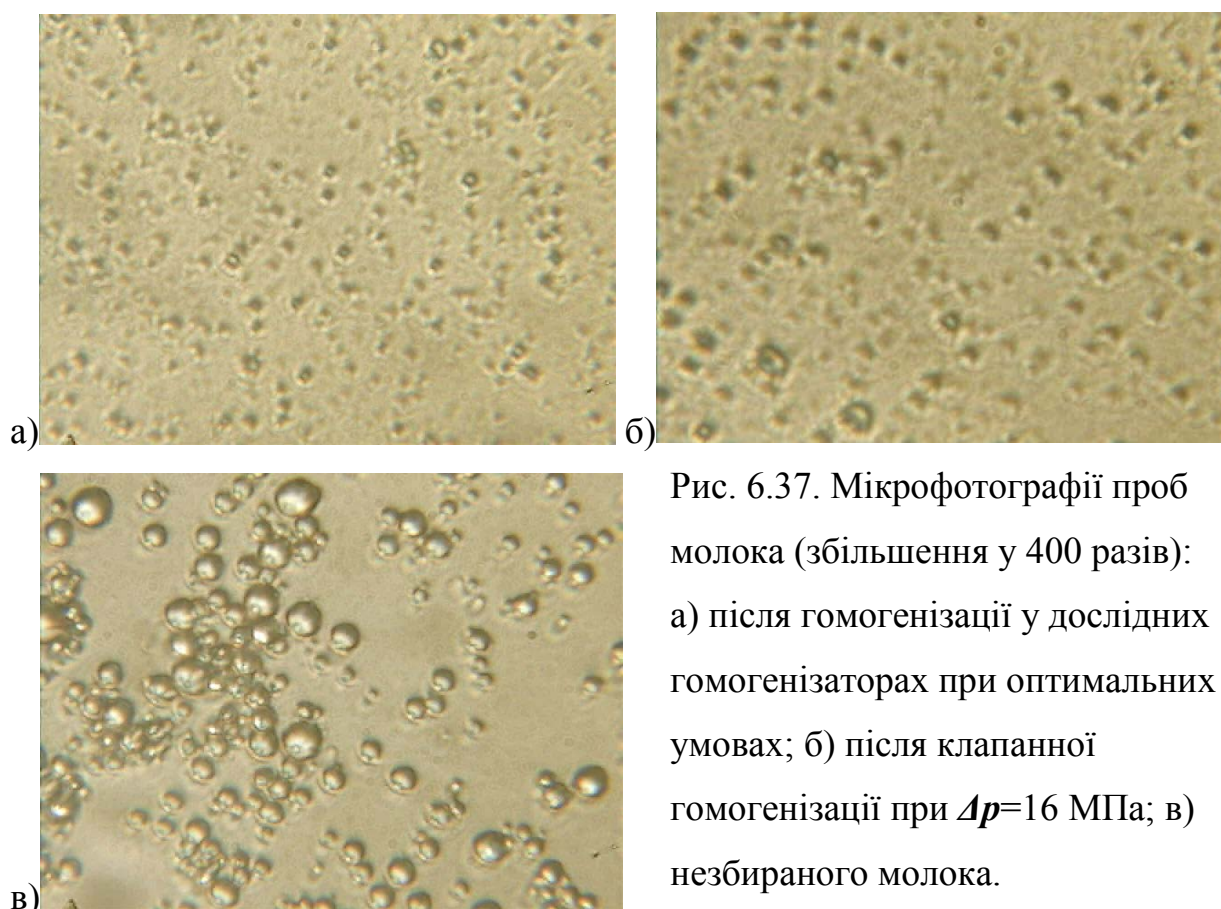


Рис. 6.37. Мікрофотографії проб молока (збільшення у 400 разів): а) після гомогенізації у дослідних гомогенізаторах при оптимальних умовах; б) після клапанної гомогенізації при $\Delta p = 16$ МПа; в) незбираного молока.

Молоко до гомогенізації характеризується такими параметрами: середній діаметр жирових кульок $D = 2,6$ мкм, дисперсія $\sigma = 1,7$, коефіцієнт

варіації $V=68\%$. Відповідно для молока після гомогенізації у розроблених та клапанному гомогенізаторі А1-ОГ2М: $D=0,75-0,8$ мм та $0,85$ мм, $\sigma=0,36-0,4$ і $0,44$, $V=46-48$ і 49% відповідно.

Середній діаметр жирових кульок при обробці у розроблених гомогенізаторах зменшився на $5-10\%$ у порівнянні з емульсією, отриманою після диспергування в клапанному гомогенізаторі, зменшилося значення дисперсії, що свідчить про підвищення якості гомогенізованої емульсії. Основними причинами позитивних змін дисперсного складу емульсії в дослідних конструкціях диспергаторів є низька рівномірність впливу гідродинамічних параметрів за перерізом клапанної щілини та значне підвищення рівномірності у СГРЖФ за рахунок використання тонкого струменя вершків, ПА з ВР та ППГ за рахунок вібраційного впливу та багатократній обробці.

Визначення коефіцієнта стабільності молочної емульсії проводилось за методикою, вказаною у розділі 2. Для вищевказаних умов стабільність χ молочної емульсії після обробки в дослідних гомогенізаторах складає $7-9\%$, що аналогічно клапанної при тиску 16 МПа.

Висновки за розділом 6

1. Експериментальні дослідження диспергування молочного жиру в СГРЖФ та експериментальне визначення показника струминного диспергування дозволили визначити критичне значення критерія Вебера для руйнування жирової кульки молока в потоці молочної плазми, яке становить 28 .

2. Проведені експериментальні дослідження ПА з ВР і ППГ показали високу кореляцію ($R^2>0,94$) між прискоренням емульсії та середнім діаметром жирових кульок, що доводить аналітичну модель диспергування жирової фази молока в пульсаційних гомогенізаторах. Експериментально визначені значення коефіцієнта гомогенізації: $0,068 \cdot 10^{-3} \text{ м}^{3/2}/\text{с}$ для ПА з ВР і $0,225 \cdot 10^{-3} \text{ м}^{3/2}/\text{с}$ для ППГ, порівняння яких зі значеннями коефіцієнта гомогенізації для машин клапанного типу дозволяє кількісно оцінювати сукупний вплив на процес

диспергування молочного жиру в різних конструкціях гомогенізаторів додаткових гідродинамічних факторів, таких як кратність обробки емульсії, турбулентність, вібрація та резонанс.

3. На підставі експериментальних досліджень закономірностей диспергування молочного жиру в СГРЖФ встановлено, що для отримання середнього розміру жирових кульок 0,8 мкм необхідно забезпечити швидкість знежиреного молока 60–65 м/с. Для зниження енергоємності процесу диспергування до 0,9 кВт·год/т необхідно використовувати вершки, жирністю 40–45%, забезпечити швидкість струменя вершків – 20–40 м/с і діаметр каналу подачі вершків – 0,9–1,0 мм.

Експериментальні дослідження підтверджують аналітично розраховані координати оптимальної зони подачі вершків, яка розташована на відстані 0,5–1,0 мм від місця найбільшого звуження каналу подачі знежиреного молока. Завдяки подачі струменя вершків у цю зону можливо підвищити дисперсність молочного жиру на 10–12%.

4. В результаті вивчення закономірностей процесу гомогенізації молока в ПА з ВР встановлено, що для забезпечення мінімальної енергоємності (1,4–1,6 кВт·год/т) необхідно застосовувати однократну обробку з вібраційним впливом, при частоті осьових вібрації ротора 2880 об/хв і амплітуді 1,8–2,2 мм.

Відмічене підвищення дисперсності гомогенізації 2–3 рази при співпадінні частоти відкриття отворів переривника з частотою вібраційних осьових коливань ротора та кутом зсуву між ними в 270° , що пояснюється виникненням резонансних явищ – збільшенням амплітуди пульсації емульсії в переривнику ПА з ВР.

5. Результати визначення необхідної кратності проходження емульсії крізь отвори поршня ППГ свідчать, що мінімальне її значення для досягнення необхідної рівномірності дисперсного складу молочної емульсії ($V \leq 0,5$) досягається при $K=12$.

Для зниження питомих енерговитрат процесу диспергування молочної емульсії в ППГ до 0,9–1,0 кВт·год/т необхідно використовувати поршень з

формою отворів у вигляді двох конусів з кутом $45-55^{\circ}$, обернених меншими основами назустріч одне одному при забезпеченні максимального коефіцієнта живого перетину отворів поршня при амплітуді 9–11 мм та частоті коливань 9000–10000 хв^{-1} .

6. Порівняння дисперсійного складу молока після гомогенізації у розроблених апаратах з клапанним гомогенізатором А1-ОГ2М дозволяє стверджувати, що середній діаметр та широта розподілу розмірів жирових кульок після обробки в дослідних апаратах менші, що свідчить про більш якісні характеристики отриманої емульсії.

РОЗДІЛ 7

ПРОЕКТУВАННЯ І МЕТОДИКИ РОЗРАХУНКУ РОТОРНИХ, ПУЛЬСАЦІЙНИХ І СТРУМИННИХ ГОМОГЕНІЗАТОРІВ З УРАХУВАННЯМ РОЗРОБЛЕНОЇ МОДЕЛІ ДИСПЕРГУВАННЯ ТА ЕКОНОМІЧНА ЕФЕКТИВНІСТЬ ЇХ ВПРОВАДЖЕННЯ

7.1. Методики розрахунку розроблених гомогенізаторів

Вихідними даними для розрахунку апаратів для гомогенізації молока є:

- необхідний середній діаметр жирових кульок молока d , що регламентується технологічними вимогами на виробництво продукту;
- продуктивність апарата Q .

При використанні СГРЖФ в якості нормалізатора молока за жирністю додатковими даними є жирність вершків $J_в$ і необхідна жирність нормалізованого молока $J_{н.м}$.

Основним технологічним вихідним параметром гомогенізатора є необхідний ступінь диспергування молочного жиру. Максимальний ступінь диспергування мають клапанні гомогенізатори, середній діаметр жирових кульок після обробки в яких складає 0,8 мкм. Такої якості достатньо для технологічних процесів виробництва молочних продуктів з використанням гомогенізованого молока. Тому це значення приймаємо за розрахункове.

В більшості технологічних інструкцій з виробництва молочної продукції необхідна дисперсність задається тиском клапанної гомогенізації [210]. В цьому разі розрахувати мінімально необхідний середній діаметр жирової кульки можливо за формулою [92, 263]

$$d = \frac{3,8 \cdot 10^{-3}}{\sqrt{\Delta p}}, \quad (7.1)$$

де Δp – тиск клапанної гомогенізації, Па.

В технологічних лініях виробництва молочних продуктів найчастіше гомогенізатор встановлюють після пастеризації [187, 190]. Температура молока при гомогенізації дорівнює 60–65⁰С.

Для розробки методики розрахунку струминних, роторних і пульсаційних апаратів для гомогенізації молока використовували аналітичні залежності розділів 3–5 та експериментальні дані розділу 6 дисертаційної роботи. Ряд значень продуктивності для розрахунку типорозмірів гомогенізаторів вибраний згідно ГОСТ 27203-87 "Гомогенизаторы для молока. Основные параметры".

7.1.1. Методика розрахунку струминного гомогенізатора з використанням нормалізації молока за жирністю

Основними параметрами СГРЖФ є подача знежиреного молока та вершків, розміри та форма внутрішньої поверхні камери гомогенізації в місці подачі вершків, діаметр каналу подачі вершків і потужність насосів подачі вершків і знежиреного молока.

З формули (5.3) визначаємо подачу знежиреного молока та вершків

$$Q_{zn} = \frac{Q_{н.м} (Ж_в - Ж_{н.м})}{\rho_m (Ж_в - Ж_{zn})}, \quad (7.2)$$

$$Q_в = \frac{Q_{н.м} (Ж_{н.м} - Ж_{zn})}{\rho_m (Ж_в - Ж_{zn})}. \quad (7.3)$$

Якщо жирність вершків не задана, то для підвищення ступеня диспергування використовуємо найбільшу технологічно обґрунтовану жирність (рис. 6.2, 6.6).

З формули (3.9) знаходимо необхідну швидкість знежиреного молока з умови досягнення необхідної дисперсності

$$v_{zn} = \sqrt{\frac{We_k \sigma_{жс-п}}{2d_{cp} \rho_{пл} k_c^2}}. \quad (7.4)$$

Для розрахунку приймаємо $We_k = 28$, $k_c = 0,3-0,35$.

Знаходимо розміри камери СГРЖФ в її центральному перетині. При використанні прямокутної камери з формули (3.10)

$$ah = \frac{Q_{zn}}{v_{zn}}. \quad (7.5)$$

$$a = h = \sqrt{\frac{Q_{zn}}{v_{zn}}}. \quad (7.6)$$

При використанні циліндричної камери

$$d_{кам} = \sqrt{\frac{4Q_{zn}}{\pi v_{zn}}}. \quad (7.7)$$

Для зниження енерговитрат і отримання максимального μ_k внутрішній профіль камери необхідно виготовити коноїдної форми. Якщо це неможливо, то конічним з кутом конусності $48-50^\circ$.

Діаметр каналу подачі вершків визначаємо з формули (6.15)

$$d_6 > \sqrt{\frac{v_{zn} s_k \varepsilon_k (\mathcal{J}_{н.м} - \mathcal{J}_{zn})}{10 \pi N_k (\mathcal{J}_6 - \mathcal{J}_{н.м})}}. \quad (7.8)$$

Кількість каналів приймаємо максимально можливим з умови діаметра каналу подачі вершків та внутрішнього перерізу площі камери гомогенізації. При $a = h = d_{кам} = 2-3$ мм і $d_6 = 0,9$ мм $N_k = 2...3$. Для підвищення площі каналі подачі вершків при малій товщині шару жирової фази перспективним є використання струминного гомогенізатор зі щілинними каналами [311].

Горизонтальна координата місця розташування каналів подачі вершків розраховується з формули (3.14), яка з урахуванням (5.5) набуває вигляду

$$S_1 = 0,05 \frac{v_{zn}^2 \rho_{zn}}{2\varphi_k^2} + 0,6. \quad (7.9)$$

В якості насосів для подачі знежиреного молока та вершків слід обирати насос об'ємної дії з гарантованою подачею продукта. Для їх підбору тиск подачі розраховується за формулами (5.5) і (5.6):

$$\Delta p_{zn} = \frac{v_{zn}^2 \rho_{zn}}{2\varphi_k^2}, \quad (7.10)$$

$$\Delta p_6 = \frac{v_6^2 \rho_6}{2\varphi_6^2}, \quad (7.11)$$

Швидкість вершків на вході до камери СГРЖФ визначимо з формули (5.17)

$$v_g = \frac{4Q_g}{N_k \pi d_g^2}, \quad (7.12)$$

Необхідна потужність для насосів подачі вершків та знежиреного молока може бути розрахована за виразами

$$P_g = \frac{Q_g \Delta p_g}{\eta_{нг} \eta_{пг}}, \quad (7.13)$$

$$P_{зн} = \frac{Q_{зн} \Delta p_{зн}}{\eta_{нзн} \eta_{пзн}}, \quad (7.14)$$

де $\eta_{нг}$, $\eta_{нзн}$ – коефіцієнти корисної дії насосу подачі вершків і знежиреного молока відповідно;

$\eta_{пг}$, $\eta_{пзн}$ – коефіцієнти корисної дії передач і редуктора між насосами подачі вершків і знежиреного молока та відповідними електродвигунами.

Сумарна потужність СГРЖФ визначається з формули (5.1)

$$P = P_{зн} + P_g. \quad (7.15)$$

Питомі енерговитрати

$$E_{пит} = \frac{P}{Q_{н.м}}.$$

Для типового ряду продуктивностей гомогенізаторів основні конструктивні та енергетичні показники зведені в табл. 7.1.

Таблиця 7.1

Розрахункові дані типорозмірів СГРЖФ з роздільним подаванням жирової фази

Продуктивність, $Q_{н.м}$, т/год	Діаметр камери $d_{кам}$, мм	Діаметр каналу вершків d_g , мм	Кількість каналів N_k	Потужність насосу вершків, P_g , Вт	Потужність насосу знежир. молока, $P_{зн}$, Вт	Сумарна потужність, P , Вт	Питомі енерговитрати, $E_{пит}$ кВт·год/т
1	2,2	1,4	2	0,10	0,7	0,8	0,8
2,5	3,6	2,2	2	0,18	1,8	2,0	0,8
5	5,0	3	2	0,35	3,6	4,0	0,8
10	4,4	2,8	2	0,72	7,2	7,9	0,8

7.1.2. Методика розрахунку пульсаційного апарата з ротором, що вібрує для гомогенізації молока

Основними параметрами ПА з ВР, які необхідно розрахувати, це: частота обертання та вібрації ротора, його амплітуда осьових коливань, діаметр і кількість отворів переривника та необхідна потужність для обертових і коливальних рухів ротора.

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 розділах 4, 5 і 6 визначено, що для досягнення виникнення резонансу і максимального ступеня диспергування молочного жиру оптимальна частота обертання ротору повинна бути синхронізована з частотою обертання кривошипу (4.96) і кут зсуву фаз між обертанням кривошипу та ротору повинен складати 270° .

$$n_p = \frac{n_k}{z}. \quad (7.16)$$

Дослідження показника ефективності гомогенізації (5.134) і (4.110) 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 (рис. 5.28).

Для проектування класичних РПА циліндричного типу радіальний зазор приймають мінімально можливим для підвищення кавітаційних ефектів і його величина залежить від технічних можливостей виготовлювача. Значення, яке рекомендується для РПА становить $\delta = 0,1$ мм [330]. 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 (рис. 4.18). При великих зазорах характер зміни швидкості v_0^g буде іншим [88], що вплине на

умови створення резонансу руху рідини в ПА з ВР. Оптимальні умови виникнення резонансу стануть відмінними від зазначених вище, що знизить ефективність роботи апарата, що проектується. Тому величину зазору приймаємо $\delta < 0,5$ мм.

Довжину каналів статора та ротора для підвищення ефективності гомогенізації необхідно зменшувати. Граничними умовами для їх величини є міцнісні 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 міцнісними характеристиками l_p і δ уточнюємо їх значення, виходячи з умови виникнення акустичного резонансу (5.144), (5.146) [270, 272, 330]

$$l_c = \frac{60c}{(4k+2)n_k} \quad (7.17)$$

$$\delta = \frac{(0,438...0,435)kD}{z_p}, \quad (7.18)$$

де $k = 1, 2, 3$ і т.д.

Діаметр ротора визначимо з рівняння (5.80), де Q_o виражена у т/год

$$D = 3,08 \sqrt[4]{\frac{Q_o z^2 (l_p + \delta + l_c)}{n_p \rho_m}} \quad (7.19)$$

Радіус кривошипу ПА з ВР визначимо з рівнянь (4.110) і (6.11)

$$r = \frac{30z \left(\frac{\pi D}{2z} + 8\delta \right)^2 \left(\frac{K_h^2}{d_k^2} - \frac{\pi^3 n_k^2 D^2}{3600 z^2 (l_p + \delta + l_c)} \right)}{D^2 n_k^2 \pi^2} \quad (7.20)$$

Кількість отворів ротора пов'язана з діаметром ротора та діаметром отворів (4.61)

$$d_p = \frac{\pi D}{2z} \quad (7.21)$$

Ширина ротора збільшує енерговитрати ПА з ВР (5.82), тому приймаємо цей параметр мінімальним, використовуючи співвідношення

$$H > d_p. \quad (7.22)$$

Або

$$H > \frac{\pi D}{2z}. \quad (7.23)$$

Електродвигуни приводу обертання P_o та вібрації ротора P_e підбираємо за необхідними потужностями, які знаходимо з залежностей (5.89), (5.111) і (6.19)

$$P_o = 1,1D^3 n_p^2 \left(\frac{\rho_m D^3 n_p}{9200z^2 (l_p + \delta + l_c)} + \frac{\mu}{26,4z\delta} \right). \quad (7.24)$$

$$P_{e0} = 0,144n_k^3 r^2 (m + 0,43\rho_m z^2 D^2 r). \quad (7.25)$$

Для зменшення енерговитрат вібрації ротора масу ротора та рухомих частин приводу необхідно мінімізувати, використовуючи харчові корозійностійкі метали та сплави з мінімальною щільністю.

Розрахункові дані типорозмірів ПА з ВР (табл. 7.2) показують, що значення питомого енергоспоживання значно знижується з підвищенням продуктивності.

Таблиця 7.2

Орієнтовні розрахункові дані типорозмірів пульсаційного гомогенізатора з вібруючим ротором

Продуктивність, Q_o , т/год	Діаметр ротора, м	Радіус кривошипу, мм	Потужність вібрації, Вт	Потужність обертання ротора, Вт	Сумарна потужність, Вт	Питомі енерговитрати, кВт·год/т
1	0,07	0,0021	8237	35	8272	8,27
2,5	0,09	0,0016	7431	132	7563	3,03
5	0,11	0,0012	5622	364	5986	1,20
10	0,13	0,0007	2635	1014	3649	0,36

Питоме енергоспоживання для клапанних гомогенізаторів становить 7–10 кВт·год/т, тому заміна таких машин на ПА з ВР з точки зору енергоефективності має сенс при продуктивності більше 1,5 т/год.

7.1.3. Методика розрахунку пульсаційного поршньового гомогенізатора молока

Основними параметрами ППГ, які необхідно визначити є: амплітуда та частота коливань поршня, геометричні параметри поршня та необхідна для роботи потужність. Для розробки методики розрахунку цих параметрів використані результати теоретичних і експериментальних досліджень ППГ, викладені в розділах 3–6 цієї роботи.

Мінімальну амплітуду коливань поршня ППГ для диспергування жирової фази молока визначимо з формули (4.51)

$$s = \frac{K_o}{2\varphi} \left(\frac{K_z}{d_k \pi n} \right)^2. \quad (7.26)$$

Коефіцієнт гомогенізації для ППГ з одним поршнем $K_z=225$.

Згідно з результатами теоретичних і експериментальних досліджень ППГ, для підвищення ефективності гомогенізації необхідно підвищувати частоту вібрації поршня. Тому для приводу гомогенізатора необхідно обирати електродвигуни з найбільшою частотою обертання валу. Наприклад двигуни серії 4АМХД мають частоту обертання валу 6000 об/хв. При застосуванні мультиплікатора для підвищення частоти вібрації поршня знижується коефіцієнт корисної дії приводу, збільшується його вартість і масо-габаритні показники. Але мультиплікатор дає можливість підвищити частоту вібрації поршня, що знизить питомі енерговитрати гомогенізатора. Тому доцільність використання мультиплікатора у приводі ППГ слід вирішувати у кожному конкретному випадку шляхом розрахунків.

