

Міністерство освіти і науки України
Вінницький національний аграрний університет
Факультет механізації сільського господарства

ЗАТВЕРДЖУЮ
Завідуючий кафедри ПОПХВ, д.т.н.,
проф.
_____ І.П.Паламарчук
“_____” _____ 2016 р.

Пояснювальна записка
до магістерської кваліфікаційної роботи за спеціальністю
8.05050313 – «Обладнання переробних та харчових виробництв»
на тему: «Обґрунтування конструктивно-технологічних
параметрів гідродинамічного кавітатора для обробки
молока»

Виконав: студент групи 61МПмаг

Мазур Микола Васильович

Науковий керівник:

д.т.н. проф. Бурдо О.Г

2016

ЗМІСТ

АНОТАЦІЯ.....	5
ВСТУП.....	6
1 СТАН ПИТАННЯ ТА ЗАВДАННЯ ДОСЛІДЖЕНЬ.....	7
1.1 Вплив використання кавітаційних пристроїв в харчовій і переробній промисловості.....	7
1.2 Аналіз конструкцій кавітаційних пристроїв для обробки технологічних середовищ харчових виробництв.....	12
1.3 Класифікація кавітаційних пристроїв для обробки технологічних середовищ.....	18
1.4 Мета та завдання досліджень.....	22
2 ТЕОРЕТИЧНІ ДОСЛІДЖЕННЯ ПРОЦЕСУ КАВІТАЦІЙНОЇ ОБРОБКИ ТЕХНОЛОГІЧНИХ СЕРЕДОВИЩ.....	23
2.1 Теоретичні основи гідродинамічної кавітації.....	23
2.2 Визначення основних параметрів гідродинамічного кавітатора.....	26
2.3 Методика інженерного розрахунку гідродинамічного кавітатора....	31
Висновки по розділу.....	33
3 ПРОГРАМА І МЕТОДИКА ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНИХ ДОСЛІДЖЕНЬ.....	35
3.1 Програма експериментальних досліджень.....	35
3.2 Методика проведення експериментальних досліджень.....	35

3.2.1	Методика проведення повнофакторного експерименту.....	35
3.2.2	Методика визначення якості гомогенізації молока.....	39
3.3	Розробка експериментальної установки для дослідження процесу кавітаційної обробки технологічних середовищ.....	44
	Висновки по розділу.....	47
	ВИСНОВКИ.....	49
	СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ.....	51

АНОТАЦІЯ

Мазур М.В. Обґрунтування конструктивно-технологічних параметрів гідродинамічного кавітатора для обробки молока.

Магістерська робота присвячена питанням дослідження інтенсифікації технологічного процесу гомогенізації молока методом кавітації. Проведено аналіз конструкцій та класифікацію кавітаційних пристроїв, описано теоретичні дослідження процесу кавітаційної обробки харчових продуктів. Запропоновано програму та методику проведення експериментальних досліджень. Встановлено вплив конструктивних параметрів гідродинамічного кавітатора на ефективність кавітаційного оброблення молока.

Ключові слова: молоко, кавітація, моделювання, технологія.

ANNOTATION

Mazur N.V. A ground of structurally-technological parameters of hydrodynamic кавітатора is for treatment of milk.

Master's degree work is sanctified to the questions of research of intensification of technological process of homogenization of milk by the method of cavity. The analysis of constructions and classification of cavitations are conducted built on, theoretical researches of process of cavitations treatment of food products are described. The program and methodology of realization of experimental researches offer. Influence of structural parameters of hydrodynamic cavity is set on efficiency of cavitations treatment of milk.

Keywords: milk, cavitation, design, technology.

ВСТУП

Збільшення обсягу виробництва молочних продуктів, що мають високу харчову і біологічну цінність – одне з важливих завдань агропромислового комплексу України. Харчова цінність молока полягає в тому, що воно містить усі необхідні для людського організму харчові речовини (білки, жири, мінеральні речовини, вітаміни) у добре збалансованому співвідношенні в легко засвоюваній формі.

Молоко є неоднорідною біологічною рідиною, полідисперсною системою, де окремі компоненти знаходяться на різних ступенях дроблення.

У сучасних технологічних процесах виробництва молочної продукції одним з нормативних є гомогенізація. Цей процес представляє собою подрібнення жирових кульок молока або молочного продукту (дисперсна фаза) та одночасний рівномірний їх розподіл у плазмі молочного продукту. Гомогенізація використовується як для обробки сировини молочної промисловості: незбираного або знежиреного молока та вершків, яку планується направити на подальшу обробку, так і для обробки кінцевого молочного продукту. Мета гомогенізації – механічна стабілізація дисперсної фази, для перешкоджання процесам розділення фаз тобто утворення відстою вершків на поверхні продукту. Процес цей для молочної промисловості вкрай небажаний, а у деяких її галузях – навіть неприпустимий. При розшаруванні продукту зростає швидкість його скисання, погіршуються (або припиняються) тривалі процеси дозрівання та ферментації при виробництві кисломолочної продукції, зменшуються строки зберігання отриманого продукту, що особливо важливо при зберіганні молочних консервів.

Отже роль гомогенізації дуже важлива в молочній промисловості, адже після неї зменшується діаметр жирової кульки та час з'явлення відстою вершків збільшується.

1 СТАН ПИТАННЯ ТА ЗАДАЧІ ДОСЛІДЖЕННЯ

1.1 Вплив використання кавітаційних пристроїв у харчовій і переробній промисловості

У склад молока входить до 250 основних компонентів. У тому числі 20 амінокислот білків, 25 основних карбонових кислот, кілька видів молочного цукру, 45 мінеральних речовин, 25 вітамінів, значна кількість важливих для обміну речовин ферментів і гормонів, а також імунні тіла, пігменти, фосфати, стерини.

Молоко є неоднорідною біологічною рідиною, полідисперсною системою, де окремі компоненти знаходяться на різних ступенях дроблення.

Молочний жир – компонент за кількістю якого, на сьогоднішній день оцінюють якість і вартість молока. Молочний жир знаходиться в молоці у вигляді дрібних крапель (кульок жиру), оточених захисними плівками і являє собою емульсію жиру у воді. У 1 мл молока до 3 млрд. жирових кульок з коливанням від 1 до 12 млрд. Діаметр кульок дорівнює 3...4 мкм, коливання від 0,1 до 20 мкм. Від розмірів жирових кульок залежить ступінь переходу жиру в продукт при виробництві вершків, масла, сиру і т.д.

Емульсія кульок жиру в молоці достатньо стійка. Охолодження молока, механічний вплив насосів, мішалок, нагрівання до відносно високих температур незначно змінюють склад, фізико-хімічні властивості оболонки кульок жиру, не порушуючи при цьому стабільності жирової емульсії [1].

Механічні впливи при відцентровому очищенні молока, сепаруванні, перекачуванні, перемішуванні і гомогенізації в основному супроводжується змінами ступеня дисперсності і стабільності жирової фази. В залежності від конструкції апаратів і умов їх роботи на них, а також від температури і кислотності молока при його механічній обробці можливе дроблення великих

кульок чи жиру, навпаки, агрегація, скупчення кульок і навіть їхнє злиття внаслідок дестабілізації жирової емульсії. При механічній обробці може утворюватися піна, що знижує стійкість низькодисперсних фаз молока (жиру і білків). Кількість піни залежить від властивостей і температури молока, конструкції обладнання і т.д. Фізико-хімічні властивості молока змінюються незначно. Виключення складає в'язкість молока, що після гомогенізації підвищується.

Гомогенізація молока і вершків підвищує стабільність жирової емульсії молока і молочних продуктів, поліпшує їхню консистенцію і смак, а також сприяє кращій перетравності молочного жиру організмом людини. У результаті гомогенізації утворюються однорідні по величині (діаметром близько 1 мкм) кульки жиру. Ступінь диспергування жиру залежить від температури і тиску гомогенізації.

У молоці після обробки не відбувається скупчень кульок жиру і практично не спостерігається відстою вершків. Однак у гомогенізованих вершках можуть утворюватися агрегати і скупчення кульок жиру, що можна пояснити в такий спосіб: у процесі гомогенізації різко збільшується загальна площа поверхні кульок жиру і відбувається зміна складу оболонок. Нативних оболонкових компонентів недостатньо для того, щоб покрити зрослою поверхню кульок жиру. Тому дефіцит оболонкових речовин компенсується за рахунок адсорбування білків молочної плазми – казеїну і сироваткових білків. Отже, у гомогенізованих молоці і вершках формуються нові оболонки кульок жиру з нативних оболонкових компонентів, казеїну і сироваткових білків.

Таким чином, щоб підвищити якість молока та термін зберігання до його переробки, доцільно гомогенізувати сировину використовуючи кавітаційні пристрої.

Кавітація – фізичне явище, яке утворюється місцевим порушенням суцільності течії з виникненням парових і газових бульбашок (каверн), що

зумовлюються місцевим зниженням тиску і підвищенням швидкості в потоці рідини. Перемішуюча, диспергує, гомогенізує, а також ерозійна дія кавітації є наслідком значної кількості одиничних силових впливів колапсу-ючих кавітаційних порожнин (або бульбашок), енергетичний потенціал яких надзвичайно високий. Кавітаційні порожнини – каверни або бульбашки - виникають в тих місцях, де тиск в рідині стає нижче певного критичного. При зниженні тиску за рахунок збільшення локальних швидкостей рідинного потоку виникає кавітація, яка називається гідродинамічною. Якщо зниження тиску обумовлене проходженням акустичних хвиль звукового або ультразвукового спектру частот коливань – кавітація вважається акустичною.

Процес кавітаційної дії пов'язаний, в основному, з утворенням мікрострумків високого енергетичного потенціалу, які виникають в заключній стадії захлопування кавітаційних бульбашок і впливають на поверхню розподілу фаз. Захлопування бульбашок на границі розподілу фаз "рідина - тверді частинки" супроводжується диспергуванням цих частинок в рідині з утворенням суспензії, а в системі "рідина - рідина" – диспергуванням однієї рідини в іншій з утворенням емульсії. В обох випадках відбувається руйнування границі розподілу фаз, тобто її ерозія, і утворення гомогенної суміші.

Після кавітаційної обробки молока і вершків переважний діаметр жирових кульок становив 1,5-2,0 мкм, зменшився відстій жиру, підвищилась відносна в'язкість продукту.

Емульсії тваринних жирів, одержані за допомогою ультразвукових пристроїв, містять більше 96% жирних кульок розміром до 2 мкм, не розшаровуються протягом трьох місяців і використовуються при виробництві ковбас [8].

В хлібопекарній промисловості ультразвукові пристрої використовуються при одержанні стійких емульсій для цукрового печива [9], дрібнодисперсних жирових емульсій для хлібобулочних виробів [6]. інтенсифікації приготування

рідкої фази при двофазному тістоприготуванні. Встановлено, що кавітаційне диспергування дріжджів на 15-18% підвищує їх бродильну енергію і ферментативну активність, збільшує на 45-60% вихід ергостерону [6], час бродіння скорочується з 3,5 годин до 1,5-2 годин, а кількість дріжджових клітин збільшується в 1,5 рази. Приготування жирових емульсій для змащування хлібопекарних листів і форм на 50-70% скорочує витрати жиру без погіршення якості виробів [6].

Позитивні результати одержані при використанні ультразвукової ка-вітації в виробництві кондитерських виробів [6].

Використання ультразвукового диспергування сировини в виробництві соків дозволило майже на 30% скоротити тривалість виробничого циклу, підвищити вихід соку і поліпшити його якість. При виробництві продуктів для дитячого харчування одержували суміш з переважним розміром частинок до 2 мкм [10].

Однак, впровадження технологій і обладнання з використанням ультразвуку майже в усіх галузях промисловості [13, 14] загальмувало використання гідродинамічної кавітації для обробки харчових середовищ. В той же час, гідродинамічні кавітаційні пристрої мають в порівнянні з ультразвуковими суттєві переваги.

Використовувати гідродинамічну кавітацію для одержання ефектів хімічного, фізико-хімічного і колоїдного характеру було вперше запропоноване в роботах [15]. Було одержане молоко з вмістом жирових кульок розміром до 1 мкм - 75,6% [14].

Застосування гідродинамічних пристроїв роторного типу в м'ясній промисловості для одержання емульсій тваринних жирів дозволяє одержувати не тільки з переважним вмістом дрібнодисперсної фази з розмірами до 2,5 мкм, але і зменшити питомі витрати енергії майже в 3 рази [8].

Гідродинамічні кавітаційні пристрої використовуються в деяких технологічних процесах хлібопекарної і кондитерської промисловості, наприклад,

при приготуванні напівфабрикатів з борошна. Кавітаційний змішувач [16] для обробки кондитерських сумішей дозволяє диспергувати компоненти суміші з її одночасним аеруванням. Обробка кукурудзяної кашки в гідродинамічному пристрої для вивільнення зв'язаного крохмалю дозволила збільшити його вихід на 0,3% завдяки підвищенню інтенсивності оброблення [4, 5].

Для оброблення рідких і пуреподібних фруктових і овочевих продуктів використовується апарат РЗ-КІК [17], який дозволяє подрібнювати частинки м'якоті до 20-30 мкм при продуктивності до 10 т/год і питомих енерговитратах до 2.2 кВт-год/т. Його використання при обробленні консервів дитячого харчування дає позитивний ефект в порівнянні з традиційними методами: в готовому продукті кількість частинок м'якоті з розмірами 50-90 мкм збільшилась до 50% [18]. Процес оброблення відбувається ефективніше при додатковій дії гідродинамічної кавітації на середовище за допомогою динамічного кавітатора, що дозволяє подрібнювати частки м'якоті до 5 мкм, підвищити вихід соку на 10-15%, зменшити питомі витрати енергії на 16-20% [19, 20]. Обробка рослинної сировини за допомогою гідродинамічної кавітації дозволяє одержувати продукти з певним дисперсним складом; при цьому майже повністю зберігаються вітаміни, амінокислоти і інші поживні речовини, скорочуються і спрощуються деякі технологічні процеси, наприклад, - виробництво пектину [21, 22].