Експериментально доведене підвищення ефективності ППГ при використанні конічних отворів поршня з максимальним коефіцієнтом живого перетину поршня. При зменшенні малого діаметра конусного отвору d_o підвищується вірогідність облітерації внутрішнього діаметра отворів поршня, що знижує працездатність гомогенізатора. Для зменшення облітерації мінімальне значення d_o повинно відповідати умові

$$d_o \geq 2 \text{ мм.} \quad (7.27)$$

Для конічних отворів з метою забезпечення міцності поршня, враховуючи необхідність зменшення його щільності і використання для виготовлення поршня харчових пластмас, мінімальна товщина поршня визначається з формули (5.126)

$$h_n \geq 6d_o. \quad (7.28)$$

Отвори розташовуємо рівномірно по площі поршня з метою мінімізації застійних зон.

Більший діаметр конічних отворів поршня ППГ визначаємо з формули (5.131)

$$D_o = h_n \cdot \operatorname{tg} \frac{\theta}{2} + d_o, \quad (7.29)$$

де $\theta=48-50^\circ$ – кут конусності, для якого коефіцієнт швидкості $\varphi_{ш}=\max=0,96$.

Орієнтовні максимальні значення коефіцієнта живого перетину отворів поршня в залежності від продуктивності ППГ при використанні конічних отворів надані в таблиці 7.3.

Таблиця 7.3

Орієнтовні значення K_o для розрахунку параметрів ППГ

Продуктивність, Q , т/год	0,5	2,5	5	10
Коефіцієнт живого перетину поршня K_o	0,03	0,04	0,05	0,06

Необхідний внутрішній діаметр камери ППГ визначимо з формули (4.40)

$$D = \sqrt{\frac{2KQ}{\pi sn}}. \quad (7.30)$$

Мінімальну кратність обробки за результатами експериментальних досліджень приймаємо $K=12$.

З умови (5.128) визначимо розрахункове значення кількості отворів поршня N

$$N = 0,9 \left(\frac{D}{D_o} \right)^2. \quad (7.31)$$

Після остаточного прийняття N розраховуємо коефіцієнт живого перетину поршня

$$K_o = \frac{Nd_o^2}{D^2}. \quad (7.32)$$

Необхідну потужність електродвигуна приводу ППГ визначимо з формули (5.61) з урахуванням коефіцієнта корисної дії приводу η

$$P_{де} = \frac{\pi^3 (1 - K_o) D^2 n^2 s^2}{\eta} \left(\pi n (0,32 h_n \rho_n + 0,1 C \rho_m s) + 0,11 \frac{\rho_m}{K_o} \right), \quad (7.33)$$

де C – коефіцієнт опору руху поршня.

Питомі енерговитрати знаходимо з формули (4.36)

$$E_{пит} = \frac{P}{Q \rho_m}, \quad (7.34)$$

З підвищенням продуктивності значення питомих енерговитрат значно підвищуються (табл. 7.4).

Таблиця 7.4

Орієнтовні розрахункові дані типорозмірів пульсаційного гомогенізатора

Продуктивність, Q , т/год	Частота вібрації поршня n , хв ⁻¹	Амплітуда коливання s , мм	Діаметр поршня D , мм	Потужність, кВт	Питоме енергоспоживання, кВт·год/т
1	6000	12,5	41	0,72	0,72
2,5	6000	16,7	56	2,45	0,98
5	6000	20,1	73	6,8	1,36
10	6000	25,1	92	14,2	1,42

При підвищенні необхідної продуктивності збільшується необхідна амплітуда вібрації поршня, що призводить до підвищення питомого енергоспоживання ППГ. Питоме енергоспоживання для клапанних

гомогенізаторів становить 6,5–8 кВт·год/т і знижується при підвищенні продуктивності, тому заміна таких машин на ПА має більший економічний ефект при невисокій потрібній продуктивності.

Методики розрахунку ПА з ВР, СГРЖФ та ППГ впроваджені в навчальний процес кафедри Обладнання переробних та харчових виробництв імені професора Ф.Ю. Ялпачика Таврійського державного агротехнологічного університету, що підтверджено відповідними актами впровадження (додаток Д).

7.2. Синтез конструктивних рішень гідродинамічних гомогенізаторів, оснований на результатах теоретичних і експериментальних досліджень

7.2.1. Надання коливань емульсії, що обробляється, та використання резонансних явищ

Інтенсифікація процесу гомогенізації за рахунок коливань робочого середовища розглянута у підрозділі 1.6. Для роторного апарата переваги ротора, що здійснює осьові коливання, надані у пункті 3.3.2 і підрозділі 4.3. Конструктивні особливості дослідного апарата захищені патентами [247– 249] (додаток Ж).

Для струминної гомогенізації використання переваг коливань емульсії можливо досягти, якщо частину робочої камери або направляючої камери з'єднати зі збудником коливань [314]. Коливання направляючої 2 (рис. 7.1), які передаються від вібраційного пристрою 5, призводять до:

- додаткового підвищення швидкості ковзання жирової кульки відносно плазми молока;
- усунення застійних зон;
- рівномірної дисипації енергії коливань по об'єму середовища, що обробляється;
- підвищення турбулентності у пристінних зонах каналу, що знижує

облітерацію каналів. Це підвищує ступінь диспергування та надійність роботи гомогенізатора.

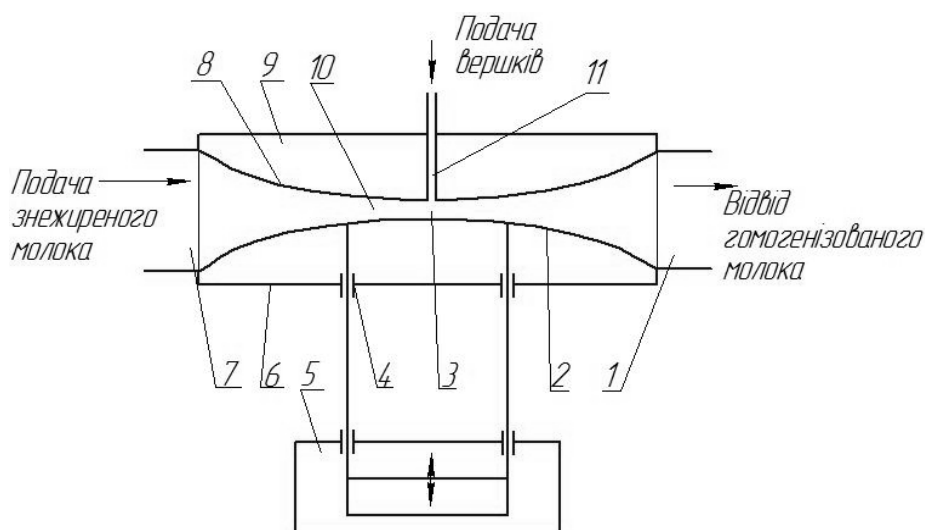


Рис. 7.1. Схема струминного гомогенізатора зі збудником коливань за патентом України 122548 [314]: 1 – патрубок відводу гомогенізованого продукту; 2 – рухома напрямлювач; 3 – центральна частина камери; 4 – ущільнювачі; 5 – збудник коливань; 6 – корпус; 7 – патрубок подачі знежиреного молока; 8 – нерухома напрямлювач; 9 – камера; 10 – центральний канал подачі знежиреного молока; 11 – канал подачі вершків.

Резонансного ефекту в струминному гомогенізаторі можливо досягти, якщо використовувати пульсаційну подачу емульсії в камеру гомогенізації та синхронізувати її з зовнішніми коливаннями елементів, розташованих у камері. Подачу продукту з вираженими пульсаціями можливо здійснити шляхом використання плунжерного, мембранного або шестеренного насоса (рис. 7.2). Співпадіння пульсацій від насоса подачі емульсії з частотою збудника коливань в робочій камері апарата знижує витрати енергії та підвищує швидкість ковання жирових кульок, що підвищує ефективність роботи гомогенізатора.

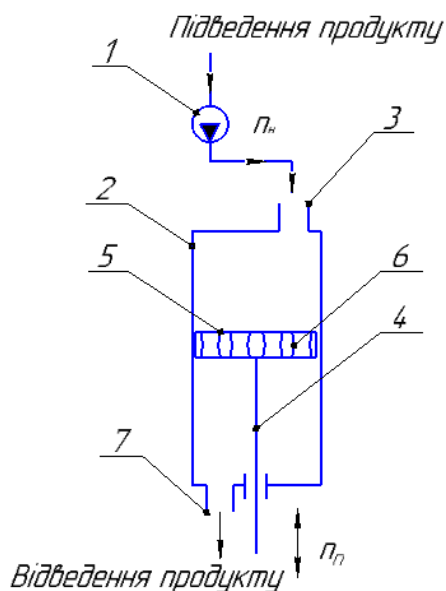


Рис. 7.2. Схема виникнення резонансного ефекту при пульсаційній гомогенізації: 1 – насос; 2 – циліндр; 3 – патрубок подачі продукту, 4 – шток, 5 – поршень-ударник; 6 – наскрізні отвори; 7 – патрубок відводу гомогенізованого продукту.

7.2.2. Підвищення відносної швидкості дисперсної та дисперсійної фаз за рахунок використання зустрічних струменів

Висока ефективність використання протитечійно-струминних гомогенізаторів [264] обумовлена створенням високої швидкості ковзання жирових кульок дисперсійному середовищі. Негативні явища надлишкового піноутворення легко уникнути при зіткненні затоплених струменів емульсії.

Зважаючи на широку розповсюдженість у виробничих умовах молокопереробних підприємств гомогенізаторів клапанного типу, покращення їх енергоефективності без істотних змін конструкції, а отже і високих капіталовкладень, є важливою та актуальною задачею молочної промисловості.

Одним зі шляхів вирішення такої задачі є вдосконалення головки гомогенізатора шляхом виконання в ній центрального каналу 2 (рис. 7.3), який з'єднаний з ідентичними кільцевими каналами 5 і 8, розташованими співвісно навпроти один до одного, щоб вони утворювали зону зіткнення двох протилежно направлених кільцевих потоків емульсії [127]. Внаслідок цього дисперсні частки будуть подрібнюватись не тільки за рахунок створення високого градієнта швидкості потоку, що проходить між сідлом і клапаном, а ще й при проникненні дисперсних часток одного потоку у дисперсійну фазу зустрічного потоку, що дозволить зменшити необхідний тиск гомогенізації, а отже й питомі енерговитрати процесу [257].

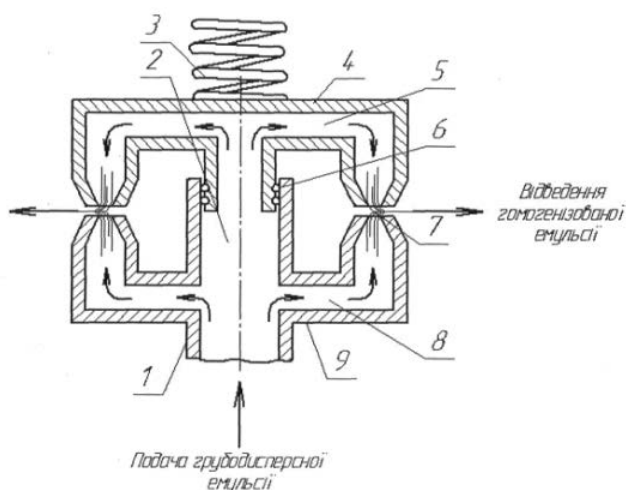


Рис. 7.3 – Головка гомогенізатора для утворення зустрічних струменів за патентом 98488 [127]: 1 – канал подачі; 2 – центральний канал; 3 – притискний механізм; 4 – клапан; 5 – кільцеві канали клапана; 6 – ущільнюючі кільця; 7 – кільцева щілина; 8 – кільцеві канали сідла; 9 – сідло.

В центральному каналі 2 емульсія розділяється на два протилежно направлені потоки та, проходячи по кільцевих каналах клапана 5 і сідла 8, спрямовується до щілини 7, де відбувається зіткнення потоків емульсії та часткова гомогенізація, а саме взаємопроникнення дисперсних часток одного потоку у дисперсійну фазу іншого, завдяки чому утворюється різниця швидкостей між дисперсною часткою та дисперсійною фазою, необхідна для руйнування дисперсної частки. Після зіткнення двох протилежно направлених потоків емульсія проходить у щілині 7 між сідлом 9 та клапаном 4, де утворюється високий градієнт швидкості потоку, завдяки чому відбувається "просковзування" дисперсної частки відносно дисперсійної фази емульсії (утворюється різниця швидкостей між дисперсною часткою та дисперсійною фазою) і відбувається остаточна гомогенізація емульсії та відведення її з головки гомогенізатора.

Для підвищення ефективності конструкції, представленої на рис. 7.3, необхідна наявність каналів (вікон) 11 (рис. 7.4) відведення емульсії з порожнин, утворених клапаном і сідлом [124].

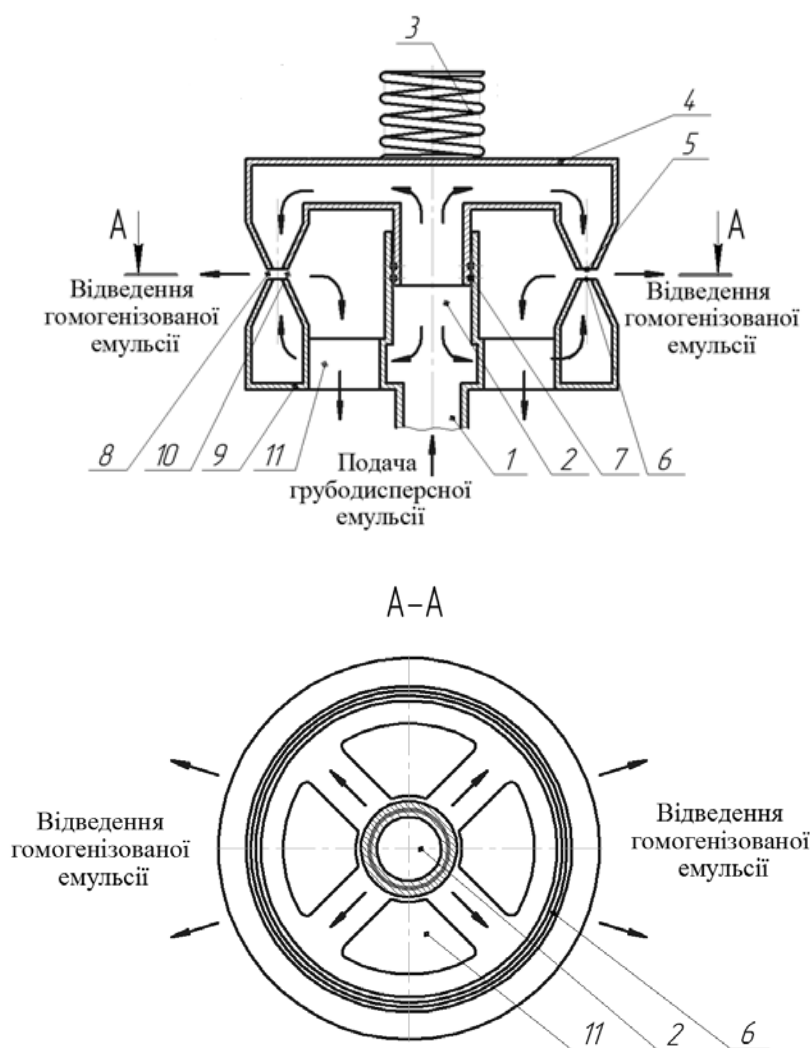


Рис. 7.4. Варіант виконання головки гомогенізатора з вікнами для відведення емульсії у сідлі за патентом 106521 [124]: 1 – канал подачі; 2 – центральний канал; 3 – притискний механізм; 4 – клапан; 5 – кільцеві канали клапана; 6 – кільцеві канали сідла; 7 – ущільнюючі кільця; 8 – зовнішня щілина між клапаном та сідлом; 9 – сідло; 10 – внутрішня щілина між клапаном та сідлом; 11 – вікна для відведення емульсії.

Їх наявність дозволяє вільно виходити емульсії після зіткнення як з зовнішньої, так і з внутрішньої частини зазору між клапаном та сідлом, що приблизно в два рази підвищує продуктивність гомогенізатора (при рівній з прототипом довжині кільцевих каналів) (рис. 7.4). Крім того, унеможливується виникнення застійної зони у внутрішній тороподібній порожнині гомогенізуючої головки (між внутрішніми поверхнями клапана,

сідла та зовнішньою поверхнею центрального каналу), що призводить до підвищення якості готової емульсії.

Варіантом конструктивного рішення з метою удосконалення головки клапанного гомогенізатора для забезпечення максимальної швидкості ковзання жирової кульки, необхідної для руйнування дисперсної частки, є розташовані кільцеві канали в клапані та сідлі для співвісного виходу потоку емульсії після зіткнення в зазорі між внутрішніми поверхнями клапана і сідла [180]. На виході цих каналів утворюється зона зіткнення всіх трьох потоків 12 (рис. 7.5) з підвищеною швидкістю ковзання жирової кульки, завдяки чому відбувається гомогенізація емульсії та відведення її з головки гомогенізатора.

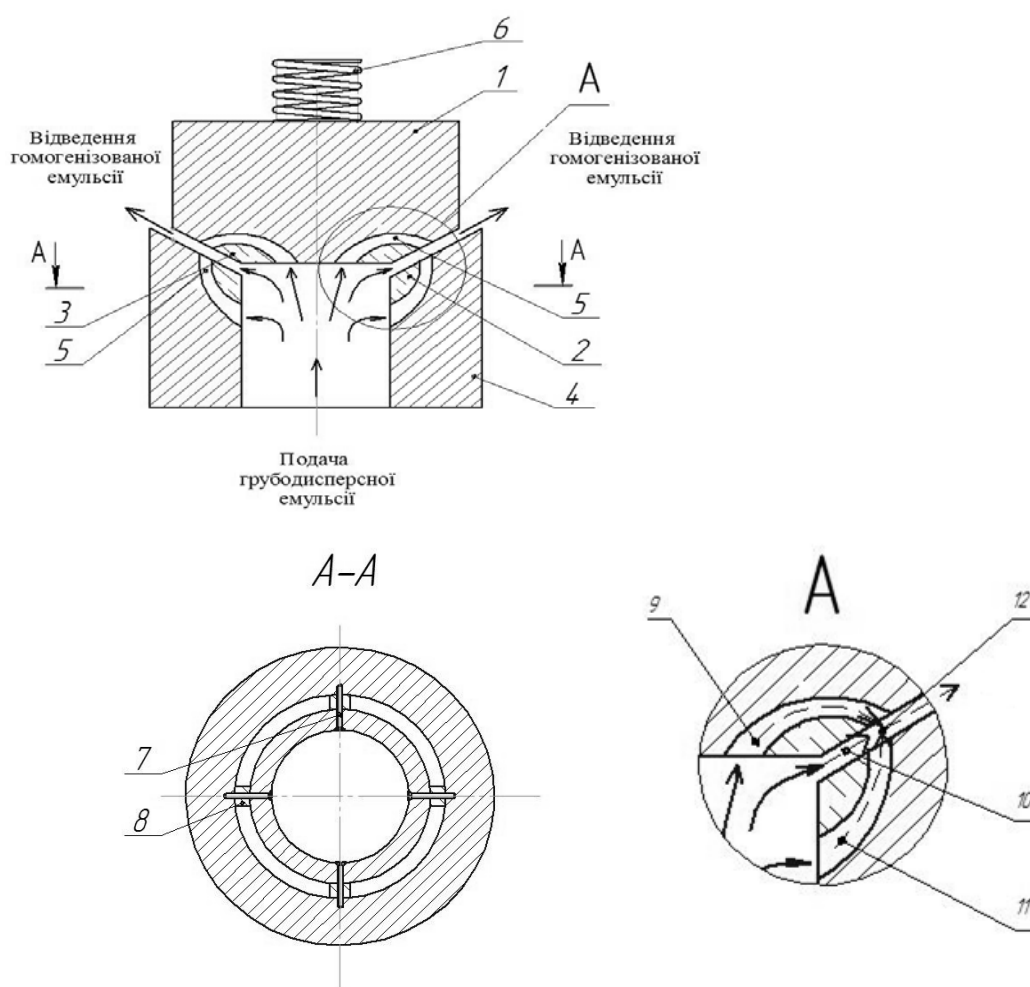


Рис. 7.5. Клапанна головка з каналами за патентом 112317 [180]: 1, 2 – верхні частини клапана та сідла; 3, 4 – нижні частини клапана та сідла; 5 – канали; 6 – притискний механізм; 7 – гвинти; 8 – опори; 9, 10, 11 – верхній, центральний та нижній потоки, 12 – зона зіткнення потоків.

Підвищення швидкості ковзання жирових кульок призводить до підвищення продуктивності процесу гомогенізації та зниження питомих енерговитрат.

7.2.3. Профілювання поверхонь, які утворюють потоки та струмені

Одним з ефективних шляхів підвищення прискорення потоків емульсії, які формуються отворами поршня пульсаційного гомогенізатора, є оптимізація форми внутрішньої поверхні таких отворів. У пункті 5.2.2 дисертаційної роботи аналітично доведено, що форма отворів поршня, їх розташування і співвідношення довжини отвору до діаметра суттєво впливають на дисперсні характеристики молочної емульсії, що підтверджується експериментальними дослідженнями дисперсності (пункт 6.2.1) і енерговитрат (пункт 6.3.2). Для підвищення швидкості емульсії, а отже і її прискорення необхідно обирати поверхні з максимальним коефіцієнтом швидкості φ , а для зниження енерговитрат – з максимальним коефіцієнтом подачі μ .

Найвищі значення φ належать конусним поверхням з кутом 45–50°. Такі струмені мають найбільше прискорення потоку, а отже й дозволяють тримати максимальний ступінь дисперсності емульсії [83, 172].

Найменшими втратами тиску характеризуються поверхні в вигляді сопла Вентурі [83], що при використанні в пульсаційних диспергаторах призводить до зменшення гідравлічних втрат у отворах поршня.