Позитивні результати дало використання гідродинамічного кавітаційного оброблення дифузійного соку при попередній дефекації в цукровій промисловості, а також в супутніх операціях, наприклад, активації вапняної суспензії [23, 24].

Аналіз наявної науково-технічної інформації, а також досвід використання кавітаційних пристроїв в харчовій промисловості, дозволяє стверджувати, що з усіх відомих видів гідромеханічної дії на оброблювані середовища, кавітаційна дія найбільш ефективна. В останні роки саме така обробка харчових середовищ стала основою розвитку цілого напрямку в промисловості [25-27]. Але те що

більшість робіт має переважно якісний характер, свідчить про необхідність продовження і поглиблення досліджень.

1.2 Аналіз конструкцій кавітаційних пристроїв для обробки технологічних середовищ харчових виробництв

Вже відмічалось, що в залежності від способу збудження, кавітація буває акустичною (або ультразвуковою) і гідродинамічною, механізм дії яких на оброблюване середовище практично однаковий [13].

До акустичних кавітаційних пристроїв відносяться джерела акустичних коливань переважно ультразвукового спектру частот, тому їх ще називають ультразвуковими (УЗ) пристроями В пластинчастих УЗ пристроях типу УГС струмись середовища, яке оброблюється, витікає з великою швидкістю з щілиноподібного сопла і вдаряє в гострі кромки консольної металевої пластини, встановленої напроти нього. Зриваючись з пластини, струмись утворює вихорі (т.з. "дорожку Кармана"), які періодично слідуєть один за одним. Підбираючи швидкість струменя і відстань від сопла до кромки пластини, досягають ефекту, коли частота відриву вихорів відповідає резонансній частоті коливань пластини. При таких умовах пластини починає випромінювати акустичні коливання в середовище. Продуктивність УЗ пристроїв типу УГС від 3 до 10 м³/год, споживна потужність - до 6 кВт/год [11, 12, 28].

В гідродинамічних апаратах роторного типу ГАРТ акустичні коливання утворюєтья за рахунок періодичного перекриття пазів в статорі зубцями ротору, що обертаєтья. ГАРТ використовують для обробки відносно в'язких рідин, твердих і волокнистих матеріалів. Продуктивність таких пристроїв - 2,5-40 м³/год, споживна потужність від 3 до 40 кВт/год [12].

В роторно-пульсаційних апаратах (РПА) і роторних апаратах з модуляцією потоку (РАМП) в процесі обробки поєднуютья різні способи дії

на середовище за рахунок конструктивних особливостей пристроїв. РПА складається з двох (або більше) роторів у вигляді коаксіальних циліндрів щілиноподібними отворами. При обертанні однієї групи циліндрів відносно другої, отвори всіх циліндрів періодично не співпадають, перекриваючи потік рідини, яка проходить через пристрій. Внаслідок цього виникає ефективна турбулізація і пульсації потоку середовища, які супроводжуються кавітаційними ефектами. Основними вузлами РАМП є порожнистий ротор який розміщено в корпусі і статор з отворами. В порожнину ротора, що постійно обертається середовище надходить через патрубок і під дією зовнішнього тиску та відцентрових сил витікає в акустичну камеру крізь співпадаючі отвори в роторі і статорі, де піддається багатofакторному впливу. Продуктивність серійних РАМП - до 12 м³/год, потужність електродвигуна - 4 кВт [28].

Найбільший інтерес привертають гідродинамічні (ГД) кавітаційні пристрої, в яких в потоці оброблюваної рідини утворюється місцеве просторове зниження тиску і розвивається гідродинамічна кавітація при різкій зміні геометрії течії рідини. Енергія для збудження кавітації підводиться безпосередньо технологічним потоком рідини (ГД пристрої статичного типу), або кавітатором, який обертається (ГД пристрої динамічного типу).

Конструкції таких пристроїв – змішувачів, реакторів, диспергаторів, гомогенізаторів – різні і визначаються технологічними умовами оброблення [29,30].

Ультразвукові пристрої для обробки технологічних середовищ, незважаючи на різноманітність конструкцій і поширеність в технологічних операціях, мають суттєві для харчової промисловості недоліки:

1. Кавітаційна зона в таких пристроях локалізується поблизу випромінювача або зубців ротора і перешкоджає розвитку кавітації в усьому об'ємі середовища. Це приводить до нерівномірного оброблення

компонентів.

2. Вібрація робочих вузлів ГД пристроїв викликає їх втомлювальне руйнування, а захопування кавітаційних бульбашок на поверхні робочих вузлів пристроїв (пластинах-випромінювачах, зубцях роторів) викликає їх кавітаційну ерозію, що небажано.

3. В розглянутих пристроях неможливо регулювати розміри і кількість кавітаційних бульбашок, які спричиняють визначальний вплив на ефективність кавітаційної обробки [4, 26].

4. Акустичні коливання швидко згасають в системі "рідина-тверде тіло", тобто в суспензіях, якими є дисперсії рослинної сировини, ЗЦМ, ін.[17].

5. Наявність ротора, що обертається, потребує особливої уваги до герметичності ущільнень і контролю величини зазору, який становить 2 мм в ГАРТ і 1-1,5 мм в РПА [22].

До ГД пристроїв, в яких зміна геометрії течії середовища створюється за рахунок зміни форми проточної робочої камери, відносять пристрої з робочими вузлами у вигляді труб Вентурі та струмникові. Труба Вентурі є класичним і добре дослідженим пристроєм для генерації кавітаційного режиму течії середовища і конструктивно містить звужуючу частину – конфузор, вузьку горловину з критичним перетином та частину, що розширюється – дифузор. Прозорі труби Вентурі дозволяють безпосередньо спостерігати і досліджувати ГД кавітацію [13, 43]. При проходженні рідини крізь трубу Вентурі, в критичному перетині горловини утворюється кільцева кавітаційна каверна, яка поступово збільшується, виходить в дифузор і розпадається (захоплюється) з утворенням поля кавітаційних бульбашок. Причому, при різних ГД умовах і різних кутах розкриття дифузорів, кавітаційні каверни можуть захоплюватись не тільки на границі горловини з дифузором, але і в потоці за пристроєм. Імпульс тиску, що виникає при схлопуванні каверни в потоці, набагато перевищує тиск на вході. Пульсації тиску, які виникають при цьому, додатково інтенсифікують оброблення

середовища [43]. Це, а також простота і надійність, відносяться до переваг таких пристроїв. Відомі пристрої і технологічні установки різного призначення з робочими вузлами у вигляді труби Вентурі [43-45]. Однак, вони мають певні недоліки, які обмежують діапазон їх застосування:

1. Неможливість регулювання ГД характеристик кавітаційної зони (тобто "кавітаційного поля") і, отже, ефективності обробки. Це пов'язано з тим, що витрати середовища не залежать від зміни тиску за трубою Вентурі і швидкість середовища визначається лише різницею тисків на вході в пристрій і в кавітаційній порожнині, а також фізико-хімічними властивостями середовища [43].

2. Труднощі при регулюванні частоти і амплітуди пульсацій при сталих витратах середовища [20].

3. Поступове зниження ефективності обробки при багаторазовому проходженні середовища через пристрій. Це зв'язано з тим, що процес утворення кавітаційних каверн знижується при дегазації рідини [46].

4. Кавітаційна ерозія ГД пристрою через захлопування кавітаційних каверн на стінках дифузору [20].

Іншим способом зміни геометрії течії технологічного середовища є розміщення в потоці рідини (або в проточній робочій камері) кавітаторів, які можуть бути динамічними або статичними.

В пристроях з динамічними кавітаторами енергія, яка необхідна для створення кавітації, підводиться безпосередньо кавітатором, що обертається, крильчаткою. В кавітаційному режимі можуть працювати всі високо-обертові механічні мішалки, але якість обробки знижується через зменшення подачі і зниження циркуляційної швидкості [47]. Цей недолік усувається з впровадженням суперкавітуючих (СК) гвинтів, лопаті яких мають гостру передню і тупу задню кромки [47], через що СК гвинти були запропоновані як робочий орган ГД кавітаційного пристрою і одночасно осьового СК насоса

в циркуляційному контурі [4, 31]. ГД пристрій (рис. 1.1) має завантажувальну камеру 1, осьовий насос 2, робочу камеру 3. Кавітаторами служать лопаті СК насоса. При їх обертанні з засмоктуючого боку утворюються каверни з фіксованою лінією відриву. В хвостовій частині каверни, в зоні її замикання, виникають кавітаційні бульбашки (кавітаційне поле), які захоплюються в проточній робочій камері 3 і обробляють середовище [31, 32]. Суттєвим недоліком пристроїв такого типу є високі вимоги до точності виготовлення СК гвинтів, адже зміна кута лопаті гвинта лише на $1,0-1,5^\circ$ суттєво змінює гідродинамічні характеристики насоса [33]. Крім того, пристрої такого типу мають обмежені можливості регулювання режимних параметрів кавітаційної дії на середовище через те, що вони працюють з досить високими кавітаційними характеристиками, малим к.к.д. В той же час, високообертові мішалки мають невисоку продуктивність, підвищені витрати енергії і не завжди зручні при обробці харчових середовищ. Такі недоліки суттєво обмежують використання мигалок які працюють в кавітаційному режимі, і СК насосів.

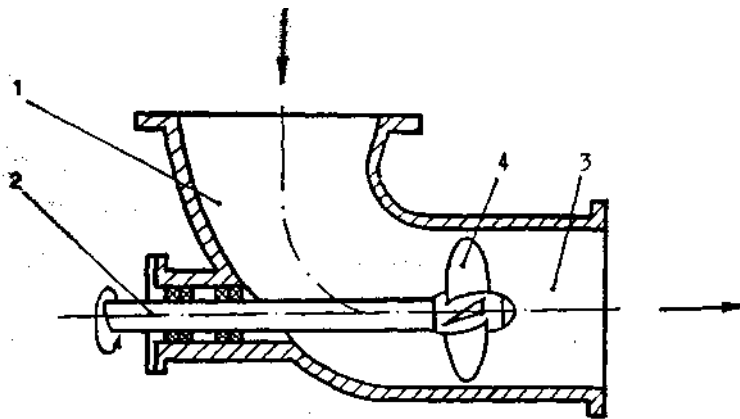


Рисунок 1.1 – СК диспергатор [32]: 1 – завантажувальна камера; 2 – осьовий СК насос; 3 – робоча камера ; 4 – лопаті СК насоса.

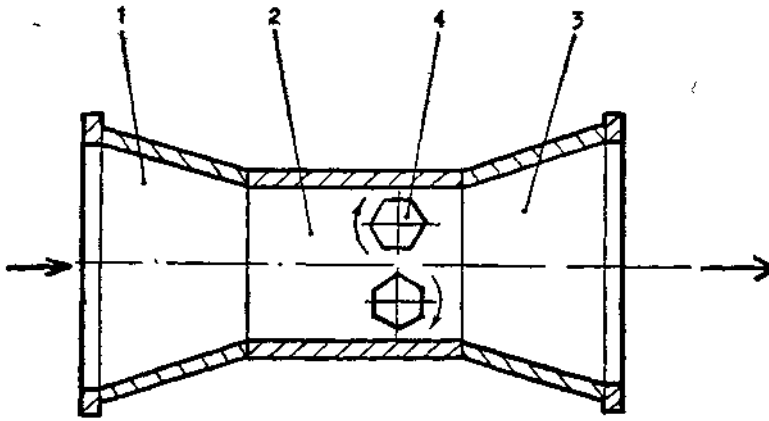


Рисунок 1.2 – Гідродинамічний кавітаційний реактор [38]: 1 – конфузор; 2 – робоча камера; 3 – дифузор; 4 – кавітатор. Робоча камера прямокутної форми, кавітатор у вигляді стержнів.

Значно спрощує конструкцію пристрою і розширює його технологічні можливості використання СК гвинта (або СК крильчатки) з індивідуальним приводом безпосередньо в робочій камері пристрою. Подачу середовища і необхідний швидкісний напір забезпечують насосом [29, 30]. Процес кавітаційного оброблення інтенсифікується створенням додаткових пульсацій потоку за рахунок його перекриття до СК крильчатки [34], в зоні утворення кавітаційної каверни [35], або роздільною подачею компонентів для обробки [36].

Інші технологічні можливості набуває ГД кавітаційний пристрій, якщо СК крильчатку закріпити в ньому нерухомо. Пристрої такого типу відносять до статичних, характерною особливістю яких є висока технологічна надійність, відносна простота конструкції, низькі питомі витрати енергії на обробку приблизно вдвічі менше, ніж в динамічних [4,37], але СК – крильчатка досить складна у виготовленні.

В найпростішому конструктивному випадку ГД кавітаційний пристрій статичного типу являє собою послідовно розміщені конфузор 1 (рис. 1.2), проточну робочу камеру 2, дифузор 3. В камері 2 встановлений кавітатор 4, який утворює локальне звуження в камері 2. Середовище подається на

обробку через конфузор 1, перетікає в робочу камеру 2 і натікає на кавітатор 4, за яким утворюється розрив суцільності середовища і виникає кавітаційна каверна і кавітаційні бульбашки. Поток середовища вони виносяться в зону підвищеного тиску і захоплюються, спричиняючи механічну ударно-хвильову дію на середовище. В дифузори 3 швидкість потоку знижується до початкової.

Різноманітність конструкцій існуючих ГД кавітаційних пристроїв не дозволяє розглянути їх детально, через що обмежимося аналізом окремих з них - з характерними конструктивними особливостями.

Відомі ГД кавітаційні пристрої статичного типу відрізняються, головним чином, формою робочої камери, конструкцією кавітатора і його розмірами відносно розмірів робочої камери.

Форма проточної робочої камери може бути прямокутною [38, 39], профільованою [40], але найчастіше – циліндричною.