Пульсаційний поршньовий гомогенізатор для рідких продуктів складається з циліндра 1 (рис. 7.6 а) з поршнем-ударником 2, штока 3, імпульсного приводу 4, патрубків підведення 5 і відведення 6 гомогенізуючої рідини, колектора вводу 7 гомогенізованої рідини з отворами 8 її вводу в циліндр 1, вентиля 9 випуску й регулювання витрати гомогенізованої рідини [131].

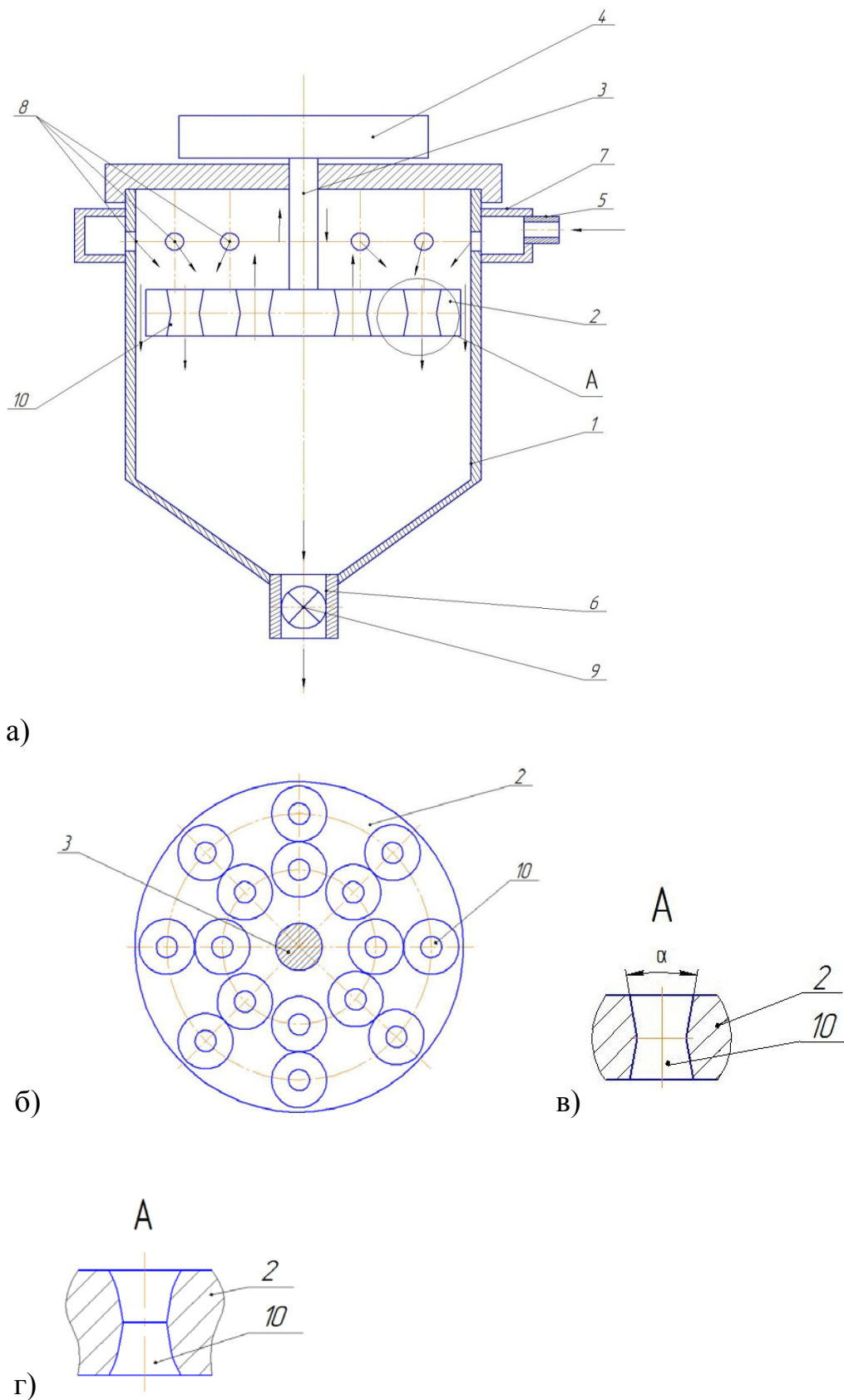


Рис. 7.6. Конструктивне рішення за патентами 66085 [131] і 121278 [132]: а) загальний вид гомогенізатора, б) поршень, в) переріз отворів поршня конічної форми, г) переріз отворів поршня у вигляді сопел Вентурі.

В поршні-ударнику 2 виконані осьові наскрізні отвори 10 (рис. 7.6 б) у вигляді дифузорів, основа яких розташована критичним перерізом на глибині, рівній половині товщини поршня-ударника. Отвори можуть бути виконані у вигляді сопел Вентурі (рис. 7.6 г) або конічних отворів з кутом конусності 45–50° (рис. 7.6 в) [132].

За рахунок виконання осьових наскрізних отворів 10 у вигляді дифузорів, основа яких розташована критичним перерізом на глибині, рівній половині товщини поршня-ударника, при поступальних та зворотних рухах поршня відбувається однаковий вплив на продукт (емульсію), що обробляється і призводить до підвищення рівномірності дисперсного складу емульсії. Виконання дифузорів з кутами конусності 45–55° призводить до отримання максимальної дисперсності, яка формується при рухах поршня при проходженні продукту крізь дифузори, а виконання отворів у вигляді сопел Вентурі – до мінімальних енерговитрат процесу диспергування.

З цією ж метою канали клапанної головки з зустрічними потоками (рис. 7.4) виконуються конусними з кутом 45–50° [125] або коноїдної форми для забезпечення максимального значення коефіцієнта витрат потоку [126].

В струминних гомогенізаторах одним з ефективних і простих способів підвищення ступеня диспергування є зменшення поперечного перерізу або товщини струменя вершків, що подається у потік знежиреного молока. Експериментальні дослідження (пункт 6.1.2) свідчать, що зменшення діаметра каналу подачі вершків на 20% призводить до підвищення дисперсності емульсії молока на 15%. Отже зменшення внутрішнього перерізу каналів подачі вершків при збільшенні їх кількості (при необхідності підбору їх сумарного перерізу для використання нормалізації за жирністю [310]) може суттєво підвищити ефективність диспергування емульсії в такому типі гомогенізатора (рис. 7.7) [311].

Виконання каналів подачі вершків у вигляді кільцевої щілини (рис. 7.8) дозволяє [312]:

– отримати тонкий шар жирової фази при подачі його у швидкісний

потік знежиреного молока, що забезпечить високий ступінь диспергування,

– підвищити площу щілинних каналів подачі вершків, що збільшить подачу вершків в гомогенізатор (при незмінному перепаді тиску), тобто підвищить його продуктивність.

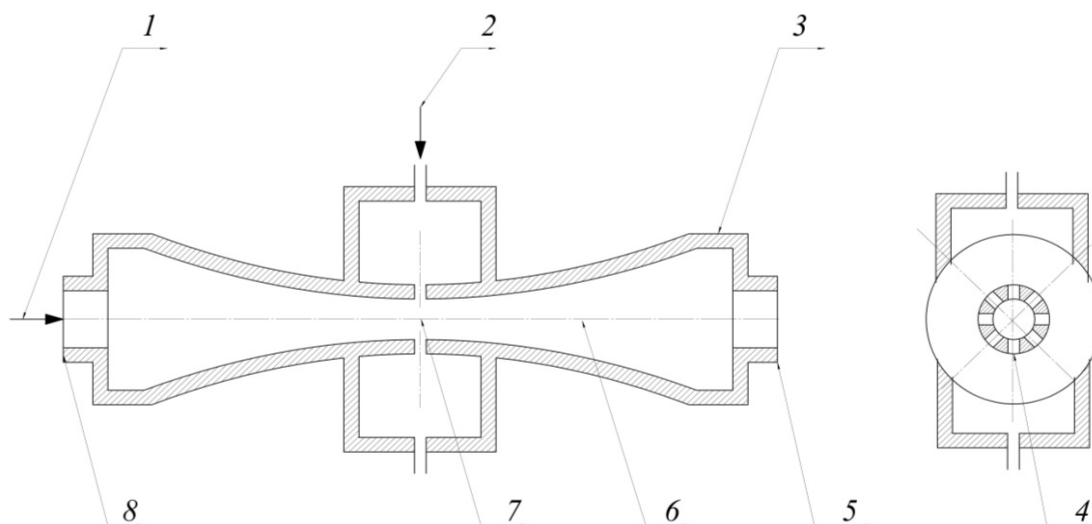


Рис. 7.7. Струминний гомогенізатор за патентом 94041 [311]: 1 – подача знежиреного молока; 2 – подача жирової фази; 3 – корпус; 4 – отвори (канали) для подачі жирової фази; 5 – патрубок відведення диспергованої емульсії; 6 – центральний канал подачі знежиреного молока; 7 – центральна частина каналу; 8 – патрубок подачі знежиреного молока.

Конфузор 2 необхідний для створення високої швидкості потоку знежиреного молока, від величини якої залежить ступінь диспергування жирової фази, а дифузор 6 в даній розробці виконує роль змішувача – в ньому відбувається рівномірний розподіл подрібнених жирових часток в потоці знежиреного молока. Виконання меншого діаметра дифузора більше за менший діаметр конфузора необхідно для створення навколо потоку знежиреного молока при виході з конфузора кільцевої зони зі зниженим тиском. В цій зоні відбувається ежекція вершків у швидкісний потік знежиреного молока по принципу струминного насоса, що дозволяє знизити тиск подачі вершків і знизити енерговитрати.

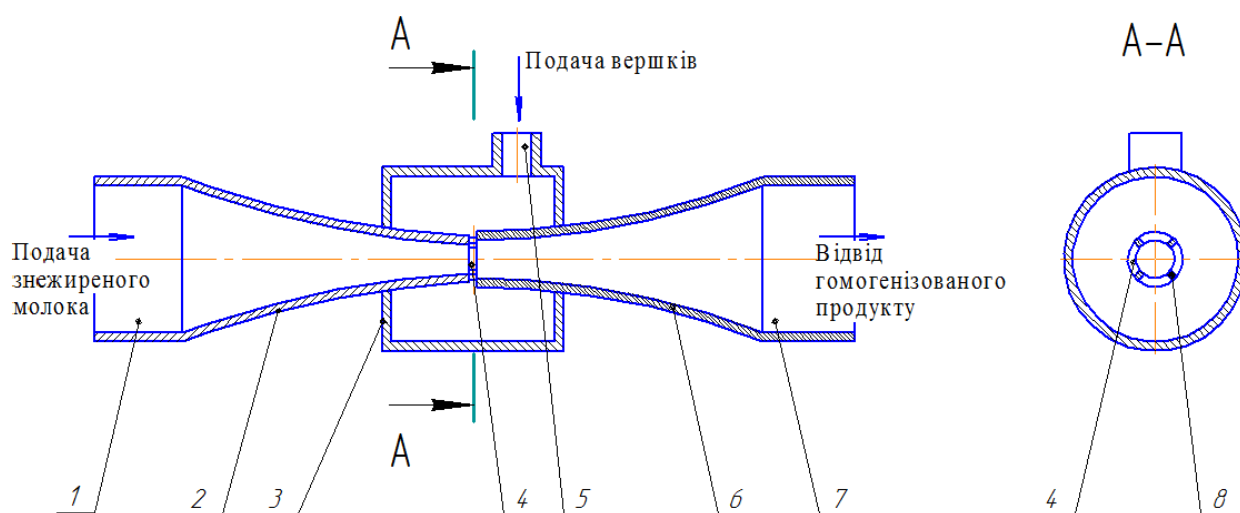


Рис. 7.8. Струминний гомогенізатор з каналами у вигляді щілин за патентом 106522 [312]: 1 – патрубок подачі знежиреного молока; 2 – конфузур; 3 – камера для вершків; 4 – щілинні пази; 5 – патрубок подачі вершків; 6 – дифузур; 7 – патрубок відводу гомогенізованого продукту; 8 – упори.

Недоліками використання каналів (щілин) подачі вершків з внутрішніми розмірами менше 1 мм є схильність їх до облітерації, внаслідок чого знижується подача вершків у потік знежиреного молока, що призводить до зменшення вмісту жиру в готовому продукті, тобто погіршення якості гомогенізованого продукту та зниження надійності роботи гомогенізатора. Величина кільцевого зазору між конфузуром і дифузуром δ (рис. 7.9 а) струминного гомогенізатора з роздільним подаванням жирової фази є визначальною для надійної роботи та отримання продукту високої якості [313].

При роботі гомогенізатора відбувається облітерація (заростання) внутрішніх поверхонь кільцевої щілини продуктом (рис. 7.9 б), внаслідок чого зменшується величина зазору до величини δ_1 , що призводить до зменшення подачі вершків у потік знежиреного молока. При облітерації поверхні кільцевої щілини рухома частина корпусу під дією осьової складової сили тиску вершків, долаючи силу опору пружного елемента, зсувається на більшу величину, внаслідок чого величина кільцевого зазору практично не змінюється (рис. 7.9 в, г) (при необхідній величині кільцевого зазору – до 1–2 мм).

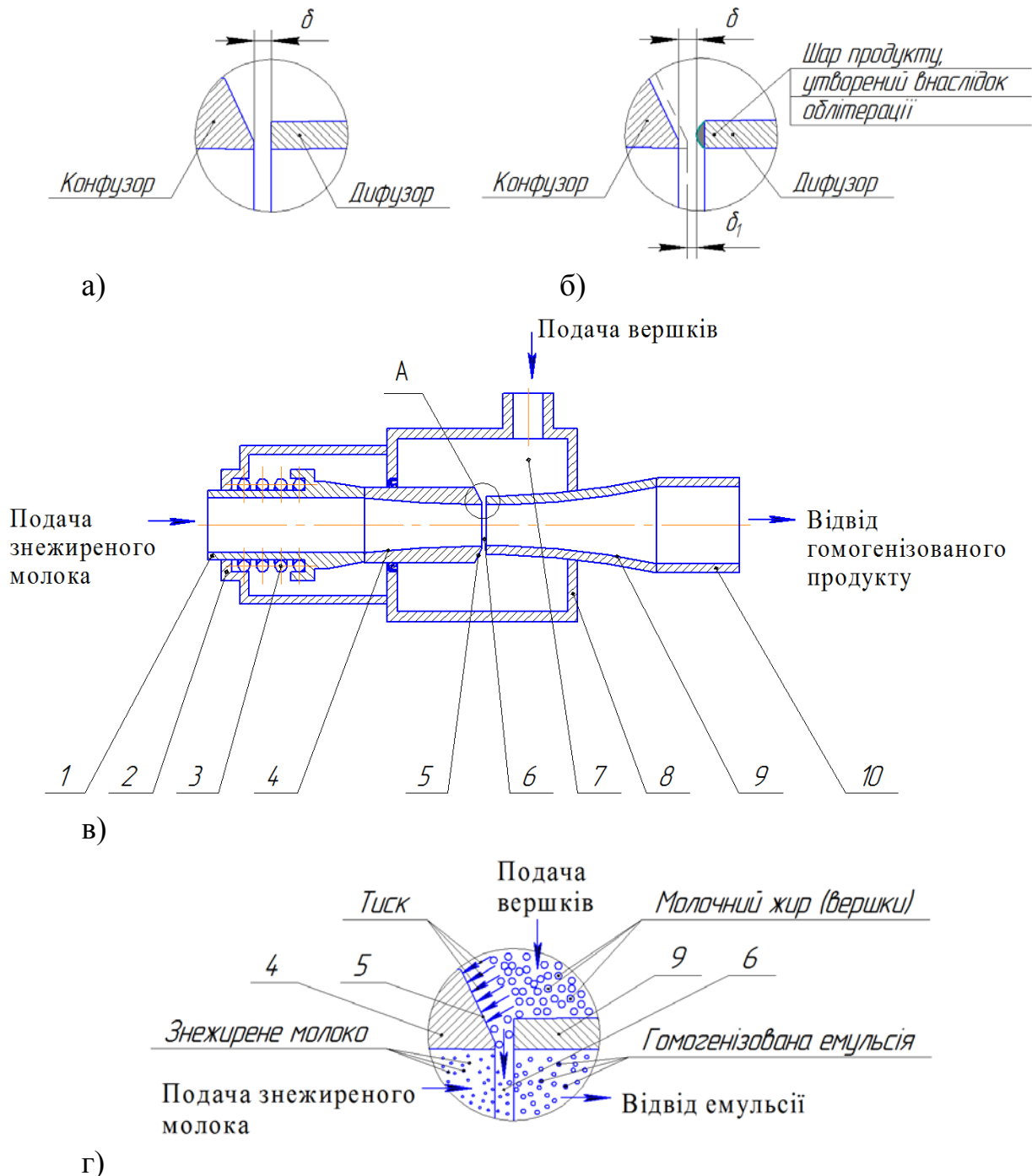


Рис. 7.9. Струминний гомогенізатор за патентом 119871 [313]: а) кільцевий зазор без аблітерації, б) з шаром продукту, який утворюється внаслідок аблітерації, в) загальний вид гомогенізатора, г) місцевий вид у місті розташування кільцевої щілини

1 – патрубок подачі знежиреного молока; 2 – опори; 3 – пружний елемент (пружина стиску); 4 – конфузор; 5 – фаска; 6 – кільцевий щілинний зазор; 7 – камера; 8 – корпус; 9 – дифузор; 10 – патрубок відводу гомогенізованого продукту.

Це призводить до отримання постійної подачі вершків, незалежно від облітерації поверхонь, що забезпечує стабільний вміст вершків з часом експлуатації гомогенізатора, тобто високу якість гомогенізованого продукта, та підвищує його надійність.

7.3. Розробка промислових гомогенізаторів молока

7.3.1. Струминний гомогенізатор з роздільною подачею жирової фази

У відповідності з розробленою методикою розрахунку СГРЖФ і результатами синтезу конструктивних рішень, основаних на теоретичних і експериментальних дослідженнях, розроблена конструкторська документація для виготовлення промислового зразка СГРЖФ з роздільною подачею жирової фази.

Основні вузли машини: насоси подачі знежиреного молока та вершків і робоча камера розташовані на зварній рамі. Для забезпечення стабільних швидкостей потоків знежиреного молока і вершків в якості насосів пропонується використовувати шестеренні (ротаційні) насоси з внутрішнім зчепленням. Такі насоси ефективно працюють як зі знежиреним молоком, так і з вершками високої в'язкості, мають малі габарити та масу, низьку пульсацію та високий ресурс. Насос ШНК15-2 забезпечує подачу в діапазоні 250...2000 л/год, яка змінюється поворотом кришки насоса навколо своєї осі та за механізмом дії являє собою вбудований перепускний клапан. При використанні більш потужного двигуна та невеликій доробці такого насосу, максимальний тиск – 5 МПа. Варіант конструктивного рішення струминного гомогенізатора представлений на рисунку 7.10.

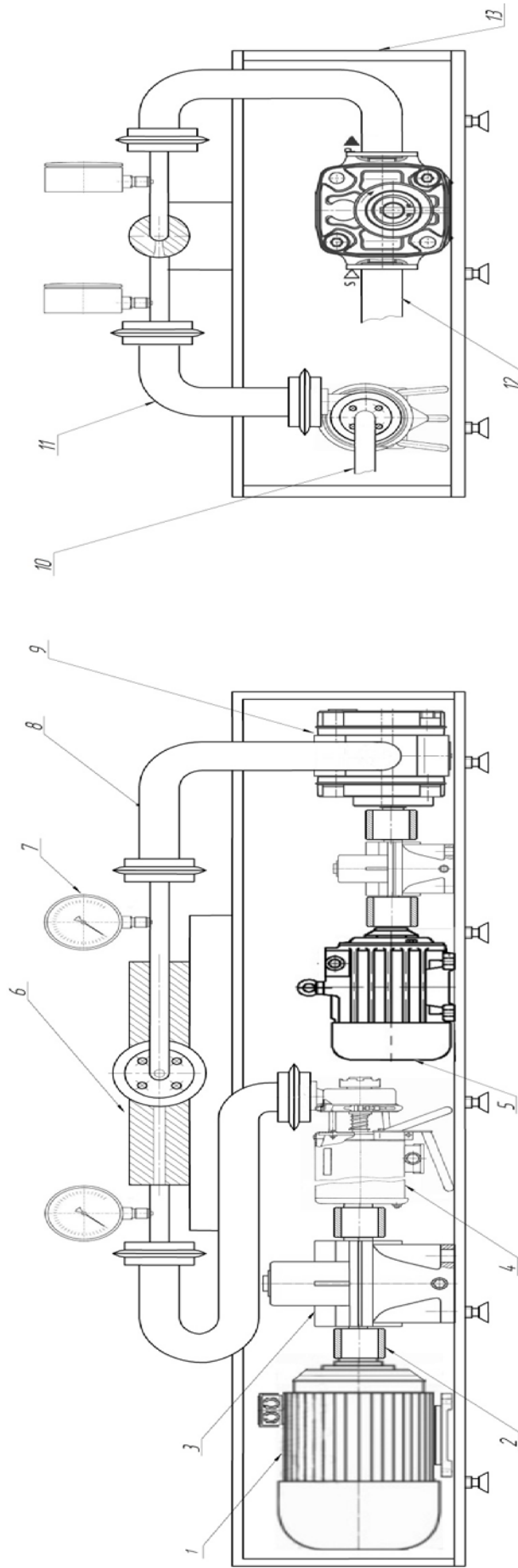


Рис. 7.10 – Промисловий зразок СГРЖФ:

1–електричний двигун приводу насоса подачі знежиреного молока, 2–муфта, 3–циліндричний редуктор, 4–шестеренний насос для подачі знежиреного молока, 5–електричний двигун приводу насоса подачі вершків, 6–камера гомогенізації, 7–манометр, 8–трубопровід подачі вершків, 9–насос для подачі вершків, 10–патрубок прийому знежиреного молока з сепарації або попередньої операції, 11– трубопровід подачі знежиреного молока, 12– патрубок прийому вершків, 13–зварна рама

7.3.2. Пульсаційний апарат з ротором, що вібрує

Користуючись методикою, наведеною у попередньому розділі розроблений ПА з ВР для гомогенізації молока який може бути аналогом клапанного гомогенізатора А1-ОГ2М (продуктивність 5 т/год, встановлена потужність 37 кВт) [210]. В якості прототипу для роторної частини ПА з ВР обрано відцентрову турбіну ТКР-15. Діаметр лопатей становить 100 мм. Ротор виконаний конічної форми з кутом 10^0 для можливості регулювання зазору між ротором та статором.

Варіант конструктивного рішення ПА з ВР представлений на рисунку 7.11.

Машина складається зі зварної рами 1, на якій змонтовані основні вузли: гомогенізуючий вузол – роторно-пульсаційний апарат 12, редуктор приводу вібрації та обертання ротора 5, кривошипний вузол 8, електродвигун 3 і ємність для накопичення гомогенізованого продукту 15. Для забезпечення постійної і незмінної фази між обертанням та коливанням ротора, редуктор з'єднується з валом ротора за допомогою зубчастої клинопасової передачі. Діаметри передавальне число редуктора та діаметри шківів передачі розраховані для забезпечення необхідної частоти обертання ротора. Буферна ємність призначена для пуску апарата та узгодження продуктивності роторного апарата з наступною машиною в технологічній лінії. Новизна конструктивних елементів апарата захищена патентами України [247– 249].

Розрахунок ПА з ВР базується на критеріальних гідродинамічних залежностях, тому результати експлуатаційних випробувань розробленого промислового зразка машини стосовно впливу технологічних та конструктивних параметрів і режимів роботи на якість гомогенізації не відрізняються від отриманих на експериментальному пристрої апарата

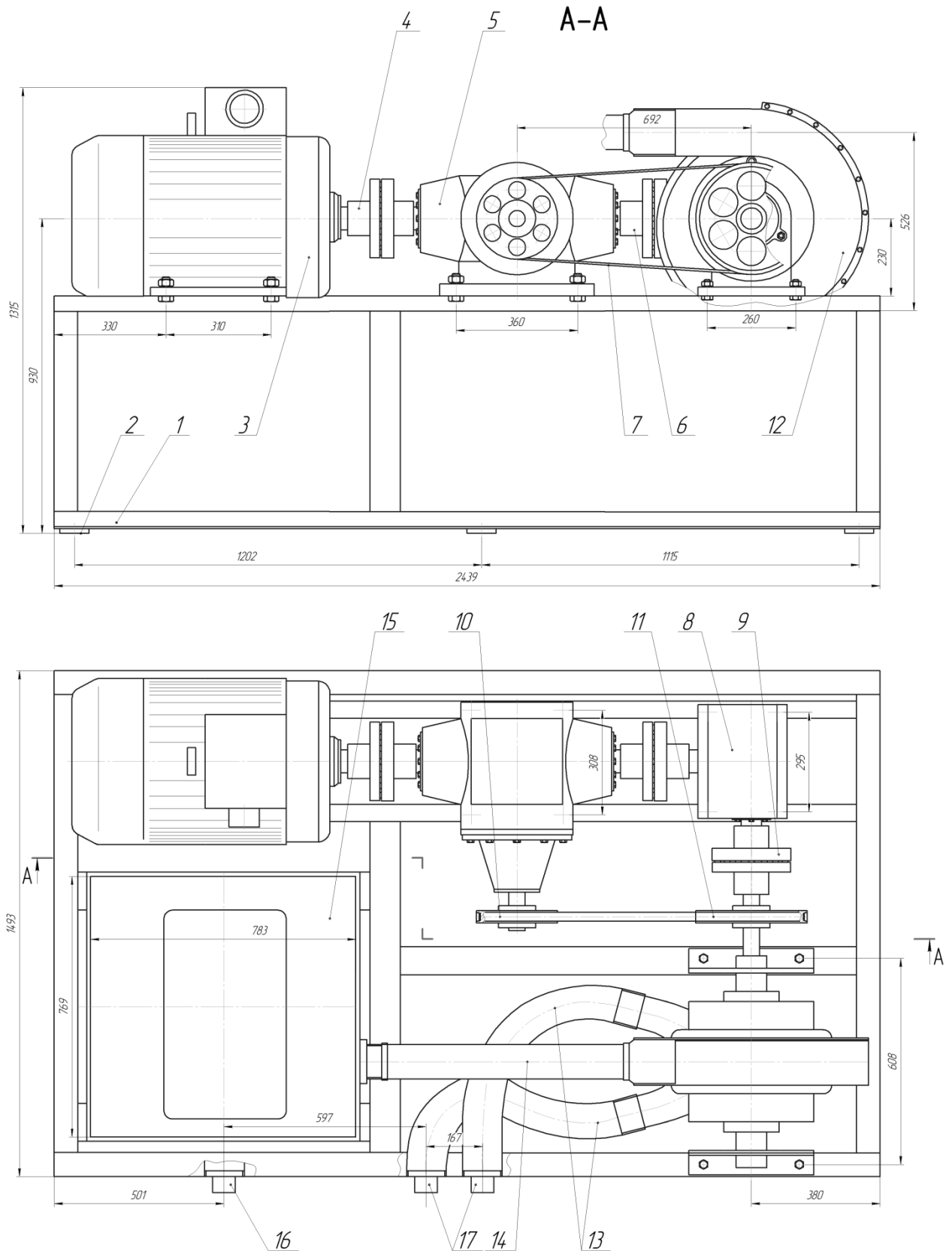


Рис. 7.11. Промисловий зразок пульсаційного апарата з ротором, що вібрає: 1 – рама; 2 – опори; 3 – електродвигун приводу; 4, 6, 9 – муфти; 5 – редуктор; 7 – пас зубчастий; 8 – кривошипний вузол; 10 – шків ведучий; 11 –

шків ведений; 12 – роторно-пульсаційний вузол; 13, 14 з'єднувальні патрубки; 15 – буферна ємність; 16 – патрубок відводу продукта; 17 – патрубок патрубку подачі продукта.

Технічна характеристика гомогенізатора, складена на основі експлуатаційних випробувань, зведена у табл. 7.5.

Таблиця 7.5

Технічна характеристика промислового зразка ПА з ВР

Показник	Значення
Продуктивність, т/год	5
Середній діаметр жирових часток після обробки молока, мкм	0,75-0,80
Потужність електродвигуна приводу обертання ротора, кВт	0,5 кВт
Потужність електродвигуна приводу обертання кривошипу, кВт	7,5 кВт
Кількість отворів ротора	4
Амплітуда коливання ротора, мм	2
Частота обертання ротора, об/хв	2880
Частота обертання кривошипу, об/хв	720
Діаметр ротора, мм	130
Габаритні розміри, мм:	
- довжина	1700
- ширина	1320
- висота	870

Використання ПА з ВР в технологічних лініях виробництва молока та молочної продукції не відрізняється від використання клапанних гомогенізаторів.

Висновок випробувальної лабораторії молочної продукції ПП "Молокозавод-ОЛКОМ" свідчить про відповідність молока, що пройшло гомогенізацію у розробленій машині, вимогам ДСТУ 2661:2010.

7.3.3. Пульсаційний поршньовий гомогенізатор

Користуючись методикою, наведеною у підрозділі 7.1, розроблений ПА для гомогенізації молока який може бути аналогом клапанного гомогенізатора А1-ОГ2М-2,5 (продуктивність 2,5 т/год і встановлена потужність 18,5 кВт) [210].

Варіант конструктивного рішення ПА з ВР представлений на рис. 7.12.

Машина являє собою зварну раму з металевого кутового профілю 1, в верхній частині якого змонтовано гомогенізуючий вузол – пульсаційний апарат 2 з електродвигуном приводу 3 та кривошипним механізмом 4, з'єднаними між собою втулочно-пальцевою муфтою 5. В нижній частині рами розташований шестеренний насос 6 з внутрішнім зачепленням типу НРМ-2, який забезпечує подачу продукту в гомогенізуючий вузол. Шестеренний насос об'ємної дії запобігає зворотному руху продукту під час зворотних рухів поршня. Такий насос є універсальним і здатен перекачувати як рідкі, так і густі продукти, має малі габарити та масу, низьку пульсацію та високий ресурс і забезпечує плавне регулювання подачі продукта.

Подача змінюється поворотом кришки навколо своєї осі та за механізмом дії являє собою вбудований перепускний клапан. Насос має коефіцієнти корисної дії: механічний $\eta_m = 0,70$ і об'ємний $\eta_{об} = 0,99$. При використанні електродвигуна приводу насоса 7 з підвищеною частотою обертання замість комплектного до НРМ-2 та необхідним конструктивним змінам продуктивність такого насосу становить 500–5000 л/год, що забезпечує необхідну продуктивність гомогенізатора. Трубопровід 8 з'єднує насос подачі молока та гомогенізуючий вузол.

Корпус пульсаційного апарата представляє собою циліндр 9, виготовлений зі скла для можливості спостереження за роботою машини та діагностування стану робочих органів. Поршень 10 виготовлений з харчового пластику та має конічні отвори, розташовані назустріч одне одному та з'єднані меншими основами в середині товщини поршня.

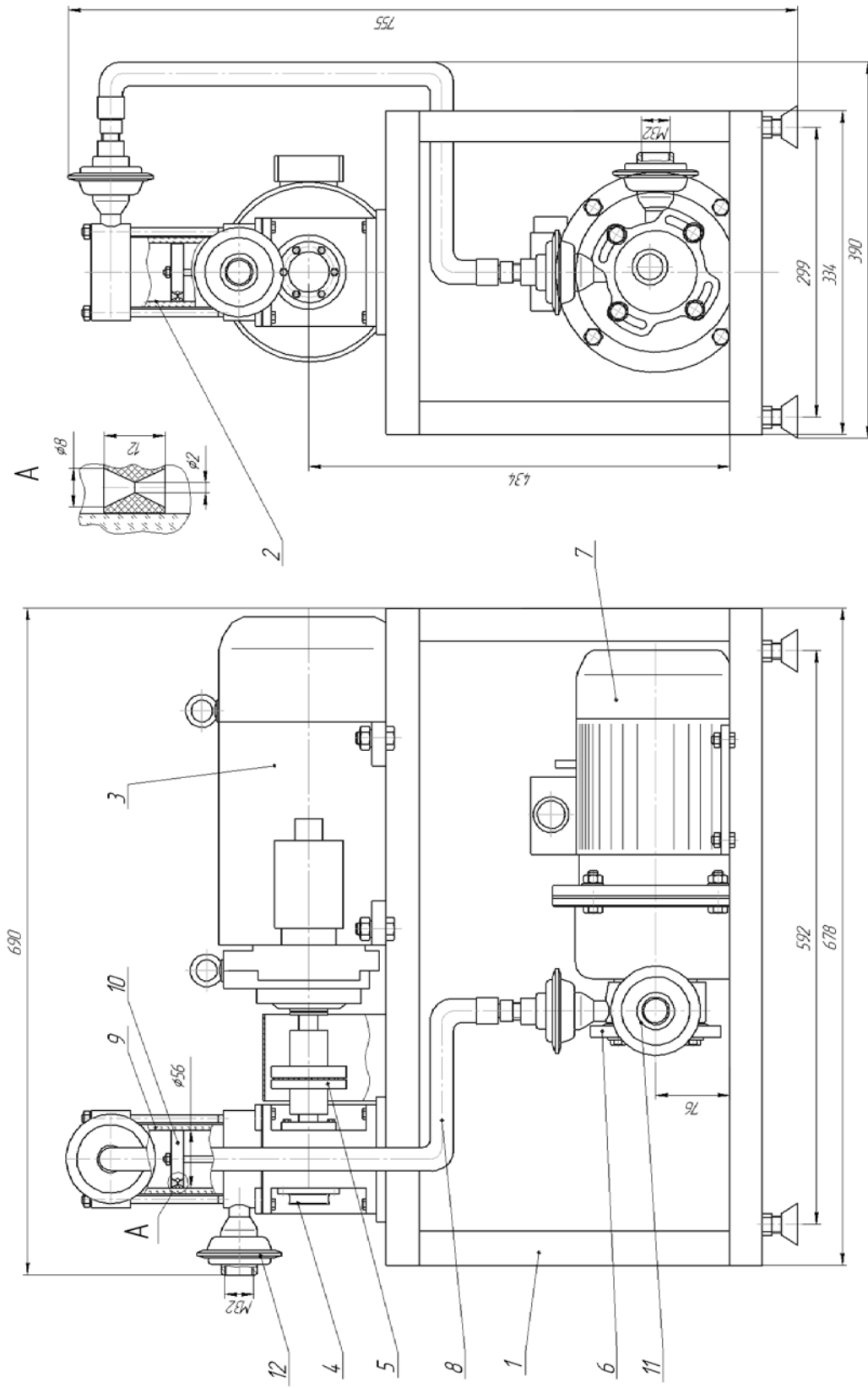


Рис. 7.12 – Промисловий зразок пульсаційного гомогенізатора:

1 – рама зварна; 2 – гомогенізуючий вузол – пульсаційний апарат; 3 – електродвигун приводу пульсаційного апарата; 4 – кривошипний механізм; 5 – муфта; 6 – муфта; 7 – електродвигун приводу насоса; 8 – трубопровід; 9 – циліндр; 10 – поршень; 11 – патрубок подачі продукта; 12 – патрубок відводу гомогенізованого

Конструкція та матеріал поршня, кількість, форма та розташування отворів у ньому забезпечують високий ступінь і рівномірність впливу на продукт, а також низькі енерговитрати завдяки низькій масі.

Кривошипний механізм пульсаційного гомогенізатора дозволяє безступінчасто регулювати амплітуду коливання поршня у межах 0–25 мм, що дозволяє регулювати ступінь дисперсності жирової емульсії та споживання електроенергії. Патрубки 11 і 12 призначені відповідно для подачі молока в насос і відводу гомогенізованої емульсії з машини.

Гомогенізатор працює таким чином. Продукт подається в насос через патрубок 9, звідки через трубопровід 8 перекачується в гомогенізуючий вузол 2, робочим органом якого є поршень 10 з отворами. При синусоїдальних коливаннях поршня з певною частотою і амплітудою, що задається електродвигуном приводу 3 і кривошипним механізмом 4, емульсія проходить крізь отвори поршня, внаслідок чого створюється необхідний відносний рух дисперсної та дисперсійної фаз, що призводить до диспергування жирової фази продукту. Регулюванням подачі продукту в пульсаційний апарат насосом 6 досягається необхідна для якісної обробки кратність проходження емульсії крізь отвори поршня. Гомогенізоване молоко виводиться з машини через патрубок 12.

Новизна конструктивних елементів машини захищена патентом України [132] (додаток Ж).

Розрахунок ППГ базується на критеріальних гідродинамічних залежностях, тому результати експлуатаційних випробувань розробленого промислового зразка машини стосовно впливу технологічних та конструктивних параметрів і режимів роботи на якість гомогенізації не відрізняються від отриманих на експериментальному пристрої.

Технічна характеристика ППГ, складена на основі експлуатаційних випробувань, зведена у табл. 7.6.

**Технічна характеристика промислового зразка пульсаційного
гомогенізатора**

Показник	Значення
Продуктивність, т/год	2,5
Середній діаметр жирових кульок після обробки молока, мкм	0,80
Потужність, що споживається, кВт	3,0 кВт
Частота вібрації поршня, хв ⁻¹	6000
Амплітуда коливання поршня, мм	16,7
Діаметр поршня, мм	56
Габаритні розміри, мм:	
- довжина	690
- ширина	390
- висота	755

В табл. 7.7 представлено порівняльну характеристику розробленого гомогенізатора з клапанним та іншими перспективними видами гомогенізаторів [210, 215, 221, 228, 264, 322].

Таблиця 7.7

Порівняльна характеристика різних типів гомогенізаторів

Тип гомогенізатора	Продуктивність, т/год	Мінімальний діаметр часток після гомогенізації, мкм	Питомі енерговитрати, кВт·год/т
1	2	3	4
Клапанний, К5-ОГА-10	10	0,8	7,4
Клапанний А1-ОГ2М- 2,5	2,5	0,75	7,2
Імпульсний	1000	0,70	4,0
Сопловий, ОГВ	1	1,0	4,4
Ультразвуковий (магніострикційний)	0,3	0,8	13,3

1	2	3	4
Вихровий	5	0,77	3,8
Протитечієно-струминний	2	0,75	2,8
Пульсаційний поршньовий гомогенізатор	2,5	0,8	1,2
Пульсаційний апарат з ротором, що вібрує	5	0,75	1,5
Струминний гомогенізатор з роздільною подачею жирової фази	2,5	0,8	1,1

Порівняльна характеристика найбільш перспективних видів гомогенізаторів показує, що розроблені в дисертаційній роботі апарати забезпечують ступінь диспергування молочного жиру на рівні найкращих видів гомогенізаторів та мають в 4,9–6,7 разів менші питомі енерговитрати.

Використання розроблених гомогенізаторів в технологічних лініях виробництва молока та молочної продукції не відрізняється від використання клапанних гомогенізаторів.

7.4 Економічна ефективність впровадження промислових зразків гомогенізаторів

В лініях переробки молока переважної більшості підприємств України для гомогенізації використовуються клапанні гомогенізатори Одеського механічного заводу типів К5-ОГ2А, А1-ОГ2М, К5-ОГА. Розроблені гомогенізатори здатні замінити існуючі при умові обробки питного молока [267, 300].

Розрахуємо економічну ефективність використання розроблених ПА з ВР, СГРЖФ та ППГ для обробки молока для заміни гомогенізаторів

відповідних продуктивностей, встановлених у приватному підприємстві "Молокозавод-ОЛКОМ" та товариства з обмеженою відповідальністю МЖК "Південний" (м. Мелітополь Запорізької області). Для розрахунку використаємо загальноприйнятту методику [85, 263, 307].

Розрахунок базується на даних підприємств, де здійснено впровадження, що підтверджено відповідними актами (додаток З). Вартість та енергетичні показники розроблених гомогенізаторів базуються на даних товариства з обмеженою відповідальністю "Продмаш" і приватного підприємства ВКФ "Харчоналадка" (м. Мелітополь Запорізької області) та підтвержені актом передачі конструкторсько-технологічної документації (додаток К).

Хід розрахунку наданий у додатку Л, М, Н [85, 307]. Результати розрахунку зведені до табл. 7.8–7.10.

Таблиця 7.8

**Порівняльні техніко-економічні показники СГРЖФ
та клапанного гомогенізатора**

Найменування показника	Значення показників техніко-економічної ефективності	
	Клапанний гомогенізатор К5-ОГ2А-1,25	Розроблений СГРЖФ
Питомі капіталовкладення, грн/т	141,3	21,8
Ступінь зниження питомих витрат електроенергії, %	–	73
Ступінь зниження експлуатаційних витрат	–	55
Приведені витрати, грн/т	73,66	33,49
Економічний ефект на одну тонну молочної продукції, грн/т	-	40,17
Річний економічний ефект, грн	-	290475
Строк окупності, рік	-	0,32

**Порівняльні техніко-економічні показники ППГ
та клапанного гомогенізатора**

Найменування показника	Значення показників техніко-економічної ефективності	
	Клапанний гомогенізатор А1-ОГ2М-2,5	Розроблений ППГ
Питомі капіталовкладення, грн/т	83,68	27,85
Ступінь зниження питомих витрат електроенергії, %	–	83
Ступінь зниження експлуатаційних витрат	–	46
Приведені витрати, грн/т	60,34	32,42
Економічний ефект на одну тонну молочної продукції, грн/т	-	27,92
Річний економічний ефект, грн	-	362945
Строк окупності, рік	-	0,72

Таблиця 7.10

**Порівняльні техніко-економічні показники ПА з ВР
та клапанного гомогенізаторів**

Найменування показника	Значення показників техніко-економічної ефективності	
	Клапанний гомогенізатор К5-ОГА-10	Розроблений ПА з ВР
Питомі капіталовкладення, грн/т	47,9	7,4
Ступінь зниження питомих витрат електроенергії, %	–	74
Приведені витрати, грн/т	46,27	30,20
Економічний ефект на одну тонну молочної продукції, грн/т	-	16,07
Річний економічний ефект, грн	-	265740
Строк окупності, рік	-	0,31

Розроблені гомогенізатори мають менші питомі витрати електроенергії, масо-габаритні показники, більш легкі в обслуговуванні та ремонті. За рахунок таких переваг використання нових апаратів для гомогенізації молока

дозволяють знизити собівартість молочної продукції, та підвищити її конкурентноспроможність.

На підставі економічного аналізу впровадження нових типів гомгенізаторів які здатні бути аналогами найбільш розповсюджених – клапанних (К5-ОГ2А-1,25; А1-ОГ2М-2,5; А1-ОГ2М) на ПП "Молокозавод-ОЛКОМ" та ТОВ МЖК "Південний", була доведена економічна ефективність впровадження, яка є результатом зниження енерговитрат процесу гомогенізації на 40–80% за рахунок використання більш енергоефективного способу гомогенізації. Значне зниження питомих енерговитрат диспергування жирової фази молока, відсутність швидкозношуваних клапанних пар та плунжерного насоса, призвели до зниження експлуатаційних витрат на 35–64%, що у сукупності дозволяє отримати підприємству економічний ефект у 265,74–362,945 тис.грн/рік при терміні окупності нових гомогенізаторів, що не перевищують 4–9 місяців.

Висновки за розділом 7

1. На основі теоретичних та експериментальних досліджень запропонована методика розрахунку конструкційно-технологічних і енергетичних параметрів роботи ПА з ВР, ППГ та СГРЖФ.

2. Представлено синтез конструктивних рішень гідродинамічних диспергаторів, оснований на результатах теоретичних і експериментальних досліджень.

3. Розроблені промислові зразки:

– СГРЖФ продуктивністю 2,5 т/год зі встановленою потужністю електродвигунів 2,0 кВт, що дозволяє отримати молочну емульсію з середнім діаметром жирових кульок 0,8 мкм і має питомі енерговитрати 1,1 кВт·год/т;

– ПА з ВР продуктивністю 5 т/год зі встановленою потужністю електродвигунів 8 кВт, що дозволяє отримати молочну емульсію з середнім діаметром жирових кульок 0,75 мкм, стабільністю 7–8% і має питомі енерговитрати 1,5 кВт·год/т;

– ППГ продуктивністю 2,5 т/год зі встановленою потужністю електродвигуна 3,0 кВт, що дозволяє отримати молочну емульсію з середнім діаметром жирових кульок 0,8 мкм і має питомі енерговитрати 1,2 кВт·год/т.

Технічна документація на розроблені машини передана до товариства з обмеженою відповідальністю "Продмашпроект" і приватного підприємства ВКФ "Харчоналадка" (м. Мелітополь, Запорізької області).

4. Порівняльна характеристика найбільш перспективних видів гомогенізаторів показує, що розроблені конструкції забезпечують ступінь диспергування на рівні клапанних та мають в 4,9–6,7 рази менші питомі енерговитрати ніж промислово освоєні гомогенізатори молока.