Найбільш поширені кавітатори у вигляді циліндричних або еліптичних стержнів, СК крильчаток, дисків, тіл обертання (конусів, сфер). Причому, стержні встановлюють переважно в робочих камерах прямокутної форми. Інтенсивність кавітаційного поля і, отже, – ефективність оброблення, регулюється зміною геометричних характеристик і місця розташування кавітатора, накладенням пульсацій як зовнішніх, так і за рахунок виготовлення кавітатора з пружного матеріалу, підводом стисненого повітря в кавітаційну порожнину, ін. Лопаті крильчаток обладнують механізмом зміни кута нахилу [40], перфорують [41]: кут клиноподібного кавітатора змінюють підводом стисненого повітря в порожнину в середині кавітатора [42], а кут конусоподібного кавітатора – за допомогою пружини в кавітаторі. В кавітатор у вигляді зрізаного конуса, який розміщений співвсно робочій камері, переміщують по її довжині, змінюючи місце розташування кавітатора відносно дифузора.

Очевидно, що в порівнянні з усіма проаналізованими конструкціями пристроїв ГД кавітаційні пристрої статичного типу найбільш конструктивно прості технологічні у виготовленні зручні і надійні в користуванні.

Підсумовуючи наведені відомості, треба відмітити, що висока ефективність кавітаційної дії на середовище дозволяє одержувати продукти високої якості, досягнення якої в інших типах технологічного обладнання пов'язане з значними енергетичними витратами, або взагалі неможливе інтенсивність кавітаційного поля, що утворюється в ГД пристроях, спричиняючи ефективний механічний вплив на середовище, в першу чергу перемішує і диспергує його компоненти. Саме для виконання зазначених технологічних операцій розроблені майже всі кавітаційні пристрої, що вимагає виділення кавітаційних пристроїв в окрему групу обладнання.

Відома лише одна класифікація, де в явному виді виділена група кавітаційних пристроїв. Але відсутність чіткої класифікації цієї групи пристроїв не дозволяє правильно визначитись при виборі конструкції пристрою для конкретного технологічного процесу.

1.3 Класифікація кавітаційних пристроїв для обробки технологічних середовищ.

У відповідності з задачею досліджень і на підставі аналізу науково-технічної інформації розроблена класифікація кавітаційних пристроїв для обробки технологічних середовищ. В зв'язку з тим, що оброблення в зазначених пристроях відбувається під дією кавітації, яка цілеспрямовано створюється в технологічному середовищі, в основу класифікації покладений спосіб її збудження. При такому підході всі відомі конструкції кавітаційних

пристроїв для обробки середовищ розподіляються на чотири групи. Класифікація представлена на рис.1.3.

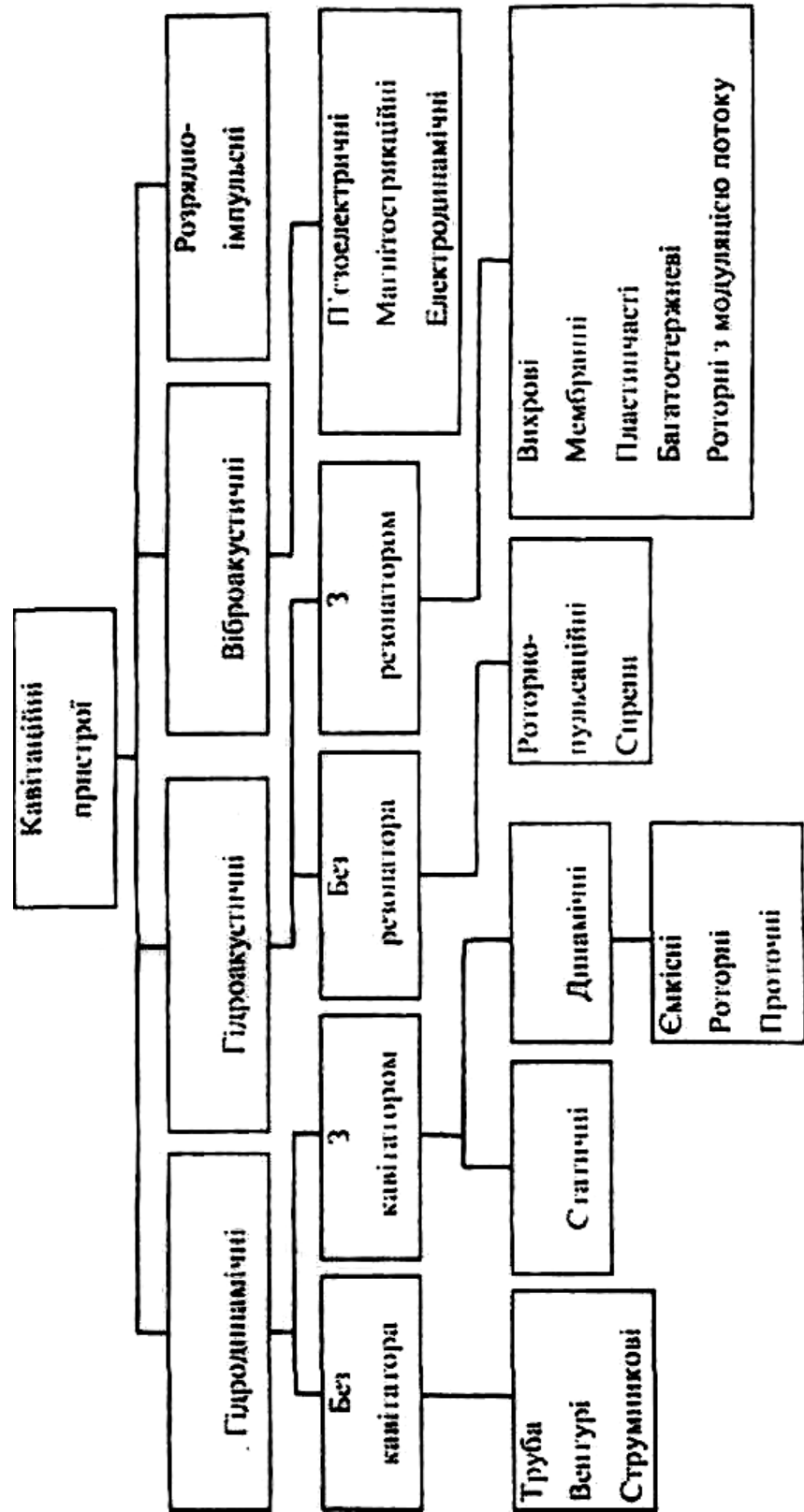
До першої групи належать пристрої, в яких кавітація утворюється гідродинамічним шляхом за рахунок різкої зміни геометрії течії. Внаслідок цього в потоці середовища виникає місцеве зниження тиску і розвивається гідродинамічна кавітація. Зміна геометрії течії досягається вибором форми проточної робочої камери пристрою або розміщенням в потоці тіл обтікання – кавітаторів. Енергія, яка необхідна для збудження кавітації, підводиться потоком рідини (статичні пристрої), або кавітатором, що обертається (динамічні пристрої). Вони відрізняються відносною простотою, надійністю, зручністю в користуванні, високою продуктивністю (до 100 м³/год) і широкими технологічними можливостями.