5. Спроектовані гомогенізатори були впроваджені на приватному підприємстві "Молокозавод-ОЛКОМ" та ТОВ МЖК "Південний" (м. Мелітополь, Запорізької області) на заміну клапанних гомогенізаторів відповідної продуктивності (К5-ОГ2А-1,25; А1-ОГ2М-2,5; А1-ОГ2М). Об'єм переробленого молока за період випробувань становив 3300–3600 тон. При цьому отриманий економічний ефект 16,07–40,17 грн/т.

6. Економічний ефект від заміни клапанних гомогенізаторів на розроблені становить 265740–362945 грн/рік, що досягається зниженням питомих енерговитрат на 45–76% і експлуатаційних витрат – на 35–64%. При цьому терміни окупності нових гомогенізаторів не перевищують 4–9 місяців.

ВИСНОВКИ

У дисертаційній роботі викладене нове вирішення важливої науково-прикладної проблеми підвищення ефективності виробництва питного молока і молочних продуктів, які виробляються з використанням гомогенізації шляхом розвитку наукових основ гідродинамічного диспергування молочних емульсій.

1. У результаті узагальнення науково-технічної інформації з конструктивних особливостей гомогенізаторів, гіпотез і теорій гомогенізації, механізмів руйнування крапель, переважних гідродинамічних явищ, які призводять до руйнування жирових кульок молока та методик розрахунку гомогенізаторів, виявлена відсутність узагальнюючої теорії і гідродинамічних показників диспергування молочних емульсій, придатних для використання до більшості конструкцій гомогенізаторів. Обґрунтовано, що основні фактори диспергування емульсій можливо об'єднати такими показниками як відносна швидкість дисперсної та дисперсійної фаз і прискорення потоку емульсії, які є більш універсальними і зручними для визначенні ступеня дисперсності в результаті гомогенізації молока.

Шляхом аналізу конструктивних особливостей сучасних гомогенізаторів молока та методів інтенсифікації процесу диспергування молочних емульсій розроблені принципи схеми енергоефективних конструкцій: пульсаційного апарата з ротором, що вібрує, пульсаційного поршньового та струминного гомогенізатора з роздільною подачею жирової фази.

2. Розроблено математичну модель, яка пов'язує прискорення потоку емульсії з відносною швидкістю дисперсної та дисперсійної фаз, критерієм Вебера і середнім розміром жирових кульок емульсії, яка показує, що прискорення потоку емульсії може бути універсальним параметром, що визначає гідродинамічні умови руйнування жирових часток емульсій для більшості типів гомогенізаторів молока (клапанних, струминних, імпульсних, пульсаційних, роторних, відцентрових і міксерів), для яких безпосереднє

визначення відносної швидкості дисперсної та дисперсійної фаз, та, як наслідок, критерія Вебера, викликає труднощі.

3. Введений узагальнюючий показник – «коефіцієнт гомогенізації», що пов'язує прискорення руху емульсії з середнім діаметром жирової кульки молока, який дозволяє кількісно характеризувати додаткові гідродинамічні умови процесу диспергування жирової фази молочної емульсії. Аналітично отримане значення цього показника для умов однократної обробки при відсутності додаткових гідродинамічних факторів диспергування становить $2,4 \cdot 10^{-3} \text{ м}^{3/2}/\text{с}$. Експериментально визначене значення коефіцієнта гомогенізації становить $3,3 \cdot 10^{-3} \text{ м}^{3/2}/\text{с}$ для струминного гомогенізатора з роздільною подачею жирової фази, $0,225 \cdot 10^{-3} \text{ м}^{3/2}/\text{с}$ – для поршньового пульсаційного гомогенізатора і $0,068 \cdot 10^{-3} \text{ м}^{3/2}/\text{с}$ – для пульсаційного апарата з ротором, що вібрує, при значенні цього показника для клапанної гомогенізації $1,6 \cdot 10^{-3} \text{ м}^{3/2}/\text{с}$.

4. Розроблена математична модель гідродинамічного диспергування молочної емульсії в струминному гомогенізаторі молока з роздільною подачею жирової фази з одночасною нормалізацією молока за жирністю, яка основана на визначенні відносної швидкості дисперсної та дисперсійної фаз і пов'язує конструктивно-технологічні, гідравлічні й енергетичні показники гомогенізатора з дисперсністю жирової емульсії. На підставі розробленої моделі та проведених експериментальних досліджень визначене критичне значення критерія Вебера для руйнування жирової кульки молока в потоці молочної плазми, яке становить 28.

Аналіз математичної моделі дозволив встановити, що для підвищення енергоефективності процесу диспергування в струминному гомогенізаторі з роздільною подачею жирової фази при отриманні емульсії з середнім розміром жирових кульок 0,8 мкм необхідно використовувати вершки жирністю 40–45%, забезпечити швидкість струменя вершків 20–40 м/с і діаметр каналу подачі вершків 0,9–1,0 мм. При подачі вершків у зону максимальної швидкості знежиреного молока дисперсність молочного жиру підвищується на 10–12%. При цьому питомі енерговитрати процесу гомогенізації не перевищують 0,9 кВт·год/т.

5. Отримано безперервну математичну функцію для опису процесу зміни площі прохідного перерізу модулятора роторно–пульсаційного апарата для умов застосування отворів круглої форми та рівності кількості отворів ротора і статора. На основі отриманої функції розроблена математична модель гідродинамічного диспергування молочного жиру в пульсаційному апараті з ротором, що вібрує, аналіз якої дав змогу встановити умови виникнення бажаних резонансних явищ, за рахунок яких потужність, що споживається, знижується на 18–22%, а дисперсність молочної емульсії підвищується на 15–25%.

На підставі розробленої математичної моделі гідродинамічного диспергування жирової фази молочної емульсії в пульсаційному апараті з ротором, що вібрує, встановлено, що для забезпечення мінімальної енергоємності (1,4–1,6 кВт·год/т) раціонально застосовувати однократну обробку з вібраційним впливом, при частоті осьових вібрацій ротора 2880 об/хв і амплітуді 1,8–2,2 мм і використовувати ротор з 4 отворами.

6. Розроблено математичну модель гідродинамічного диспергування молочного жиру в пульсаційному поршньовому апараті, яка пов'язує його конструктивні, технологічні та кінематичні параметри з прискоренням руху молочної емульсії та енергетичними й дисперсними показниками гомогенізації молока.

Аналіз розробленої моделі дав змогу встановити, що за умови зниження питомих енерговитрат для досягнення необхідних дисперсних показників молочної емульсії раціонально підвищувати частоту та знижувати амплітуду коливань поршня пульсаційного гомогенізатора, використовувати поршень з отворами у вигляді двох конусів з кутом $45\text{--}55^\circ$, обернених меншими основами назустріч одне одному при забезпеченні максимального коефіцієнта живого перетину отворів при амплітуді 9–11 мм та частоті коливань поршня 9000–10000 хв⁻¹. Визначено значення кратності проходження емульсії крізь отвори поршня пульсаційного гомогенізатора за умови досягнення достатньої рівномірності дисперсного складу емульсії та мінімізації енерговитрат, що становить 12.

7. Розроблені методики розрахунків і промислові зразки пульсаційного апарата з ротором, що вібрує, пульсаційного поршньового та струминного гомогенізатора з роздільною подачею жирової фази, які дозволяють отримати молочну емульсію з середнім розміром жирових кульок 0,8 мкм і при цьому мають в 4,9–6,7 разів менші, порівняно з клапанним, питомі енерговитрати. Розроблено технічну документацію на виготовлення енергоефективних гомогенізаторів, яку передано до впровадження у виробництво в ТОВ «Продмашпроект» і ПП ВКФ «Харчоналадка» (м. Мелітополь, Запорізької області).

8. Здійснене впровадження спроектованих гомогенізаторів на ПП «Молокозавод-ОЛКОМ» і ТОВ МЖК «Південний» (м. Мелітополь, Запорізької області) підтверджує їх перспективність. Розрахунковий економічний ефект від впровадження становить 265,74–362,95 тис. грн/рік.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Aboukhr M.R. Dissertation Dr. rer. nat. / Martin-Luther-Universitaet. Halle-Wittenberg, 1996.
2. Ah Pis YONG, Md Aminul ISLAM, , Nurul HASAN. A review: effect of pressure on homogenization / Sigma J Eng & Nat Sci 35 (1), 2017, 1–22.
3. Ah Pis Yong, Md. Aminul Islam and Nurul Hasan. The Effect of pH and High-Pressure Homogenization on Droplet Size // International Journal of Engineering Materials and Manufacture, 2017, Vol. 2(4), P. 110–122.
4. Ahmad T. Homogenization-Centrifugation. In: Dairy Plant Engineering and Management. 10th chapter. 8th Edn. Kitab Mahal, Allahabad, India, 2012. P. 237–247.
5. Ashokkumar M., Rink R., Shestakov S. Hydrodynamic cavitation – an alternative to ultrasonic food processing // Technical Acoustics . 2011. Vol.9. P. 156–166.
6. Auriault J.-L., Boutin C., Geindreau C. Homogenization of Coupled Phenomena in Heterogenous Media. ISTE Ltd. 2009. 476 p.
7. Avramenko A.A., Kobzar S.G., Shevchuk I.V., Kuznetsov A.V., Basok B.I. Laminar forced convection in curved channel with vortex structures // Int. J. Thermal and Fluid Sciences. 2004. 13, N 2. P.143–149.
8. Avramenko A.A., Kuznetsov A.V., Basok B.I., Blinov D.G. Investigation of stability of a laminar flow in a parallel-plate channel filled with a fluid saturated porous medium // Phys. Fluids. 2005. 17. P. 094102-1 – 094102-6.
9. Betoret E., Betoret N., Carbonell J.W., Fito P. Effects of pressure homogenization on particle size and the functional properties of citrus juices // Journal of Food Engineering. 2009. No. 92. P. 18–23.
10. Brivibaa K., Gräfc V., Walzc E., Guamisd B., P. Butz P. Ultra high pressure homogenization of almond milk: Physico-chemical and physiological effects [Text] // Food Chemistry. 2016. Vol. 192, P. 82–89.

11. Brunner J. E., Duncan C. W., Trout G. M., Mackenzie M. The fat-globule membrane of nonhomogenized and homogenized milk // *Journal of Food Science*. 2006. 18(1–6). P. 469–474

12. Bylund G. Homogenizers. In: *Dairy Processing Handbook*. Chapter .3. Teknotext AB (Ed.) Tetra Pak Processing Systems ABS-221 86, Lund, Sweden, 2003. P. 115–122.

13. Calvo S., Delafosse A., Collignon M. et al. Experimental characterisation and modelling of homogeneous solid suspension in an industrial stirred tank // *Advances in Mechanical Engineering*. 2013. 9p. URL: www.ade.sagepub.com/content/5/329264.full.pdf.

14. Charpentier, J.–C. The triplet «molecular processes - product - process» engineering: the futur of chemical engineering // *Chem. Eng. Sci.* 2002. Vol.57. P. 4667–4690.

15. *Cheese Problems Solved* / P.L.H. McSweeney. Woodhead Publishing Limited: Cambridge England, 2008. 402 p.

16. Chervyakov V.M., Koptev A.A. Determination of Power Consumption in Rotary Equipment // *Chemical and Petroleum Engineering*. 2005. Vol .41, № 3–4. P.180–184.

17. Chervyakov V.M., Koptev A.A. Flow of a Newtonian fluid in the gap between conical permeable surfaces // *Journal of engineering Physics and Thermophysics*. 2006. Vol.79, №2. P.301–308.

18. Cirona C.I.E., Geeb V.L., Kelly A.L., Auty M.A.E. Comparison of the effects of high-pressure microfluidization and conventional homogenization of milk on particle size, water retention and texture of non-fat and low-fat yoghurts // *International Dairy Journal*. 2010. Vol. 20. Issue 5. P. 314–320.

19. Cortes-Quiroz C.A., Azarbadegan A., Zangeneh M. Effect of channel aspect ratio of 3-D T-mixer on flow patterns and convective mixing for a wide range of Reynolds number [Text] // *Sensors and Actuators B: Chemical*. 2017. Vol. 239. P. 1153–1176.

20. Davies J.T. A physical interpretation of droop sizes in homogenizers and agitated tanks, including the dispersion of viscous oils // *Chem. Engng. Sci.* 1987.42. №47. P.1671–1676.
21. De S Special Milks. In: *Outlines of Technology*. 1st Ed. Oxford University Press: New Delhi, 2001. P. 93–97.
22. Delmas H., Barthe L. 25 – Ultrasonic mixing, homogenization, and emulsification in food processing and other applications [Text] // *Power Ultrasonics Applications of High-Intensity Ultrasound*. 2015, P. 757–791.
23. Dong J.K. Effects of Baffle Configuration on Mixing in a T-Shaped Micro-Channel // *Micromachines*, 2015, 6(6), 765–777.
24. Drankhar P. Homogenization fundamentals // *IOSR Journal of Engineering*. 2014. Vol. 4, Iss. 5. 8p. URL: [www.iosrjen.org/Papers/vol4_issue5%20\(part-4\)/A0454_0108.pdf](http://www.iosrjen.org/Papers/vol4_issue5%20(part-4)/A0454_0108.pdf).
25. Flourey J., Desrumaux A. and Lardières J. Effect of high-pressure homogenization on droplet size distributions and rheological properties of model oil-in-water emulsions // *Innovative Food Science & Emerging Technologies*, Vol. 1, 6/1/ 2000. P. 127–134.
26. Flourey J., Desrumaux A., Axelos M.A.V. and Legrand J. Degradation of methylcellulose during ultra-high pressure homogenisation // *Food Hydrocolloids*, Vol. 16, P. 47–53, 1// 2002.
27. Fox P.F. Milk proteins: general and historical aspects / In P. F. Fox, & P. L. McSweeney (Eds.), *Advanced Dairy Chemistry // Proteins* (3 ed., 2003. Vol. 1A, P. 1-41). New York, USA: Kluwer Academic/ Plenum Publishers.
28. Giulia Finotello, Roeland F. Kooiman, Johan T. Padding, Kay A. Buist, Alfred Jongsma, Fredrik Innings, J.A.M. Kuipers. The dynamics of milk droplet–droplet collisions // *Experiments in Fluids*, 2018.
29. Håkansson A. Fuchs L. Innings F. Revstedt J. Trägårdh C. & Bergenståhl B. 2011. Turbulent Velocity Fields Measurements of Two Phase Flow in a High Pressure Homogenizer Scale Model // Submitted to journal. 2016. P.320-342.

30. Håkansson A., Fuchs L., Innings F., Revstedt J., Trägårdh C. and Bergenståhl B. High resolution experimental measurement of turbulent flow field in a high pressure homogenizer model and its implications on turbulent drop fragmentation // *Chemical Engineering Science*, Vol. 66, 4/15/ 2011. P. 1790–1801.

31. Håkanssona A., Fuchs L., Innings F., Revstedt J., Bjorn Bergenstahl, Christian Tragardh. 2010. / Visual observations and acoustic measurements of cavitation in an experimental model of a high-pressure homogenizer // *Journal of Food Engineering* 100 (3). P. 504–513.

32. Håkanssona A., Fuchs L., Innings F., Revstedt J., C. Trägårdha C., Bergenståhla B. On flow-fields in a high pressure homogenizer and its implication on drop fragmentation [Text] // *Procedia Food Science*. 2011. № 1. P. 1353–1358.

33. *Homogenizer Handbook Processing of Emulsions and Dispersions*. APV, An SPX Brand. 2009. P.23.

34. Huppertz T. Homogenization of Milk | Other Types of Homogenizer (High-Speed Mixing, Ultrasonics, Microfluidizers, Membrane Emulsification) [Text] // *Encyclopedia of Dairy Sciences (Second Edition)*. 2011. P. 761–764.

35. Innings F. & Trägårdh C. Analysis of the flow field in a high-pressure homogenizer // *Experimental Thermal and Fluid Science*, 2007. Vol. 32(2), P. 345–354.

36. Innings F. Fuchs L. & Trägårdh C. Theoretical and Experimental Analyses of Drop Deformation and Break-up in a Scale Model of a High-Pressure Homogenizer // *Journal of Food Engineering*, 2011, Vol. 103(1), P. 21–28.

37. Innings F., Trägårdh C. Visualization of the Drop Deformation and Break-Up Process in a High Pressure Homogenizer // *Chemical Engineering & Technology*. 2005. Vol. 28. Issue 8. August. 2005. P. 882–891.

38. Jablonska Ja., Bojko M. Multiphase flow and cavitation – comparison of flow in rectangular and circular nozzle // *EPJ Web of Conferences*. 2015. Vol. 92. 8 p. URL: www.epj-conferences.org/articles/epjconf/pdf/2015/11/epjconf_efm2014.

39. Jahnke Stefan. Homogenisieren faserhaltiger Produkte // *Labor Praxis*. 2001. №7. P. 24–28.

40. Jiao Liu, Yadong Chu, Xupeng Cao, Yuchao Zhao, Hua Xie and Song Xue. Rapid transesterification of micro-amount of lipids from microalgae via a micro-mixer reactor // *Biotechnology for Biofuels*, 2015. Vol.8. P. 229.
41. John Thomas Tobin Sinead P. Heffernan Daniel M. Mulvihill Thom Huppertz Alan L Kelly. *Applications of High-Pressure Homogenization and Microfluidization for Milk and Dairy Products* // *Emerging Dairy Processing Technologies*. 2005.
42. Kessler H.G. *Food and Bio Process Engineering – Dairy Technology* [Text]. Ed. 5. Germany, Munchen: Verlag A. Kessler (Publishing House A. Kessler), 2002. 694 p.
43. Kovalyov A., Samoichuk K., Palyanichka N., Verkholantseva V., Yanakov V. Experimental investigations of the parameters of the jet milk homogenizer with separate cream supply // *Technology audit and production reserves*. 2017. №2/3 (34). P. 33–38.
44. Kwiatkowski M., Wurlitzer M., Krutilin A. et al. Homogenization of tissues via picosecond-infrared laser (PIRL) ablation: Giving a closer view on the in-vivo composition of protein species as compared to mechanical homogenization // *Journal of Proteomics*. 2016. Vol. 134. P. 193–202.
45. Litwinienko A., Nekoż K., Lukasik A. Technologiczne zastosowanie kawitacji i hydrodynamicznej – doświadczenia i perspektywy // *Lubelskie Towarzystwo Naukowe Societas scietarum lublinensis*. Lublin, 2005. P.154.
46. Liu C., Li M., Liang C., Wang W. Measurement and analysis of bimodal drop size distribution in a rotor-stator homogenizer // *Chemical Engineering Science*. 2013. Vol. 102. P. 622–631.
47. Lockwood F.C., Salooja A.P., Syed S.A. *Thermal-Fluid Dynamics Theory of Two-Phase Flow*. Paris: Eyrolles, 1980. 186 p.
48. Loncin M., Merson R. *Food Engineering. Principles and Selected Applications* [Text]. New York: Academic Press, 1979. 279 p.
49. Lopez C., Madec M.-N., & Jimenez-Flores R. Lipid rafts in the bovine milk fat globule membrane revealed by the lateral segregation of phospholipids and

heterogenous distributions of glycoproteins. *Food Chemistry*, 2010. Vol. 120. P. 22–33.

50. Majzoobi M., Shahbazi M., Farahnaky A. et al. Effects of high pressure homogenization on the physicochemical properties of corn // *Inside Food Symposium*, 9-12 April 2013, Leuven, Belgium. Leuven, 2013. 4 p. URL: www.insidefood.eu/INSID EFOOD_WEB/UK/WORD/proceedings/103P.pdf.

51. Marie P., Perrier-Cornet J.M. and Gervais P. Influence of major parameters in emulsification mechanisms using a high-pressure jet // *Journal of Food Engineering*, Vol. 53, 6. 2002. P. 43–51.

52. Matilde Dura'n-Lobato, Alicia Enguix-Gonza'lez, Mercedes Ferna'ndez-Are'valo, Luci'a Marti'n-Banderas. Statistical analysis of solid lipid nanoparticles produced by high-pressure homogenization: a practical prediction approach // *Journal of Nanoparticle Research*. 2013. 15:1443.

53. McKillop A.A., Dunkley W.L., Brockmeyer R.L., Perry R.L. The Cavitation Theory of Homogenization // *Journal of Dairy Science*, Vol. 38(3), 1955. P. 273–283.

54. Michalski M.–C., Januel C. Does homogenization affect the human health properties of cow's milk [Text] // *Trends in Food Science & Technology*. 2006. Vol. 17, Issue 8. P. 423–437.

55. Moaveni S. *Finite Element Analysis Theory and Application with ANSYS* / S. Moaveni. Pearson, 2008. 868 p.

56. Mikulcová V., Hauerlandová I., Buňková L. Vegetable oil based emulsions in milk // *Potravinarstvo@Scientific Journal for Food Industry*. Vol. 8, 2014. P. 196–200.

57. Narsimhan S.M.a.G. Coalescence of Protein-Stabilized Emulsions in a High-Pressure Homogenizer // *Journal of Colloid and Interface Science*, Vol. 192, P. 1–15, 1997.

58. Ndjiya N., Haman D., Nso E., Kayem J. A mechanical blender for homogenization of the pulps of guava // *Greener Journal of Agricultural Sciences*. 2012. Vol. 2 (4). P. 152–161.

59. Nield D.A., Kuznetsov A.V., Avramenko A.A. The onset of bioconvection in a horizontal porous-medium layer // *Transport in Porous Media*. 2004. 54. P. 335–344.

60. Promptov M.A., Monastirsky M.X. Dynamic of cavitation bubbles in rotor impuls apparatus // *J. of Qingdao Just, of Chem. Techn.* 2000. Vol.21, №4. P.318–321.

61. Promptov M.A., Monastirsky M.X. Model of cavitations cluster in rotor impuls apparatus // *Baltic Acoustic 2000: conf proc. of 1 Intern. Anniversary Conf.* Vilnius, 2000. P. 243–245.

62. Rayner Marilyn, Dejmek Petr. *Engineering Aspects of Emulsification and Homogenization in the Food Industry: CRCpress Taylor Ftancis group London* 2015. 322 p.

63. Samoichuk K., Kiurchev S., Oleksienko V., Palyanichka N., Verholantseva V. Investigation of homogenization of milk in a pulsation machine with a vibrating rotor // *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*. 2016. №6/11 (84). P. 16–21.

64. Samoichuk K., Kiurchev S., Oleksienko V., Palyanichka N., Verholantseva V. Research into usage efficiency of the pulsation machine with a vibrating rotor for milk homogenization // *EUREKA: Life Sciences*. 2016. Vol. 6, P. 3–10.

65. Sou A., Hosokawa S., Tomiyama A. Effects of cavitation in a nozzle on liquid jet atomization // *International Journal of Heat and Mass Transfer*. 2007. Vol. 50, Iss. 17–18. P. 3575–3582.

66. Spence K., Venditti R., & Rojas O. Aspects of raw materials and processing conditions on the production and utilization of microfibrillated cellulous. *International Conference on Nanotechnology for the Forest Products Industry* (2010. P. 1–49) // North Carolina State University. URL:www.tappi.org/content/events/10nano/papers/24.1.pdf

67. Stankiewicz A., Moulijn I.A. Process intensification: transforming chemical engineering // *Chem. Eng. Progress*. 2000. №1. P. 22–24.

68. Stankiewicz A., Moulijn I.A. Process intensification // *Ind. Eng. Chem. Res.* 2002. -Vol.41. P. 1920–1924.
69. Stankiewicz A., Moulijn I.A. Process intensification: transforming chemical engineering // *Chem. Eng. Progress.* 2000. №1. P. 22–24.
70. Stone H.A Dynamics of drop deformation and breakup in viscous fluids // *Annual Review of Fluid Mechanics.* 1994. V.26. P. 65–102.
71. Taghinaa J., Rahmanb M., Tsea T.K.T, Siikonen T. CFD modeling of homogenizer valve: A comparative study // *Chemical Engineering Research and Design.* 2016. Vol. 106. P. 327–336.
72. Walstra P., Wouers J.T.M. and Geurts T.J. Homogenization. In: *Dairy Science and Technology.* Second Edn. Taylor & Francis Group, LLC. Boca Raton, London, New York, 2006. P. 279.
73. Wilbey R.A. Homogenization of milk // *Encyclopedia of Dairy Sciences.* 2002. P. 1346–1349.
74. Wilbey R.A. Homogenization of Milk: Principles and Mechanism of Homogenization, Effects and Assessment of Efficiency: Valve Homogenizers // *Encyclopedia of Dairy Sciences (Second Edition).* 2011. P. 750–754.
75. Wittig A.B. The Homogenizing Process, Its Rise, Progress and Effects// In: *XIIIth Intern. Dairy Congr.* 1953; Vol 2. P. 386–392.
76. Wittig A.B. The quality of homogenized drinking milk in relation to the sequence of modern treating processes // *XVI Int. Dairy Congr.* 1962. Vol. A. P. 906–916.
77. Xu J., Wang W., Wang A. Effects of solvent treatment and high-pressure homogenization process on dispersion properties of palygorskite // *Powder Technology.* 2013. No. 235. P. 652–660.
78. Абиев Р. Резонансная аппаратура для процессов в жидкофазных системах: автореф. ... дис. д-ра техн. наук: 05.17.08. Спб., 2000. 32 с.
79. Абиев Р.Ш. Режимы работы и конструктивное оформление резонансной пульсационной аппаратуры: дис. ... канд. техн. наук: ЛТИ им. Ленсовета. Л., 1990. 162 с.

80. Абиев Р.Ш., Островский Г.М. Резонансная пульсационная аппаратура-перспективное оборудование для тепло- и массообменных процессов химической технологии // Современные проблемы химической технологии: сб. науч. праць. Фергана: ФерПИ, 1998. С. 45–46.

81. Акустический излучатель: пат. 2149713 Россия / МКИ В 01 В 1/18. / Промтов М.А. опубл. 27.05.2000. Бюл. №15.

82. Алексеев Н.Ю., Аристова В.П., Патратий А.П. и др. Состав и свойства молока как сырья для молочной промышленности: справ. под ред. Я.И. Костина. М.: Агпромиздат, 1986. 239 с.

83. Альтшуль А.Д. Гидравлические сопротивления. М.: Недра, 1982. 224с.

84. Анісімов В.В. Гідродинамічні кавітатори для інтенсифікації процесів гомогенізації в рідинних середовищах: автореф. ... дис. канд. техн. наук: 05.17.08. Дніпропетровськ, 2014. 20 с.

85. Афанасьев М.В. Оценка эффективности организационно–технических мероприятий / М.В. Афанасьев. К.: "ИНЖЕК", 2003 г. 288с.

86. Балабудкин М.А. Роторно-пульсационные аппараты в химико-фармацевтической промышленности. М.: Медицина, 1983. 160 с.

87. Балабышко А.М., Юдаев В.Ф. Роторные аппараты с модуляцией потока и их применение в промышленности. М.: Недра, 1992. 176 с.

88. Балабышко А.М., Зимин А.И., Ружицкий В.П. Гидромеханическое диспергирование. М: Наука, 1998. 331 с.

89. Балакирева, Ю.В., Анисимова Н.И., Мухитов А.Р., Ахматдулина Ф.Ю., Каримова Ф.Г. Влияние термодеструкции жировых шариков молочного сырья казеинового типа на его интегральную антиоксидантную активность // Вестник Казанского технологического университета. 2010. №8. С. 121–124.

90. Барабаш В.М., Белевицкая М.А Массообмен от пузырей и капель в аппаратах с мешалками // Теор. основы хим. технологии. 1995. Т. 29, № 4. С. 362–372.

91. Барабашук В.И., Креденцер Б.П., Мирошниченко В.И. Планирование эксперимента в технике. К.: Техника, 1984. 200 с.

92. Барановский Н.В. Влияние гидравлических факторов на степень дисперсности жира при гомогенизации молока: дис. ... канд. техн. наук: М., 1955. 183 с.

93. Баронов В.И. Разработка и исследование вихревых устройств для гомогенизации и эмульгирования пищевых продуктов: автореф. ... дис канд. техн. наук: 05.18.12. Вологда, 2009. 20 с.

94. Баронов В.И., Фиалкова Е.А., Куленко В.Г. Вихревой смеситель для жидких поликомпонентных систем // Scientific and information support of innovative development of agrarian and industrial complex: материалы VIII междунар. науч.-практ. конференции "ИнформАгро-2016". 2016. С. 386–389.

95. Баронов В.И., Фиалкова Е.А., Куленко В.Г. Исследование влияния постоянного магнитного поля на качество вихревой гомогенизации. // Молочнохозяйственный вестник. №1 (17), I кв. 2015. С. 69–72.

96. Басок Б.И., Грабова Т.Л. Оценка эффектов диспергирования включений в РПА дисково-цилиндрического типа // Промышленная теплотехника. 2006. 28. № 6. С. 37–43.

97. Биглер В.И. Исследование течений в аппарате типа динамической сирены и его применение для процесса растворения: автореф. ... дис. канд. техн. наук. М. 1979. 15с.

98. Битюков В.К., Хвостов А.А., Ребриков Д.И., Мерзликин В.Е. Автоматизация обработки микрофотографий молочных продуктов с использованием ImageJ и Statistica / Вестник ВГУИТ, №4, 2014. С. 58–63.

99. Бобицький Я., Клімкевич Р. Порівняльний аналіз оптичних методів вимірювання розмірів мікрочастинок // Вимірювальна техніка та метрологія. 2007. № 67. с. 48–55.

100. Бобрышев А.А. Изменение частотно-массовых характеристик жировых шариков молока в процессе отстаивания // Процессы и аппараты пищевых производств, №1(7), 2009. URL: www.openbooks.ifmo.ru/ru/article/7266/izmenenie_chastotno-massovyh_harakteristik_zhirovyyh_sharikov_moloka_v_processe_otstaivaniya.html.

101. Богданов В.В., Христофоров Б.А., Клоцунг Б.А. Эффективные малообъемные смесители. Л.: Химия, 1989. 224 с.
102. Бондарь А.Г. и др. Планирование эксперимента. К: Вища школа, 1980. 264 с.
103. Борисенко Е.В. Физико-химические основы производства эмульсий // Пищевые ингредиенты: сырье и добавки. Саратов. 2002 №2. С. 26–32.
104. Брагинский Л.Н., Белевицкая М.А. О дроблении капель при механическом перемешивании в отсутствие коалесценции // Теор. основы хим. технологии. 1990. Т.24, № 4. С. 509–16.
105. Бурыкин А.И. Некоторые расчеты к физической модели процесса гомогенизации // Молочная промышленность. 2012. № 3. С. 18–19.
106. Вайткус В.В. Гомогенизация молока: М.: Пищ. пром-сть, 1967. 218 с.
107. Вибрации в технике: Справочник. В 6-ти т. / Ред. совет: В.Н. Челомей (пред.) М.: Машиностроение, 1978. Т.1. Колебания линейных систем / Под ред. В.В. Болотина. 1978. 352 с.
108. Вибрации в технике: Справочник. В 6-ти т. / Ред. совет: В.Н. Челомей (пред.) М.: Машиностроение, 1979. Т.2. Колебания нелинейных механических систем / Под ред. И.И. Блехмана. 1979. 351 с.
109. Вибрации в технике: Справочник. В 6-ти т. / Ред. совет: В.Н. Челомей (пред.) М.: Машиностроение, 1981. Т.4. Вибрационные процессы и машины / Под ред. Э.Э. Лавеццела. 1981. 509 с.
110. Вітенько Т.М. Гідродинамічна кавітація у масообмінних, хімічних і біологічних процесах: монографія. Тернопіль: видавництво ТДТУ ім. Івана Пулюя, 2009. 224 с.
111. Вітенько Т.М., Гащин О.М. Ресурсозберігаючі аспекти застосування кавітаційних пристроїв у технологічних процесах // Энергосбережение. Энергетика. Энергоаудит. 2011. № 7. С. 74–78.
112. Вітенько Т.М., Зварич Н.М., Зарецька Т.В. Енергетичні аспекти застосування гідродинамічних кавітаційних пристроїв у технологічних

процесах // Науковий журнал Промислового гідроліка і пневматика. Вінниця. 2011. №3(33), С. 47–49.

113. Волынский М.С. Необыкновенная жизнь обыкновенной капли. М.: Знание, 1986. 144 с.

114. Воробйова О.В., Левченко Л.В., Самойчук К.О. Аналітичні дослідження енергетичної ефективності використання пульсаційного гомогенізатора молока // Перспективи розвитку сучасної науки: матеріали IV міжнар. наук.–практ. конф., 2–3 грудня 2016 р. Львів: Видавничий дім «Гельветика», 2016. Ч. 1. С. 80–83.

115. Высокочастотный многорядный роторно-импульсный аппарат: пат. 2179895 Россия / МКИ В06В1/20 / Зимин А.И., Промтов М.А., Карепанов С.К. опубл. 27.02.2002. Бюл. №11.

116. Гвоздев А.В., Самойчук К.О., Кокоулин Э.П. До методики визначення якості гомогенізації молока. // Праці ТДАТА: зб. наук. праць / Таврійська державна агротехнічна академія, Мелітополь: ТДАТА. 2005. Вип. 25. С. 38–42.

117. Гвоздев О.В., Паляничка Н.О. Обґрунтування параметрів імпульсного гомогенізатора молока // Праці Таврійського державного агротехнологічного університету: зб. наук. праць. Мелітополь: ТДАТУ, 2011. Вип.11, Т.6. С. 191–197.

118. Гвоздев О.В., Самойчук К.О. Дослідження механізму руйнування жирових кульок молока при гомогенізації // Праці ТДАТА: зб. наук. праць / Таврійська державна агротехнічна академія, Мелітополь: ТДАТА, 2005. Вип. 34. С. 57–61.

119. Гвоздев О.В., Самойчук К.О. Метод визначення якості гомогенізації молока // Екотрофологія. Сучасні проблеми. Біла Церква. 2005. С. 213–214.

120. Гвоздев О.В., Самойчук К.О., Паляничка Н.О. Комп'ютерне моделювання імпульсного гомогенізатора молока з використанням програмного забезпечення Ansys Workbench // Обладнання та технології харчових виробництв: зб. наук. праць / Донецький національний університет

економіки і торгівлі імені Михайла Туган-Барановського. Донецьк: ДонНУЕТ ім. М. Туган-Барановського, 2012. Вип. 28. С. 294–299.

121. Гельфанд Б.Е., Губин С.А., Когарко С.М. Разновидности дробления капли и их характеристики // ИФЖ, 1974. Том 27. №1. С. 100–108.

122. Гладушняк О.К., Нужин Е.В. Про кавітаційну гомогенізацію // Наукові праці ОДАХТ: зб. наук. праць / Одеса: Вип. 16. 1996. С. 202–206.

123. Говорушко Т.А., Дуда В.Д. Продовольчий ринок молока України, його розвиток та перспективи // Вісник Одеського національного університету. 2013. Т. 18, Вип. 1/1. С. 102–106.

124. Головка гомогенізатора: пат. на корисну модель 106521 Україна / Самойчук К.О., Дейниченко Г.В., Султанова В.О., Ялпачик Ф.Ю. № 201511243; заявл. 16.11.15; опубл. 25.04.16, Бюл. № 8. 6 с.

125. Головка гомогенізатора: пат. на корисну модель 106533 Україна / Самойчук К.О., Дейниченко Г.В., Панов А.В. № 201511335; заявл. 17.11.15; опубл. 25.04.16, Бюл. № 8. 4 с.

126. Головка гомогенізатора: пат. на корисну модель 106536 Україна / Самойчук К.О., Дейниченко Г.В., Панов А.В. № 201511347; заявл. 17.11.15; опубл. 25.04.16, Бюл. № 8. 4 с.

127. Головка гомогенізатора: пат. на корисну модель 98488 Україна / Самойчук К.О., Султанова В.О., Ялпачик Ф.Ю. № 201412958; заявл. 03.12.14; опубл. 27.04.15, Бюл. № 8. 4 с.

128. Гомогенизатор для молока и молочных продуктов // Пищевая промышленность. URL: <https://mill.globecore.ru/gomogenizator-moloka/> (дата звернення: 12.06.2018)

129. Гомогенизатор. а.с. №1620122 СССР А1/ В.А. Лавров, В.И. Биглер, Е.Ю. Шереметьева и др. № 4303630/26; заявл. 15.02.88, опубл. 15.01.91, Бюл. №2

130. Гомогенізатор для рідких продуктів: пат. 37355 Україна / Гвоздев О.В., Паляничка Н.О., Івженко А.О. № u200807808; заявл. 09.06.2008; опубл. 25.11.2008, Бюл. № 22.

131. Гомогенізатор для рідких продуктів: пат. на корисну модель 66085 Україна / Гвоздєв О.В, Паляничка Н.О., Самойчук К.О., Бездітний А.О., Кучеренко В.В. № 201106224; заявл. 18.05.11; опубл. 26.12.11, Бюл. № 24. 3 с.

132. Гомогенізатор для рідких продуктів: пат. на корисну модель 121278 Україна / Кюрчев В.М., Самойчук К.О., Марченко О.С., Левченко Л.В. № 201706676; заявл. 27.06.17; опубл. 27.11.17, Бюл. № 22. 6 с.

133. Горбатова К.К. Физико–химические и биохимические основы производства молочных продуктов. СПб.: ГИОРД, 2003. 352 с.

134. Горбатова К.К. Химия и физика молока. СПб.: ГИОРД, 2003. 288 с.

135. Гордезиани В.С. Производство заменителей цельного молока. М.: Агропромиздат, 1990. 272 с.

136. Городецкий И.Я., Васин А.А., Олевский В.М., Лупанов П.А. Вибрационные массообменные аппараты. М.: Химия, 1980. 189 с.

137. Грабова Т.Л. Диспергування гетерогенних систем у роторно-пульсаційному апараті дисково-циліндричного типу: автореф. ... дис канд. техн. наук: 05.14.06. Київ, 2007. 20 с.

138. Грановский В.Я. Сравнительная оценка диспергирующих устройств // Молочная промышленность. 1999. № 11. С. 37–38.

139. Дейниченко Г.В., Постнов Г.М., Червоний В.М. Обґрунтування ефективних параметрів ультразвукового оброблення під час отримання водно-жирових емульсій / Обладнання та технології харчових виробництв. №30. 2013. С. 47–52.

140. Дейниченко Г.В., Самойчук К.О. Перспективные конструкции гомогенизаторов молока // Озиқ-овқат ва кимёсанотида чиқиндисиз ва экологик самарадор технологияларни кўллаш: мавзусида Республика миқёсидаги илмий-амалий анжуман иштирокчиларининг илмий маъруза материаллари киритилган, 14 марта 2017 р. Наманган шаҳри: НамМПИ, 2017. С. 146–148.

141. Дейниченко Г.В., Самойчук К.О. Підвищення ефективності процесу гомогенізації молока в пульсаційному гомогенізаторі з вібруючим ротором //

Інноваційні аспекти розвитку обладнання харчової і готельної індустрії в умовах сучасності: тези доповідей міжнар. наук.–практ. конф., 8–11 вер. 2015 р. Мелітополь–Кирилівка: ХДУХТ, 2015. С. 384–386.

142. Дейниченко Г.В., Самойчук К.О., Івженко А.О. Синхронізація коливальних і обертальних рухів ротора у пульсаційному гомогенізаторі з вібруючим ротором // Вібрації в техніці та технологіях. 2016. №1 (81). С. 122–131.

143. Дейниченко Г.В., Самойчук К.О., Івженко А.О., Левченко Л.В. Аналіз конструкцій гомогенізаторів молочної промисловості // Праці Таврійського державного агротехнологічного університету: зб. наук. праць. Мелітополь: ТДАТУ, 2016. Вип.16. Т.1. С. 9–15.

144. Дейниченко Г.В., Самойчук К.О., Ковальов О.О. Конструкції струминних диспергаторів жирової фази молока // Праці Таврійського державного агротехнологічного університету: зб. наук. праць. Мелітополь: ТДАТУ, 2016. Вип.16. Т.1. С. 219–226.

145. Дейниченко Г.В., Самойчук К.О., Ковальов О.О. Раціональні параметри струминного гомогенізатора молока // Інноваційні аспекти розвитку обладнання харчової і готельної індустрії в умовах сучасності: матеріали другої міжнар. наук.–практ. конф., 5–7 вер. 2017 р. Харків: ХДУХТ, 2017. С. 44–45.

146. Дейниченко Г.В., Самойчук К.О., Ковальов О.О. Струминні гомогенізатори молока // Розвиток харчових виробництв, ресторанного та готельного господарств і торгівлі: проблеми, перспективи, ефективність: матеріали міжнар. наук.–практ. конф., 19 травня 2016 р. Харків: ХДУХТ, 2016. С. 274–276.

147. Дейниченко Г.В., Самойчук К.О., Ковальов О.О., Пацький І.Ю. Дослідження діаметру каналу подавання вершків струминного гомогенізатора молока // Праці Таврійського державного агротехнологічного університету: зб. наук. праць. Мелітополь: ТДАТУ, 2017. Вип. 17. Т. 1 С. 195–205.

148. Дейниченко Г.В., Самойчук К.О., Кюрчев С.В., Олексієнко В.О., Паляничка Н.О., Верхованцева В.О. Протитечійно-струминна гомогенізація молока: монографія. Мелітополь: Видавничий будинок ММД, 2017. 188 с.

149. Дейниченко Г.В., Самойчук К.О., Левченко Л.В. Аналітичне визначення дисперсності при обробці молока в пульсаційному гомогенізаторі // Вісник Харківського національного технічного університету сільського господарства імені Петра Василенка: зб. наук. праць. Харків: ХНТУСГ ім. П. Василенка. Харків, 2016. Вип. 179. С. 32–39.

150. Дейниченко Г.В., Самойчук К.О., Левченко Л.В. Аналітичні дослідження енерговитрат пульсаційного гомогенізатора молока // Прогресивні техніка та технології харчових виробництв ресторанного господарства і торгівлі: зб. наук. праць / Харківський державний університет харчування та торгівлі. Харків: ХДУХТ, 2016. Вип. 1 (23). С. 170–181.

151. Дейниченко Г.В., Самойчук К.О., Левченко Л.В. Вплив кратності обробки молочної емульсії в пульсаційному гомогенізаторі // Прогресивні техніка та технології харчових виробництв ресторанного господарства і торгівлі: зб. наук. праць / Харківський державний університет харчування та торгівлі. Харків: ХДУХТ, 2016. Вип. 2 (24). С. 226–233.

152. Дейниченко Г.В., Самойчук К.О., Левченко Л.В. Ефективність гомогенізації молока у пульсаційному гомогенізаторі // Вібрації в техніці та технологіях. 2017. №1 (84). С. 116–121.

153. Дейниченко Г.В., Самойчук К.О., Левченко Л.В. Перспективи використання пульсаційного гомогенізатора-диспергатора емульсій // Проблеми конструювання, виробництва та експлуатації сільськогосподарської техніки: матеріали XI міжнар. наук.–практ. конф., 1–3 лист. 2017 р. Кропивницький: ЦНТУ, 2017. С. 17–19.

154. Дейниченко Г.В., Самойчук К.О., Левченко Л.В. Теоретичні дослідження пульсаційної гомогенізації молока // Інноваційні аспекти розвитку обладнання харчової і готельної індустрії в умовах сучасності: матеріали другої міжнар. наук.–практ. конф., 5–7 вер. 2017 р. Харків: ХДУХТ, 2017. С. 42–43.

155. Дейниченко Г.В. Самойчук К.О., Паляничка Н.О., Левченко Л.В. Визначення впливу подачі молока в пульсаційному гомогенізаторі // Техніка, енергетика, транспорт АПК. 2017. №3 (98). С. 12–17.

156. Дитякин Ю.Ф., Клячко Л.А., Новиков Б.В. и др. Распыливание жидкостей. М.: Машиностроение; Издание 2-е, перераб. и доп., 1077. 208 с.

157. Долинский А.А., Иваницкий Г.К. Принципы разработки новых энергоресурсосберегающих технологий и оборудования на основе методов дискретно-импульсного ввода энергии // Пром. теплотехника. 1997. Т.19. № 4–5. С.13–25.

158. Долинский А.А., Иваницкий Г.К. Тепломассообмен и гидродинамика в паро-жидкостных дисперсных средах. Теплофизические основы дискретно-импульсного ввода энергии. К.: Наук. думка, 2008. 381 с.

159. Долинский А.А., Павленко А.М., Басок Б.И. Теплофизические процессы в эмульсиях. Киев: Наукова думка, 2005. 264 С.

160. Долинский А.А., Шурчкова Ю.А., Буримский В.К. и др. Диспергирование жировых шариков при вакуумной гомогенизации // Молочная промышленность. 2003. № 2. С. 55–56.