До другої групи належать пристрої, в яких кавітація генерується при періодичній зміні тиску рідини гідродинамічним шляхом. Пристрої цієї групи найбільш поширені в харчовій, переробній і фармацевтичній промисловості. Вони конструктивно прості, але їх продуктивність не перевищує 50м³/год. Це серійні проточні пристрої – гідродинамічні випромінювачі проточного типу УГС, а також роторного типу ГАРТ, РПА, РАМП.

Третя група кавітаційних пристроїв об'єднує апарати, в яких кавітація утворюється шляхом пульсацій тиску від коливань акустичного випромінювача в УЗ спектрі частот. Пристрої цієї групи першими з кавітаційних апаратів почали використовуватись в харчовій промисловості. З серійних УЗ пристроїв найбільш поширеними є УЗ ванни (УЗВ). УЗ прохідні хімічні апарати проточного типу (УПХА). УЗ ванни високого тиску (УЗВТ). Недоліком зазначених пристроїв є низька продуктивність (до 30 м/год) і необхідність використання складного і коштовного обладнання – УЗ генераторів. Таке обладнання в харчовій промисловості вже не використовується, а в фармацевтичній – має обмежене застосування.

До четвертої групи віднесені пристрої, які базуються на використанні "ефекту Юткіна" – високовольтного розряду в рідині. Внаслідок електропробою в рідині, в зоні, яка оточує канал розряду, розвиваються високі імпульсні тиски, що генерують локальну кавітацію. Причому, кавітація виступає в ролі допоміжного фактора при обробленні середовища. Пристрої цієї групи не знайшли поширення в промисловості і серійно не випускаються. З одного боку це обумовлюється їх низькою продуктивністю, значними енерговитратами, складністю додаткового обладнання і підвищеними вимогами до умов експлуатації, з другого- забрудненням середовища продуктами електроерозійного руйнування електродів. В харчовій і переробній промисловості такі апарати не використовуються.

Найбільш конструктивно простими і зручними в використанні є гідродинамічні пристрої статичного типу, надійність і довговічність яких обумовлена відсутністю рухомих елементів. Простота конструкції дає їм переваги. При виборі кавітаційного пристрою в кожному конкретному випадку треба проводити відповідні техніко-економічні розрахунки. Треба зауважити, що пристрої гідродинамічного і гідроакустичного типів більш придатні для використання в безперервному виробництві, а віброакустичні – для приготування дрібних партій продукту.



1.4 Мета роботи і завдання досліджень

Як показує аналіз науково-технічної інформації, кавітаційні пристрої, що застосовуються в харчовій і переробній промисловості, мають суттєві переваги в порівнянні з іншим обладнанням, призначеним для виконання однакових з кавітаційними пристроями операцій. В промисловості ефективно експлуатуються гідродинамічні кавітаційні пристрої, найперспективнішими з яких є проточні пристрої статичного типу.

Мета роботи полягає в створенні високоефективного і надійного обладнання для кавітаційного оброблення молока на базі дослідження роботи гідродинамічних кавітаційних пристроїв вдосконалення їх конструкції і визначення впливу їх конструктивних особливостей на ефективність обробки.

У відповідності з метою досліджень і на підставі аналізу науково-технічної інформації магістерська робота спрямована на вирішення таких завдань:

1. Розробити класифікацію кавітаційних пристроїв і визначити можливі шляхи підвищення ефективності їх роботи.
2. Виконати теоретично дослідження процесу кавітаційної обробки молока та визначення основних параметрів гідродинамічних кавітаторів.
3. На підставі аналітичних та теоретичних досліджень розробити лабораторну установку для дослідження гідродинамічної обробки молока.
4. Провести експериментальні дослідження впливу конструктивно-технологічних параметрів гідродинамічного кавітатора на якість обробки молока.
5. Вибрати та обґрунтувати оптимальні режими та конструкцію установки для гідродинамічної обробки молока.

2 ТЕОРЕТИЧНІ ДОСЛІДЖЕННЯ ПРОЦЕСУ КАВІТАЦІЙНОЇ ОБРОБКИ ТЕХНОЛОГІЧНИХ СЕРЕДОВИЩ

2.1 Теоретичні основи гідродинамічної кавітації

В діапазоні стадій кавітації $\lambda=2,5...3,0$, що забезпечує найбільшу ударно-хвильову активність гідродинамічного кавітаційного поля [4,30,48] джерелом кавітаційних бульбашок є каверни які періодично відриваються від кавітатора або приєднаної каверни і переміщуються в потоці. Приєднані кавітаційні каверни спостерігаються в плоских і просторових кавітаційних течіях [50,51] їх характерною особливістю при відносно високих числах Re є пульсації хвостової частини каверни що заповнена піною (хаотичним скупченням бульбашок). Пульсації супроводжуються періодичними викидами піни [52].

За схемою Ефроса [50,52] в загальному випадку кавітаційна каверна має вигляд наведений на рис 2.1,а де P_1 - тиск рідини що тече на кавітатор; P_k - тиск в кавітаційній каверні; D_k -розмір кавітаційної каверни в місці її максимального розширення. Але в реальних умовах така схема неможлива через наявність викривлюючих факторів, наприклад через те що кавітатор встановлений в проточній робочій камері у вигляді каналу прямокутного або циліндричного перерізу.

Візуальні спостереження обтікання рідиною кавітаторів у вигляді тіл обертання дозволили виявити певні закономірності.

Експериментально встановлено, що для води і водних емульсій з вмістом дисперсної фази олії - до 5%, при $Re > 8,0 \cdot 10^{-4}$ і коефіцієнті стиснення потоку $k > 0,7$ в місці розміщення кавітатора спостерігається часткове замикання приєднаної кавітаційної каверни, при цьому стабільність каверни порушується, а ділянки замикання каверни стають джерелом додаткових кавітаційних бульбашок. Їх кількість в хвостовій частині каверни

різко збільшується і відбувається інтенсивне вихроутворення. Такі умови сприяють підвищеному перемішуючому і ударно-хвильовому впливу на середовище. Картина течії при таких умовах суттєво змінюється (рис. 2.1).

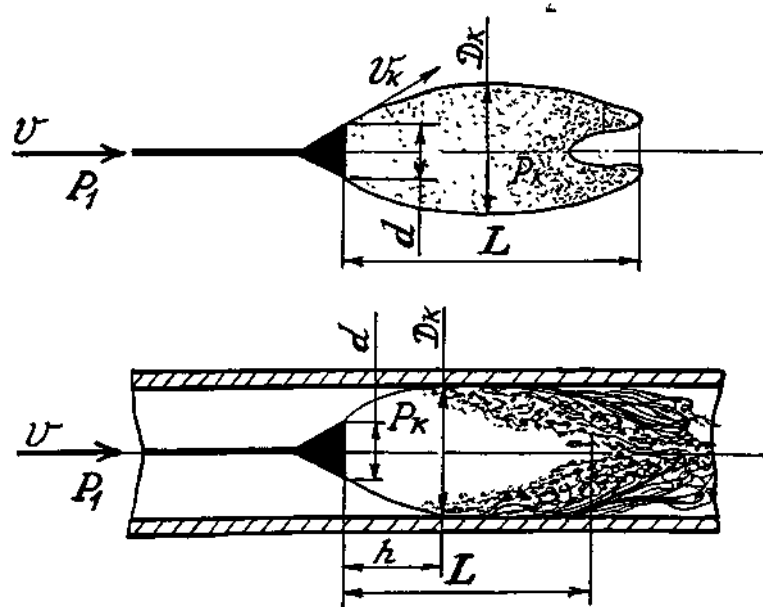


Рисунок 2.1 – Загальний вигляд приєднаної кавітаційної каверни: а- за ідеальною схемою, б- в реальних умовах.