161. Долинский А.А., Шурчкова Ю.А., Буримский В.К. и др. Влияние некоторых параметров на диспергирование жировых шариков при адиабатном вскипании молока в вакууме. Молочная промышленность. 2002. № 2. С. 55–56.

162. Долинский А.А., Шурчкова Ю.А., Иваницкий Г.К., Целень Б.Я. Оптимизация тепломассообменных и гидродинамических процессов в технологии термовакуумной обработки молока // Наука та інновації. 2010. Т. 6. № 1. С. 59–68.

163. Долінський А.А., Авраменко А.О., Іваницький Г.К. Використання механізмів і методів ДІВЕ для керування кінетикою перебігу нанорівневих процесів // Вісник НАН України. 2013. № 8. с. 47–57.

164. Драгун Н.А., Клятвина Т.С. и др. Струйный эмульгатор для заменителей цельного молока // Молочная промышленность. 1986. № 3. С. 3–4.

165. Думитраш П.Г., Болога М.К., Кучук Т.В., Шемякова Т.Д. Кавитационные технологии при диспергировании и гомогенизации // Электронная обработка материалов. 2009. № 4. С. 102–107.

166. Дьяконов В.П. Энциклопедия Mathcad 2001 i и Mathcad 11 М.: СОЛОН–Пресс, 2004. 832 с.

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

168. Знак З.О. Сухацький Ю.В. Мних Р.В. Дослідження залежності ефективності роботи гідродинамічного струменевого кавітатора від конструктивних параметрів кавітувального елемента // Вібрації і техніці та технологіях. №2 (78), 2015. С. 18–26.

169. Иванец Г.Е. Интенсификация процессов гомогенизации и диспергирования при получении сухих, увлажненных и жидких комбинированных продуктов: автореф. дис. ... д-ра. техн. наук: 05.18.12. М., 2001. 52 с.

170. Иванец Г.Е. Плотников В.А., Плотников П.В. Энергетическая характеристика роторно–пульсационного аппарата // Журн. приклад. химии. 2000. Т.73, № 9. С. 1511–1514.

171. Иванов С.В., Рыжкова Т.М., Васильев В.С. Научно-практическое значение разработанной нами методики по проведению оценки жировых шариков молока / Научные труды SWorld , Т.8 №3, 2014. С. 7–14.

172. Идельчик И.Е. Справочник по гидравлическим сопротивлениям. М.: Машиностроение, 1975. 464 с.

173. Инструкция по химическому контролю на предприятиях молочной промышленности; утв. М–вом мясн. и молоч. пром–сти СССР 30.12.88. М., 1988. 118 с.

174. Івженко А.О., Гвоздєв О.В. Методи інтенсифікації процесів диспергування й гомогенізації в роторно-пульсаційних апаратах //

Перспективна техніка і технологія: матеріали IV міжнар. наук.-практ. конф. 2008.: Миколаїв, 2008, С. 166–167.

175. Кардашев Г.А. Физические методы интенсификации процессов химической технологии. М.: Химия, 1990. 206 с.

176. Карпачева СМ. Интенсификация химико-технологических процессов применением пульсационной аппаратуры // Журн. прикл. химии. 1990. Т. 63, № 8. С 1649–1658.

177. Кацнельсон М.У., Мухин А.А. и др. Экспериментальные исследования характера распределения давления в гомогенизирующей голоке с цилиндрическим клапаном. Труды ВНИЭКИ ПРОДМАШа. М.: 1981, С. 66–74.

178. Кернасюк Ю. Молочний сектор: реалії і перспективи // Агробізнес сьогодні. 2015. № 6 (301). URL: www.agro-business.com.ua/ekonomichnyi-gektar/2805-molochnyi-sektorrealiii-i-perspektyvy.html.

179. Кинг Н. Оболочки жировых шариков молока. М.: Пищепромиздат, 1956. 66 с.

180. Клапанна головка гомогенізатора: пат. на корисну модель 112317 Україна / Кюрчев В.М., Воробйова О.В., Самойчук К.О. № 201606459; заявл. 13.06.16; опубл. 12.12.16, Бюл. № 23. 3 с.

181. Коваленко О.В., Славов В.П., Шубенко О.І. Формування ринкової ціни продукції переробки молока // Економіка АПК. Київ. 2013. №7. С. 22–28.

182. Ковальов О.О., Левченко Л.В., Самойчук К.О. Енергетичні витрати перспективних конструкцій гомогенізаторів молока // Наукові здобутки у вирішенні актуальних проблем виробництва та переробки сировини, стандартизації і безпеки продовольства: збірник праць за підсумками VII міжнар. наук.-практ. конф., 27–28 квітня 2017 р. Київ: НУБІП, 2017. С. 315–316.

183. Кодряну К.П. Наша техника // Масложировая промышленность. 2000. № 1. С. 38–39.

184. Колесников В.В., Лежебоков А.В., Пушкарев А.Е. Экспериментальные исследования характеристик насадок // Известия ТулГУ. 2013. Вып. 4. с. 211–215.

185. Колмогоров А.Н. О дроблении капель в турбулентном потоке // Докл. АН СССР. 1949. Т.66, № 5. С. 825–828.

186. Кравців І.К. Організаційні основи та перспективи розвитку ринку молока та молокопродуктів // Науковий вісник Львівського національного університету ветеринарної медицини та біотехнологій імені С.З. Гжицького. 2014. Т. 16 №1. Ч. 1. С. 241–244.

187. Кравців Р.И., Кравців В.І., Островський Я.Ю. Молоко і молочні продукти: Л.: ЛА Піраміда, 2001. 310 с.

188. Краснопольський Я. В Україні збільшилось виробництво молока вищого гатунку // Прес-служба Мінагрополітики. 2016. URL: www.minagro.gov.ua/uk/print/20590.

189. Крусь Г.Н., Шалыгина З.В., Волокитина З.В. Методы исследования молока и молочных продуктов / под ред. А.М. Шалыгиной. М.: Колос, 2002. 368 с.

190. Кугенев П.В., Барабанщиков Н.В. Практикум по молочному делу М.: Агропромиздат, 1988. 224 с.

191. Курманов А.К., Исинтаев Т.И., Рыспаев К.С. Теория дробления ингредиентов взвесей // Известия ОГАУ. 2013. № 1 (39). с. 48–51.

192. Кухленко А.А. Совершенствование методов расчета технологических параметров аппарата роторно-пульсационного типа для приготовления эмульсий: дис. ... канд. техн. наук: 05.17.08. Бийск, 2007. 125 с.

193. Кюрегян Г.П., Комаров Н.В., Кюрегян О.Д. Применение кавитационного эффекта при производстве эмульсий длительного хранения для различных отраслей промышленности // Вестник Всероссийского научноисследовательского института жиров. СПб, №1, 2015. С. 29–31.

194. Левич В.Г. Физико-химическая гидродинамика. М.: Физматгиз, 1959. 699 с.

195. Леженкін О. М., Самойчук К.О, Ковальов О.О., Паляничка Н.О., Верхованцева В.О. Визначення шляху змішування та дотичних напружень в

струминному гомогенізаторі молока // Вісник Українського відділення Міжнародної академії аграрної освіти. 2017. Вип. 5. С. 129–142.

196. Линник А.Ю. Совершенствование процесса получения пищевых эмульсий на роторном аппарате и определение их параметров методами математического моделирования: дис. ... канд. техн. наук: 05.18.12. Москва, 2008. 138 с.

197. Липатов Н.Н., Сажинов Г.Ю., Башкиров О.И. Совокупное качество технологических процессов молочной промышленности и количественные критерии его оценки. // Хранение и переработка сельхозсырья, 2001. №4. С. 33–34.

198. Литвиненко, О.А., Некоз О.І., Немирович П.М., Кіндрат З. Кавітаційні пристрої в харчовій, переробній та фармацевтичній промисловості // Наукові праці Одеської національної академії харчових технологій. Одеса, 2009. Вип. 36. Том. 2. С. 308–310.

199. Лукасік К. Науково–технічні основи підвищення ефективності роботи та довговічності клапанних гомогенізаторів: автореф. ... дис. д-ра техн. наук: 05.18.12. К.: 2003. 31 с.

200. Любгфтович С.А., Третьшов О.Б., Ганиев Р.В. и др. Использование волновых эффектов для интенсификации химических и фазовых превращений в многофазных системах // Теор. основы хим. технол. 1988. Т. 22, № 4. С. 560–564.

201. Минько А.А. Статистический анализ в MS Excel. М.: Вильямс, 2004. 448 с.

202. Моргунова А.В., Борисенко Л.А. Теоретические и практические аспекты создания инновационных способов получения белково-жировых эмульсий // Инновационные разработки молодых ученых – развитию агропромышленного комплекса: материалы II междунар. конф., 20–21 сентября 2013 г.: сборник научных трудов ГНУ СНИИЖК. Т. 3. Вып. 6. Ставрополь: Бюро новостей, 2013. С. 193–195.

203. Мурзин Д.Ю. Интенсификация химико - технологических процессов // Хим. промышленность сегодня. 2003. №11. С. 4–11.
204. Мурский А.Д., Бугранова И.Э. О дроблении жировых шариков в клапанном гомогенизаторе // Химическое и нефтегазовое машиностроение. № 6. 2014. Москва, С. 20–22.
205. Нигматулин Р.И. Динамика многофазных сред. Ч. 1. М.: Наука, 1987. 464 с.
206. Новицкий Б.Г. Применение акустических колебаний в химико–технологических процессах. М.: Химия, 1983. 191 с.
207. Новые идеи в планировании эксперимента: под ред. В.В. Налимова. К.: Колос, 1992. 387 с.
208. Нужин Е.В. Гидродинамические исследования устройств для диспергирования двухфазных сред (применительно к пищевым производствам): дис. ... канд. техн. наук : 05.18.12 . Одесса, 1981. 148 с.
209. Нужин Е.В. Характеристические числа процесса гомогенизации молока // Вісник харківського національного технічного університету сільського господарства імені Петра Василенка. Харків, 2005. Вип. 38. С. 63–68.
210. Нужин, Е.В., Гладушняк А.К. Гомогенизация и гомогенизаторы: монографія. Одесса: Печатный дом, 2007. 264 с.
211. Орешина М.Н. Дисперсность молока при различных воздействиях // Молочная промышленность. 2009. №3. С. 32–33.
212. Орешина М.Н. Импульсное диспергирование многокомпонентных пищевых систем и его аппаратная реализация: автореф. дис. ... д-ра техн. наук: 05.18.12. М., 2010. 50 с.
213. Орешина М.Н. Использование импульсных диспергаторов для создания тонкодисперсных пищевых систем // Хранение и переработка сельхозсырья. 2010. №1. С. 53–54.
214. Орешина М.Н. Исследование кинетики дробления частиц в жидких средах при воздействии возмущений давления // Хранение и переработка сельхозсырья. 2010. №5. С. 11–12.

215. Орешина М.Н. Разработка импульсного гомогенизатора на основе исследования дробления жировых шариков молока: дис. канд. техн. наук: 05.18.12. Орёл, 2001. 126 с.

216. Орешина М.Н., Космодемьяский Ю.В. Управление дисперсностью пищевых эмульсий и суспензий // Хранение и переработка сельхозсырья. 2007. №6. С. 65–67.

217. Орешина М.Н., Семенов Г.В. Ультратонкое диспергирование в технологиях многокомпонентных пищевых систем: монографія. М. : МГУПБ, 2009. 184 с.

218. Орлов П.В., Лымарь А.В. Аппаратурное оформление процессов диспергирования в пищевой // Научный журнал НИУ ИТМО, СПб.: Вып. 1(15). 2013. С. 126–134.

219. Островский Г.М. и др. Новый справочник химика и технолога. Процессы и аппараты химических технологий. Часть I.: НПО «Профессионал». 2004. 848с.

220. Паляничка Н.О. Аналіз існуючих гіпотез руйнування жирових кульок // Праці Таврійського державного агротехнологічного університету: зб. наук. праць. Мелітополь, 2010. Вип.10, Т.3. С. 48–54.

221. Паляничка Н.О. Вдосконалення процесу імпульсної гомогенізації молока: автореф. ...дис. канд. техн. наук: 05.18.12. Донецьк, 2013. 20 с.

222. Паляничка Н.О. Визначення основних параметрів і режимів роботи промислового зразка імпульсного гомогенізатора молока // Праці Таврійського державного агротехнологічного університету: зб. наук. праць. Мелітополь: ТДАТУ, 2015. Вип. 15.Т.1. С. 187–191.

223. Паляничка Н.О. Модель подрібнення жирових часток кавітаційними збурюваннями імпульсного гомогенізатора // “Перспективна техніка і технології – 2009: матеріали V міжнар. наук.-практ. конф. студентів і молодих вчених, 2009, / МДАУ. Миколаїв, 2009. С. 58–62.

224. Паляничка Н.О., Антонова Г.В. Експериментальні дослідження впливу основних факторів на ступінь гомогенізації в імпульсному

гомогенізаторі. // ПраціТДАТУ: зб. наук. праць / Таврійський державний агротехнологічний університет, Мелітополь: ТДАТУ, 2016. Вип. 16. Т.1. С. 21–28.

225. Паляничка Н.О., Гвоздев О.В. Определение степени гомогенизации при импульсной гомогенизации молока. // Труды ТГАТУ: сб. науч. трудов / Тавический государственный агротехнологический университет, Мелитополь. Вип.13, Т.7. 102–107.

226. Паляничка Н.О., Гвоздев О.В. Експериментальне обґрунтування параметрів імпульсного гомогенізатора молока // Збірник наукових праць Одеської національної академії харчових технологій: зб. наук. праць. Одеса: ОНАХТ, 2011. Вип.39, Т.2. С. 177–181.

227. Паляничка Н.О., Гвоздев О.В. Обґрунтування форми отворів у поршні-ударнику імпульсного гомогенізатора молока // Сучасні проблеми техніки та технології харчових виробництв, ресторанного бізнесу та торгівлі: тези доповідей всеукр. наук.-практ. конф. Харків: ХДУХТ, 2010. С. 110–112.

228. Паляничка Н.О., Гвоздев О.В., Самойчук К.О. Визначення енерговитрат на процес імпульсної гомогенізації молока // Состояние, достижения и перспективы переработки, стандартизации и сертификации материалов: матеріали міжнар. наук.–практ. конф., 25–27 вер. 2012 р. Херсон: ХДАУ, 2012. С. 47–48.

229. Паляничка Н. О., Гвоздев О.В., Самойчук К. О. Експериментальне обґрунтування ефективності використання імпульсної гомогенізації молока // Проблеми харчових технологій і харчування. Сучасні виклики і перспективи розвитку: тези доповідей VII міжнар. наук.-практ. конф., 7–9 вер. 2011 р. Донецьк: ДонНУЕТ ім. М. Туган-Барановського, 2011. С. 163–166.

230. Паляничка Н.О., Петриченко С.В., Антонова Г.В., Левченко Л.В. Визначення основних залежностей ефективності імпульсної гомогенізації молока. // Праці ТДАТУ: зб. наук. праць. Мелітополь: ТДАТУ, 2017. Вип. 17., Т.1. С. 105–112.

231. Паляничка, Н.О., Гвоздєв О.В. Визначення ступеня гомогенізації при імпульсній гомогенізації молока // Праці ТДАТУ: зб. наук. праць / Таврійський державний агротехнологічний університет. Мелітополь, 2013. Вип.13, Т.7. С. 102–107.

232. Папченко А.А., Овчаренко М.С., Ковальов С.Ф. Експериментальне дослідження впливу кількості каналів ротора та статора роторно-динамічного агрегата-гомогенізатора на його енергетичні характеристики // Вісник СумДУ. 2012. № 4. с. 53–56.

233. Петрачков Б.В. Разработка вихрового гомогенизатора на основе теоретических и экспериментальных исследований процесса низкотемпературной кавитационной гомогенизации: дис. ... канд. техн. наук: 05.18.12. Вологда-Молочное, 2006. 163 с.

234. Прогноз розвитку українського ринку молока та молокопродуктів в контексті світових тенденцій // MilkUA.info: Інформаційно-аналітичний портал про молоко і молочне скотарство URL: www.milkua.info/uk/post/prognoz-rozvitku-ukrainskogo-rinku-moloka-ta-molokoproduktiv-v-konteksti-svitovih-tendencij

235. Промтов М.А. Интенсификация химико–технологических процессов в импульсных потоках на примере гетерогенных систем (на примере процессов эмульгирования, диспергирования, растворения и экстрагирования): автореф. дис. ... д–ра техн. наук: 05.17.08. Тамбов, 2001. 33 с.

236. Промтов М.А. Машины і апарати з імпульсними енергетичними діями на оброблювані речовини: М.: Машиностроение-1, 2004.136 с.

237. Промтов М.А. Пульсационные аппараты роторного типа: теория и практика: моногр. М.: Машиностроение - 1, 2001. 260 с.

238. Просеков А.Ю., Курбанова М.Г. Анализ состава и свойств белков молока с целью использования в различных отраслях пищевой промышленности // Техника и технология пищевых производств: НТЖ.- Кемерово, 2009. № 4. С.68–71.

239. Прохасько Л.С., Ярмаркин Д.А. Использование гидродинамической кавитации в пищевой промышленности // Международное научное издание “Сборник научных трудов SWorld”. 2014. Т. 7, № 3. с. 27–31.

240. Ребиндер П.А. К теории образования эмульсии // Коллоидный журнал. 1946. № 8(3). С. 157–173.

241. Рид Р., Шервуд Т. Свойства газов и жидкостей. Ленинград: Химия, 1971. 701 с.

242. Ринок молока: підсумки 2016 року та прогнози на наступний рік // «Аграрний Тиждень. Україна» URL: www.a7d.com.ua/novini/31794-rinok-moloka-pdsumki-2016-roku-ta-prognozi-na-nastupniy-rk.html

243. Ровинский Л.А. Оценка качества гомогенизации жидких пищевых продуктов // Контроль и качество. 1990. №4. С. 54–56.

244. Роторно-пульсационный аппарат (варианты): пат. 2146967 Россия / МКИ В 01 F 7/12, 7/28. / Фомин В.М., Агачёв Р.С., Аюпов Р.Ш. и др. опубл. 27.03.2000. Бюл. №12.

245. Роторно-пульсационный аппарат с вибрирующим ротором: пат. 2203728 Россия / МКИ7 В 01 F 7/00. / Иванец Г.Е., Плотников В.А., Сафонова Е.А., Артемасов В.В. и др. № 2001111249/12; заявл. 23.04.2001; опубл. 10.05.2003, Бюл. № 13.

246. Роторно-пульсационный аппарат: а.с. 291548А СССР, МКИ⁵ В 01 F 11/00. / М.А. Балабудкин, А.А. Барам. опубл. 30.03.1985. Бюл. №12.

247. Роторно-пульсационный аппарат з ротором, що вібрує: пат. на корисну модель 106554 Україна / Самойчук К.О., Івженко А.О., Ялпачик Ф.Ю., Султанова В.О. № 201511568; заявл. 23.11.15; опубл. 25.04.16, Бюл. № 8. 4 с.

248. Роторно-пульсационный аппарат з ротором, що вібрує: пат. на корисну модель 107458 Україна / Самойчук К.О., Івженко А.О., Ялпачик Ф.Ю., Султанова В.О. № 201511506; заявл. 23.11.15; опубл. 10.06.16, Бюл. № 11. 5 с.

249. Роторно-пульсационный аппарат з ротором, що вібрує: пат. на корисну модель. 121949 Україна / Кюрчев В.М., Дейниченко Г.В., Самойчук К.О., Пацький І.Ю. № 201705629; заявл. 07.06.17; опубл. 26.12.17, Бюл. № 24. 6 с.

250. Роторно-пульсаційний апарат: пат. 47806 Україна / Івженко А.О., Гвоздев О.В., Івженко О.В. № u200908828; заявл. 25.08.2009; опубл. 25.02.2010, Бюл. № 4.

251. Роторно-пульсаційний апарат: пат. 63772 Україна, / Івженко А.О., Гвоздев О.В., Івженко О.В. № u201101600; заявл. 11.02.2011; опубл. 25.10.2011, Бюл. № 20.

252. Роторно-пульсаційний апарат: пат. №41129 Україна / Івженко А.О., Гвоздев О.В. № u 200812874; заявл. 04.11.2008; опубл. 12.05.2009; Бюл. № 9.

253. Роторный апарат: а.с. 1674942 СССР, МКИ В 01 F 7/28. / В.М. Червяков, Е.С. Шитиков, Ю.В. Воробьёв и др. № 99119141/12; заявл. 06.09.1999, опубл. 15.03.1992. Бюл. №10.

254. Роторный апарат: пат. 2155634 РФ, МКИ В 01 F 7/00. М.А. Промтов В.М., Червяков,Ю.В., Воробьёв и др. опубл. 10.09.2000. Бюл. №25.

255. Ружицкий В.П. Гидродинамический диспергатор для приготовления рабочих гидкостей. М.:МВОКУ, 1995. 52 сс.

256. Самойчук К.О., Паляничка Н.О. Аналіз сил, що діють на жирову кульку під час гомогенізації // Праці Таврійського державного агротехнологічного університету: зб. наук. праць. Мелітополь: ТДАТУ, 2010. Вип. 10. Т. 3. С. 87–92.

257. Самойчук К.О. Багатократна і багатоступінчаста гомогенізація молока // Праці Таврійського державного агротехнологічного університету: зб. наук. праць. Мелітополь: ТДАТУ, 2018. Вип. 18. Т.1 С. 22–28.

258. Самойчук К.О. Визначення універсального фактора диспергування жирової фази молока // Інноваційні аспекти розвитку обладнання харчової і готельної індустрії в умовах сучасності: матеріали другої міжнар. наук.–практ. конф., 5–7 вер. 2017 р. Харків: ХДУХТ, 2017. С. 17–19.

259. Самойчук К.О., Івженко А.О. Експериментальні дослідження диспергування жирової емульсії в пульсаційному апараті з вібруючим ротором // Обладнання та технології харчових виробництв: зб. наук. праць / Донецький національний університет економіки і торгівлі імені Михайла

Туган–Барановського. Донецьк: ДонНУЕТ ім. М. Туган–Барановського, 2013. Вип. 30. С. 155–161.

260. Самойчук К.О. Зниження піноутворення при протитечію-струменевій гомогенізації молока // Праці ТДАТУ: зб. наук. праць / Таврійський державний агротехнологічний університет, Мелітополь: ТДАТУ, 2010. Вип. 10., Т.1. С. 99–106.

261. Самойчук К.О. Кратність гомогенізації молока // Інноваційні технології виробництва та переробки тваринницької продукції: матеріали міжнар. наук.–практ. інтернет–конф., 12 груд. 2017 р. Вінниця: ВНАУ, 2017. С. 170–172.

262. Самойчук К.О. Методика расчёта степени дисперсности эмульсий // MOTROL. Commission of Motorization and Energetics in Agriculture. 2016. Vol.18. №. 2. P. 97–102.

263. Самойчук К.О. Обґрунтування параметрів та режимів роботи протитечію-струменевого гомогенізатора молока: дис. ... канд. техн. наук: 05.18.12. Донецьк, 2008. 155 с.

264. Самойчук К.О. Обґрунтування параметрів та режимів роботи протитечію-струменевого гомогенізатора молока: автореф. ... канд. техн. наук: 05.18.12. Донецьк, 2008. 20 с.

265. Самойчук К.О. Прискорення емульсії як основний фактор гідродинамічного диспергування жирової фази молока // Прогресивні техніка та технології харчових виробництв ресторанного господарства і торгівлі: зб. наук. праць / Харківський державний університет харчування та торгівлі. Харків: ХДУХТ, 2017. Вип. 2 (26). С.210–220.

266. Самойчук К.О. Результати експериментальних досліджень протитечію-струменевого гомогенізатора молока // Праці ТДАТА: зб. наук. праць / Таврійська державна агротехнічна академія. Мелітополь: ТДАТА, 2007. Вип. 7., Т.5. С. 34–40.

267. Самойчук К.О. Шляхи енергозбереження при гомогенізації молока // Проблеми та перспективи сталого розвитку АПК: матеріали міжнар. наук.–практ. конф., 14–15 квітня 2016 р. Мелітополь: ТДАТУ, 2016. С. 89–90.

268. Самойчук К.О., Гвоздєв О.В. Дослідження впливу надлишкового тиску та температури молока на якість протитечійно-струменевої гомогенізації // Обладнання та технології харчових виробництв. Донецьк: ДонНУЕТ, 2007. Вип.16. С. 121–126.

269. Самойчук К.О., Івженко А.О. Визначення продуктивності пульсаційного апарату з вібруючим ротором // Наукові праці Одеської національної академії харчових технологій: зб. наук. праць. Одеса: ОНАХТ, 2014. Вип. 45. Т. 3. С. 25–30.

270. Самойчук К.О., Івженко А.О. Визначення резонансних режимів роботи пульсаційного апарату з вібруючим ротором // Обладнання та технології харчових виробництв: зб. наук. праць / Донецький національний університет економіки і торгівлі імені Михайла Туган-Барановського. Донецьк: ДонНУЕТ ім. М. Туган–Барановського, 2013. Вип. 31. С. 74–82.

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

272. Самойчук К.О., Івженко А.О. Методика розрахунку пульсаційного гомогенізатора з вібруючим ротором // Збірник наукових праць Вінницького національного аграрного університету: зб. наук. праць. Вінниця: ВНАУ, 2015. Вип. 1 (89). Т. 2. №1. С. 133–138.

273. Самойчук К.О. Івженко А.О. Механізми диспергування жирової фази в пульсаційному апараті з вібруючим ротором // Праці Таврійського державного агротехнологічного університету: зб. наук. праць. Мелітополь: ТДАТУ, 2013. Вип. 13. Т.7. С. 11–20.

274. Самойчук К.О., Івженко А.О. Определение скорости в модуляторе пульсационного гомогенизатора с вибрирующим ротором // Вестник Могилёвского государственного университета продовольствия. 2014. №1 (16). С. 87–99.

275. Самойчук К.О., Івженко А.О. Рівняння зміни площі прохідного перетину модулятора в пульсаційному апараті з вібруючим ротором // Наукові праці Національного університету харчових технологій: зб. наук. праць. Київ: НУХТ, 2015. Т. 21. №4. С. 164–170.

276. Самойчук К.О., Івженко А.О. Розрахунок енерговитрат пульсаційного апарата з вібруючим ротором // Наукові праці Одеської національної академії харчових технологій: зб. наук. праць. Одеса: ОНАХТ, 2013. Вип. 43. Т. 2. С. 133–137.

277. Самойчук К.О., Івженко А.О., Султанова В.О. Дослідження імпульсного гомогенізатора молока // Інноваційні аспекти розвитку обладнання харчової і готельної індустрії в умовах сучасності: тези доповідей міжнар. наук.–практ. конф., 8–11 вер. 2015 р. Мелітополь–Кирилівка: ХДУХТ, 2015. С. 91–92.

278. Самойчук К.О., Ковалёв, А.А., Бездитный А.А. Моделирование процесса струйной гомогенизации молока с отдельной подачей сливок // Вестник Могилёвского государственного университета продовольствия. 2015. №2 (19). С. 69–76.

279. Самойчук К.О., Ковалев А.А., Палянычка Н.А. Обоснование основных параметров струйного гомогенизатора молока // Научные перспективы XXI века. Достижения и перспективы нового столетия: материалы XVI междунар. науч.-практ. конф., Россия, г. Новосибирск, 16–17.10.2015 г.

280. Самойчук К.О. Ковальов О.О. Механізми диспергування жирових кульок в струминному гомогенізаторі молока // Удосконалення процесів і обладнання харчових та хімічних виробництв: збірник праць XVI міжнар. наук.–практ. конф., 5–9 вер. 2016 р. Одеса: ОНАХТ, 2016. С. 81–85.

281. Самойчук К.О., Ковальов О.О. Аналіз сил дроблення жирових кульок в струминному гомогенізаторі // Наукові праці Південного філіалу Національного університету біоресурсів і природокористування України «Кримський агротехнологічний університет»: зб. наук. праць. Сімферополь: НУБіП, 2013. Вип. 153. С. 26–34.

282. Самойчук К.О., Ковальов О.О. Аналітичні параметри процесу струминної гомогенізації молока з роздільною подачею вершків // Наукові праці Одеської національної академії харчових технологій: зб. наук. праць. Одеса: ОНАХТ, 2013. Вип. 43. Т. 2. С. 77–81.

283. Самойчук К.О., Ковальов О.О. Використання нормалізації у струминному гомогенізаторі молока з роздільною подачею вершків // Праці Таврійського державного агротехнологічного університету: зб. наук. праць. Мелітополь: ТДАТУ, 2014. Вип.14. Т.1. С. 37–45.

284. Самойчук К.О., Ковальов О.О. Експериментальні дослідження струминного гомогенізатора з роздільним подаванням жирової фази // Обладнання та технології харчових виробництв: зб. наук. праць / Донецький національний університет економіки і торгівлі імені Михайла Туган-Барановського. Донецьк: ДонНУЕТ ім. М. Туган-Барановського, 2012. Вип. 28. С. 42–46.

285. Самойчук К.О., Ковальов О.О. Механізм разрушення жирових шариков в струйном гомогенизаторе с раздельной подачей сливок // Сборник научных трудов. ДонНУЕТ. Донецк. Вып. 30, 148–155.

286. Самойчук К.О., Ковальов О.О. Механізми диспергування жирових кульок в струминному гомогенізаторі молока // Наукові праці Одеської національної академії харчових технологій: зб. наук. праць. Одеса: ОНАХТ, 2016. Т.80. Вип.1. С. 103–107.

287. Самойчук К.О., Ковальов О.О. Обґрунтування гідродинамічних параметрів процесу струминної гомогенізації молока з роздільною подачею вершків // Наукові праці Одеської національної академії харчових технологій: зб. наук. праць. Одеса: ОНАХТ, 2014. Вип. 46. Т.2. С. 314–319.

288. Самойчук К.О., Ковальов О.О. Підвищення ефективності струминного гомогенізатору молока з роздільною подачею вершків // Наукові праці Одеської національної академії харчових технологій: зб. наук. праць. Одеса: ОНАХТ, 2015. Вип. 47. Т. 1. С. 67–72.

289. Самойчук К.О., Ковальов О.О. Підвищення ефективності струминного гомогенізатору молока з роздільною подачею вершків // Інноваційні енерготехнології: збірник праць V міжнар. наук.–практ. конф., 7–11 вер. 2015 р. Одеса: ОНАХТ, 2015. С. 246–251.

290. Самойчук К.О., Ковальов О.О. Розробка лабораторного зразка струминного гомогенізатору з роздільною подачею вершків // Праці Таврійського державного агротехнологічного університету: зб. наук. праць. Мелітополь: ТДАТУ, 2011. Вип. 11. Т.6. С. 77–83.

291. Самойчук К.О., Ковальов О.О. Струминний гомогенізатор з роздільною подачею вершків // Проблеми харчових технологій і харчування. сучасні виклики і перспективи розвитку: тези доповідей VII міжнар. наук.–практ. конф., 7–9 вер. 2011 р. Донецьк: ДонНУЕТ ім. М. Туган-Барановського, 2011. С. 172–175.

292. Самойчук К.О., Ковальов О.О. Струминний гомогенізатор–нормалізатор молока // Інноваційні аспекти розвитку обладнання харчової і готельної індустрії в умовах сучасності: тези доповідей міжнар. наук.–практ. конф., 8–11 вер. 2015 р. Мелітополь-Кирилівка: ХДУХТ, 2015. С. 93–94.

293. Самойчук К.О., Ковальов О.О. Теоретичні основи диспергування в струминному гомогенізаторі молока // Прогресивна техніка та технології харчових виробництв, ресторанного та готельного господарств і торгівлі. Економічна стратегія і перспективи розвитку сфери торгівлі та послуг: тези доповідей міжнар. наук.–практ. конф., 19 лист. 2013 р. Харків: ХДУХТ, 2013. Ч. I. С. 382–384.

294. Самойчук К.О., Ковальов О.О., Івженко А.О. Аналіз методів оцінювання якості гомогенізації молока // Праці Таврійського державного

агротехнологічного університету: зб. наук. праць. Мелітополь: ТДАТУ, 2012. Вип.12, Т.4. С. 222–229.

295. Самойчук К.О., Ковальов О.О., Левченко Л.В. Перспективні способи диспергування жирової фази молока // Розвиток харчових виробництв, ресторанного та готельного господарств і торгівлі: проблеми, перспективи, ефективність: тези доповідей міжнар. наук.–практ. конф., 18 травня 2017 р. Харків: ХДУХТ, 2017. Ч. 1. С. 280–281.

296. Самойчук К.О., Ковальов О.О., Султанова В.О. Якість та енергетична ефективність процесу струминної гомогенізації молока з роздільною подачею вершків // Праці Таврійського державного агротехнологічного університету: зб. наук. праць. Мелітополь: ТДАТУ, 2015. Вип.15. Т.1. С. 240–248.

297. Самойчук К.О., Левченко Л.В. Аналітичні дослідження умов диспергування жирової фази молока в пульсаційному гомогенізаторі // Вісник Дніпропетровського державного аграрно-економічного університету. 2016. №1 (39). С. 64–67.

298. Самойчук К.О., Левченко Л.В., Циб В.Г. Обґрунтування параметрів отворів поршня пульсаційного гомогенізатора молока // Праці Таврійського державного агротехнологічного університету: зб. наук. праць. Мелітополь: ТДАТУ, 2018. Вип. 18. Т.1. С. 274–280.

299. Самойчук К.О., Паляничка Н.О. Методи аналізу зображень при визначенні дисперсійних характеристик мікро-емульсій методом оптичного мікроскопування // Фундаментальна підготовка фахівців у природничо-математичній, технічній, агротехнологічній та економічній галузях: матеріали всеукраїнської наук.–практ. конф. з міжнародною участю, 11–13 вер. 2017 р. Мелітополь: ТДАТУ, 2017. С. 140–142.

300. Самойчук К.О., Паляничка Н.О. Підвищення ефективності діяльності молокопереробних підприємств за рахунок впровадження нових типів гомогенізаторів // Підвищення ефективності діяльності підприємств харчової та

переробної галузей АПК: матеріали V Всеукраїнської наук.–практ. конф., 17–18 лист. 2016 р. Київ: НУХТ, 2016. С. 210–211.

301. Самойчук К.О., Паляничка Н.О., Верхоланцева В.О. Гомогенізація жирової фази молока в пульсаційному апараті з ротором, що вібрує // Фундаментальні та прикладні дослідження у сучасній науці // збірник матер. IV наук. конф., 30 жовт. 2016 р. Харків: «Технологический центр», 2016. С. 86–87.

302. Самойчук К.О., Паляничка Н.П., Верхоланцева В.О., Левченко Л.В. Методика розрахунку потужності пульсаційного гомогенізатора молока // Modern methods, innovations and experience of practical application in the field of technical sciences: Conference proceedings: international research and practice conference, 27–28 grudzień 2017 р. Lublin : Izdevnieciba «Baltija Publishing», 2017. С. 176–179.

303. Самойчук К.О., Паляничка Н.О., Верхоланцева В.О., Левченко Л.В. Перспективи використання вібраційних гомогенізаторів молока // Вібрації в техніці та технологіях: збірник тез доповідей XVI міжнар. наук.–практ. конф., 26–27 жовт. 2017 р. Вінниця: ВНАУ, 2017. С. 36–38.

304. Самойчук К.О., Паляничка Н.О., Верхоланцева В.О., Янович В.П. Вібраційні гомогенізатори молока // Вібрації в техніці та технологіях. 2018. №1 (88). С. 77–82.

305. Самойчук К.О., Серков П.О., Ковальов О.О. Диспергатори заміників цільного молока // Праці Таврійського державного агротехнологічного університету: зб. наук. праць. Мелітополь: ТДАТУ, 2011. Вип. 11. Т.2. С. 119–125.

306. Сафонова Е. А. Разработка и исследование роторно-пульсационного аппарата при получении жидких комбинированных продуктов питания: дис. ... канд. техн. наук: 05.18.12. Кемерово, 2003. 146 с.

307. Семенов Г.А., Станчевский В.К., Панкова М.О. і інш. Організація і планування на підприємстві: навч. посіб. К.: Центр навчальної літератури, 2006. 528 с.

308. Симакова Ю.В., Дьячков А.Я. Использование электрогидравлического эффекта для гомогенизации // Научное обеспечение развития АПК в современных условиях: материалы Всероссийской научн.-практ. конф., 15-18 февраля 2011 г., Т.3. С. 172–175.

309. Соколова Т.В., Гущина И.М. Определение эффективности гомогенизации при помощи специальной пипетки // Молочная промышленность. 1972. №3. С. 12–13.

310. Спосіб гомогенізації та нормалізації молока: пат. на корисну модель 94048 Україна / Самойчук К.О., Ковальов О.О., Ялпачик Ф.Ю. № 201405343; заявл. 19.05.14; опубл. 27.10.14, Бюл. № 20. 4 с.

311. Струминний гомогенізатор молока з роздільною подачею вершків: пат. на корисну модель 94041 Україна / Самойчук К.О., Ковальов О.О., Ялпачик Ф.Ю. № 201405239; заявл. 19.05.14; опубл. 27.10.14, Бюл. № 20. 3 с.

312. Струминний гомогенізатор молока з роздільною подачею вершків: пат. на корисну модель 106522 Україна / Самойчук К.О., Дейниченко Г.В., Ковальов О.О. № 201511244; заявл. 16.11.15; опубл. 25.04.16, Бюл. № 8. 4 с.

313. Струминний гомогенізатор молока з роздільною подачею вершків: пат. на корисну модель 119871 Україна / Кюрчев В.М., Дейниченко Г.В., Самойчук К.О., Пацький І.Ю. № 201704300; заявл. 03.05.17; опубл. 10.10.17, Бюл. № 19. 5 с.

314. Струминний гомогенізатор молока з роздільною подачею вершків: пат. на корисну модель 122548 Україна / Кюрчев В.М., Самойчук К.О., Ковальов О.О., Пацький І.Ю. № 201708561; заявл. 21.08.17; опубл. 10.01.18, Бюл. № 1. 5 с.

315. Сурков В.Д. Закономерности гомогенизации в сфере равновесия центробежных и поверхностных сил // Труды МТИММПа. 1954. С. 85–92.

316. Сурков В.Д., Липатов Н.Н., Золотин Ю.П. Технологическое оборудование предприятий молочной промышленности. М.: Лёгкая и пищевая промышленность, 1983. 432 с.

317. Тарасенко Т.В. Дослідження кавітаційних явищ у дросельних пристроях // Промислова гідравліка і пневматика. 2013. № 1 (39). с. 38–46.

318. Теория статистики: под ред. Р.А. Шмойлова. 4–е изд. М: Финансы и статистика, 2004. 655 с.

319. Тепел А. Химия и физика молока и молочных продуктов. М.: Пищевая промышленность, 1979. 622 с.

320. Ткаченко А.Н. Кавитационные техника и технологи. К.: Техника, 2001. 462 с.

321. Фиалкова Е.А. Гидродинамические аспекты гипотезы Н.В. Барановского // Ползуновский альманах. 2006. №2. С. 156–159.

322. Фиалкова Е.А. Гомогенизация. Новый взгляд: монография–справочник. Спб.: ГИОРД, 2006. 392с.

323. Фиалкова Е.А. Межфазные взаимодействия в эмульсиях и суспензиях как основа интенсификации процессов молочной промышленности: автореф. ... дис. д-ра техн. наук: 05.18.12. Ставрополь, 2007. 50с.

324. Фиалкова Е.А. О парадоксах клапанных и роторных гомогенизаторов // Вестник Сев.-Кав. ГТУ. 2006. №3(7). С. 85–90.

325. Фиалкова Е.А., Куленко В.Г., Петрачков Б.В. Гидродинамические аспекты гипотезы Ребиндера и Виттига. // Новые технологии в производстве и переработке сельскохозяйственной продукции: сб. науч. трудов. Вологда-Молочное: ИЦ ВГМХА, 2005. С. 47–52.

326. Фурсова Т.П., Зобкова З.С., Зимин А.Ф. Определение рациональных режимов гомогенизации при производстве кисломолочных напитков со стабилизирующими добавками // Хранение и переработка сельхозсырья. 2001. №10. С. 24–26.

327. Хвостов А.А., Сумина Р.С., Котов Г.И., Иванов А.В. Стохастическая модель процесса гомогенизации молока с использованием цепи Маркова // Информационные технологии, моделирование и управление. №1, 2016. С. 39–44.

328. Хинце И.О. Турбулентность. М.: Мир, 1963. 679 с.

329. Ціхановська В.М. Стан та перспективи розвитку ринку молока та молочних продуктів України // Економіка. Управління. Інновації. 2016. №1 (16). URL: www.nbu.gov.ua.

330. Червяков В.М. Теоретические основы методов расчета роторных аппаратов с учетом нестационарных гидродинамических течений: автореф. ... дис. д-ра техн. наук: 05.02.13. Тамбов, 2007. 35 с.

331. Червяков В.М., Юдаев В.Ф. Гидродинамические и кавитационные явления в роторных аппаратах: монография. М.: Машиностроение-1, 2007. 128 с.

332. Чернец М., Лукасик К. Повышение износостойкости и долговечности элементов гомогенизаторов давления: монография. Дрогобыч: КОЛО, 2004. 268 с.

333. Чернюшок О.А. Удосконалення технології напоїв із сироватки молочної, обробленої електроіскровими розрядами: автореф. ... дис. канд. техн. наук: 05.18.04. К., 2015. 23 с.

334. Чичева-Филатова Л.В. Интенсификация технологических процессов, совмещенных с диспергированием, в роторных аппаратах: автореф. ... дис. док-ра техн. наук: 05.18.126. М., 2006. 20 с.

335. Шершенков Б.С., Сучкова Е.П., Лаптева Н.Г. Ультразвуковая подготовка как инструмент для повышения производственных показателей восстановленного обезжиренного молока // Вестник Новгородского государственного университета. 2015. № 86, Ч. 1. с. 37–40.

336. Шестаков С.Д. Методика оптимизации процесса кавитационной дезинтеграции для обработки жидких пищевых сред // Хранение и переработка сельхозсырья. 2001. №10. С. 31–35.

337. Шестаков С.Д., Красуля О.Н., Ринк Р., Ашоккумар М. Ультразвуковая обработка молочных систем для улучшения их свойств // Техническая акустика. 2013. 7. URL: www.ejta.org/ru/shestakov5rus.

338. Шкарупа В.Ф. Товарознавство продовольчих товарів. Продукти тваринного походження: Київський національний торговельно-економічний університет. К.: [Б.в.], 2004. 288 с.

339. Эвд Хувел, Фредриксен Й. Эффективная гомогенизация – высокое качество при низком давлении // Пищевая промышленность. 2013. № 5. С. 60.

340. Эмульсии. / Под ред. Ф. Шермана. пер. с англ. под ред. А.А. Абрамзона. Л.: Химия, 1972. 448 с.

341. Юдаев В.Ф., Колач С. Т. Течение вязкой жидкости через щель клапанного гомогенизатора / Технологии 21 века в пищевой, перерабатывающей и легкой промышленности. М. 2012. № 6–1.

342. Юдаев В.Ф., Чичева-Флатова Л.В., Алексеев В.А. Площадь проходного сечения диафрагмы модулятора роторного аппарата // Изв. ВУЗов. Машиностроение. 2004. № 11. С. 35–39.

343. Юрченко Б.В. Механізм дроблення частиц в каналах гомогенізатора / Труды Одесского политехнического института, 2007. Вып. 1 (27). С. 219–223.

344. Якубчак О.М. Фізичні та біохімічні властивості // Молочное дело: 2005. №12. С. 36–37.

345. Ялпачик В.Ф., Буденко С.Ф., Ялпачик Ф.Ю., Гвоздев О.В., Циб В.Г., Бойко В.С., Самойчук К.О., Олексієнко О.В., Клевцова Т.О., Паляничка Н.О. Розрахунки обладнання харчових виробництв: навч. посібник. Мелітополь: Видавничий будинок ММД, 2014. 264 с.

346. Ялпачик В.Ф., Олексієнко В.О., Ялпачик Ф.Ю., Самойчук К.О., Гвоздев О.В., Циб В.Г., Паляничка Н.О., Шевченко В.І., Борхаленко Ю.О., Буденко С.Ф. Машини, обладнання та їх використання при переробці сільськогосподарської продукції: навч. посібник. Мелітополь: Видавничий будинок ММД, 2015. 196 с.

347. Яценко І.В., Бондаревський М.К., Кам'янський В.В. і ін. Ветеринарно-санітарна експертиза молока та молочних продуктів в Україні: Теоретична частина та лабораторний практикум . Харків, 2012. 319 с.