Для певних значень Re і k можна передбачити залежність інтенсивності кавітаційної ерозії проточної камери від стадії кавітації λ і інших характеристик бульбашкового кавітаційного поля.

Припустимо, що при розпаді приєднаної кавітаційної каверни, що переміщується в потоці, сумарний об'єм спричинених цим розпадом кавітаційних бульбашок дорівнює середньому об'єму самої каверни. Нехтуючи кривизною бічної поверхні каверни, можна записати:

$$V_k = \frac{1}{3} h \cdot \pi \left(\frac{D_k^2 + D_2 + D_k \cdot D}{4} \right), \quad (2.1)$$

де D_k - діаметр каверни в місці її замикання в каналі робочої камери;

D - характерний розмір кавітатора (наприклад, діаметр основи конуса, сфери, ін.),

h - довжина кавітаційної каверни до місця її замикання.

Виразимо D через коефіцієнт стиснення потоку k :

$$D = k \cdot D_k, \quad (2.2)$$

Тоді:

$$V_k = \frac{\pi \cdot h}{12} \cdot D_k^2 \cdot (k^2 + k + 1). \quad (2.3)$$

Об'єм кавітаційної бульбашки становить:

$$V_o = \frac{\pi \cdot D_{cp}^3}{6}, \quad (2.4)$$

де D_{cp} - середній діаметр кавітаційної бульбашки.

У відповідності з прийнятим раніше припущенням з однієї кавітаційної каверни, що утворюється за кавітатором, при її розпаді виникає m кавітаційних бульбашок, тобто:

$$m = \frac{V_k}{V} = \frac{D_k^2 \cdot h \cdot (k^2 + k + 1)}{2D_{cp}^3}. \quad (2.5)$$

В той же час за одну секунду в потоці утворюється m кавітаційних бульбашок

$$m = \frac{D_k^2 \cdot h \cdot (k^2 + k + 1)}{2D_{cp}^3} \cdot f, \quad (2.6)$$

де f - частота відрива кавітаційної каверни від кавітатора.

Тоді об'ємна концентрація бульбашок (кількість бульбашок в одиниці об'єму середовища) в проточній камері становить:

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

де Q' - секундна витрата середовища через площу поперечного перегину S проточної камери з швидкістю v , тобто

$$Q' = v \cdot S = \frac{\pi \cdot v \cdot D_k^2}{4}, \quad (2.8)$$

З урахуванням Q' можна записати:

$$V = \frac{2h \cdot (k^2 + k + 1) \cdot f}{\pi D_{cp}^3 v} \quad (2.9)$$

Використовуючи залежність частоти відриву приєднаної кавітаційної каверни f , яка переміщується в потоці від характерного розміру кавітатора [53]:

$$f = Shv/D, \quad (2.10)$$

а також залежність:

$$Sh = 0,449 / \sqrt{\lambda^2 - 1}, \quad (2.11)$$

можна записати:

$$V = 0,143 \frac{\lambda(k^2 + k + 1)}{D \cdot D_{cp}^3 \cdot v \sqrt{\lambda^2 + 1}}. \quad (2.12)$$

2.2 Визначення основних параметрів гідродинамічного кавітатора

Основною умовою утворення бульбашкового кавітаційного поля полідисперсної структури є неузгоджений розпад різних за будовою і розмірами кавітаційних каверн. Ця умова конструктивно реалізується в пристроях з робочими вузлами у вигляді серії конусів-кавітаторів з різними кутами конусності або серії сопел-дифузорів з різними кутами розкриття [54,55] (рис 2.2, 2.3)

Змішувач (рис 2.2) [54,55] містить циліндричну робочу камеру 1 з патрубками підведення і відведення середовища в якій перпендикулярно потоку встановлений кавітатор 2 у вигляді решітки кавітуючих елементів 3. При однаковій площі вільного перерізу між бічними твірними конусів кавітуючих елементів потік середовища рівномірно розподіляється в робочій камері пристрою. Конструктивне виконання елементів кавітатора обумовлює їх різницю в дуговому поперечному перетині. При визначенні характеристик такого пристрою доцільно користуватись середнім діаметром d_{cp} , який зв'язаний з кутом конусності таким співвідношенням

$$d_{cp} = D - l \sin \frac{\alpha}{2}, \quad (2.13)$$

де D - діаметр більшої основи зрізаного конуса кавітуючого елемента;

l - довжина твірної конуса,

α - кут при вершині конуса.

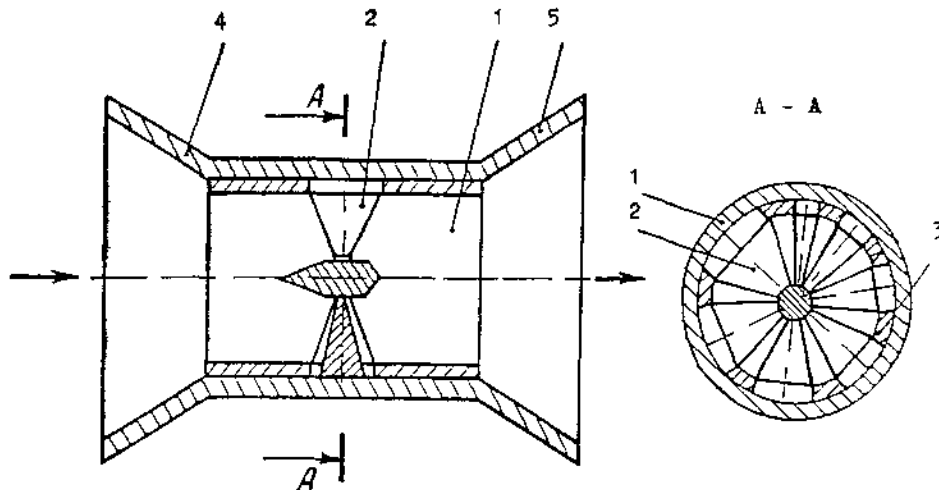


Рисунок 2.2 – Кавітаційний змішувач [54,55] 1 – робоча камера; 2 – кавітатор (решітка кавітуючих елементів); 3 – кавітуючі елементи; 4,5 – патрубки підведення і відведення середовища.

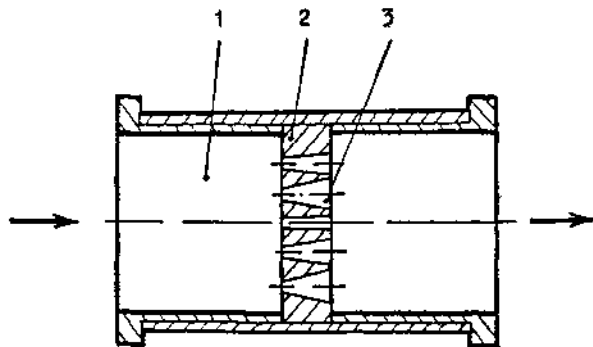


Рисунок 2.3 – Кавітаційний змішувач [55] 1- робоча камера, 2- кавітатор, 3- отвори у вигляді дифузорів.

Розміри (D, l, α) вибираються конструктивно з умови забезпечення однакової площі перерізу між бічними твірними конусів елементів кавітатора. Саме через виконання окремих кавітуючих елементів з різними кутами конусності забезпечується утворення полідисперсного кавітаційного поля, що підтверджується наведеними залежностями.

Частота відриву від кавітатора кавітаційних каверн, що утворюються в потоці рідини і перемінюються в ньому визначають з [53]:

$$f = \frac{Sh \cdot d_{cp}}{v_3}, \quad (2.14)$$

де Sh - число Струхаля

v_3 - швидкість потоку в робочій камері в місці розміщення кавітатора.

З (2.14) число Струхаля:

$$Sh = \frac{fD_{cp}}{v_3}, \quad (2.15)$$

Крім того з [4] залежність числа Струхаля від стадії кавітації визначається з залежності:

$$Sh = \frac{0,449}{\sqrt{\lambda^2 + 1}}, \quad (2.16)$$

Прирівнюючи обидві частини рівнянь (2.14) і (2.16), а також враховуючи, що:

$$\lambda = \frac{L}{d_{cp}}, \quad (2.17)$$

де L – довжина кавітаційної каверни (кавітаційної зони) остаточно одержимо:

$$\frac{fd_{cp}}{v_3} = \frac{0,449}{\sqrt{\left(\frac{L}{d_{cp}}\right)^2 + 1}}, \quad (2.18)$$

Звідки:

$$f = \frac{0,449v_3}{d_{cp} \sqrt{\left(\frac{L}{d_{cp}}\right)^2 + 1}}, \quad (2.19)$$

В загальному випадку довжина кавітаційної каверни і є санкцією основних параметрів технологічного потоку:

$$L = F(P_1 \cdot P_2 \cdot v \cdot \rho \cdot t), \quad (2.20)$$

де P_1, P_2 - тиск середовища в кавітаційному пристрої відповідно на вході в робочу камеру і після решітки кавітаторів;

v - швидкість потоку середовища;

ρ - густина середовища,

t - робоча температура.

Для встановленої течії середовища в кавітаційному пристрої числові значення P_1, P_2, v, ρ і t є сталими. Отже $f = \Phi(d_{cp})$ тобто частота відриву кавітаційної каверни однозначно визначається середнім діаметром кавітатора.

В свою чергу d_{cp} впливає на структуру бульбашкового кавітаційного поля. Встановлено [56], що середній діаметр бульбашок кавітаційного поля D_{cp} також залежить від d_{cp} і f і визначається таким співвідношенням:

$$D_{cp} = 246 \cdot 10^{-4} \frac{\sigma \cdot L}{\rho \cdot f^2 d_{cp}}, \quad (2.21)$$

де σ - міжфазовий поверхневий натяг.

Очевидно, що відмінність кутів конусності кавітуючих елементів кавітатора створює умови для генерування навігаторами поля різної структури, що створює умови для виникнення полідисперсного поля кавітаційних бульбашок. При цьому при будь-яких комбінаціях розташування кавітуючих елементів в решітці кавітатора абсолютні значення їх кутів конусності значення не мають, адже завжди можна вибрати однакову

площу перерізу між кавітуючими елементами, а кути конусності двох сусідніх елементів при цьому не залежать один від одного.

Аналогічний принцип підвищення ефективності обробки реалізується в конструкції кавітаційного змішувача [54], що містить проточну камеру 1 в якій перпендикулярно потоку рідини встановлений кавітатор 2 у вигляді диску з наскрізними отворами у вигляді дифузорів (рис 2.3). Всі дифузори мають однаковий діаметр вхідного отвору, а діаметр вихідних отворів визначають із співвідношення $D/D_i \neq 1$, де D - діаметр вхідного отвору даного дифузору, а D_i - діаметр будь-якого довільно вибраного дифузора. В [43] експериментально встановлений зв'язок частоти коливань з конструкцією і режимними параметрами дифузорів з різними кутами розкриття:

$$f = \frac{v_3 \operatorname{tg} \beta / 2}{r_{cp} \sqrt{\mu}} (1 - \sqrt{1 - \chi}), \quad (2.22)$$

де v_3 - швидкість середовища в критичному перерізі дифузора;

β - кут розкриття дифузора;

r_{cp} - радіус критичного перерізу дифузора;

μ - коефіцієнт витрат дифузора,

χ - число кавітації.

Для встановленого режиму течії середовища в проточному гідродинамічному пристрої v_3 , r_{cp} , μ , χ є константи, які визначаються його конструктивними особливостями. Отже, частота кавітаційних коливань є функцією кута розкриття дифузора β і рівняння (2.22) можна записати у вигляді:

$$f_1 = C \cdot \operatorname{tg} \beta_1 / 2, \quad (2.23)$$

де f_1 - частота коливань кавітаційної каверни, яка утворюється за довільно вибраним дифузором;

β_I - кут розкриття довільно вибраного дифузора кавітатора,

C - константа однакова для всіх дифузорів кавітатора.

$$C = \frac{v_3 (1 - \sqrt{1 - \lambda})}{r_{cp} \sqrt{\mu}}. \quad (2.24)$$

Оскільки чисельне значення β_I для всіх дифузорів кавітатора є різним то частоти пульсацій каверн, які вони генерують, розрізняються між собою. Крім того, відомо, що в рідинному середовищі переважають повздовжні хвилі взаємодія яких в поперечному перерізі робочої проточної камери пристрою несуттєва.

2.3 Методика інженерного розрахунку гідродинамічного кавітатора

Універсального підходу до розрахунків ГД кавітаційних пристроїв немає. Це пояснюється неможливістю виділити вплив окремих ГД параметрів на процес кавітаційного оброблення і взаємозалежністю цих параметрів, а також фізико-хімічними властивостями оброблюваного середовища, складністю і нестационарністю процесів, які відбуваються при кавітаційній течії середовищ в пристрої. Відомі розрахунки базуються, головним чином, на емпіричних залежностях [49].

Тому можна стверджувати, що розрахунки ГД кавітаційних пристроїв достовірні тільки в певних діапазонах режимних параметрів.

Виходячи з результатів проведених досліджень і досвіду промислового впровадження гідродинамічних пристроїв, рекомендується здійснювати їх розрахунок в такій послідовності.

1. Задають кратність оброблення n середовища виходячи з вимог технологічного процесу його енергетичних показників, а також враховуючи фізико-хімічні властивості середовища. Для циркуляційної схеми рекомендується $1 < n < 20$. Наприклад для одержання водно-масляних

емульсій з вмістом дисперсної фази 1...5%, $n=4...8$. Для проточної схеми з однією зоною кавітаційної дії $n = 1$.

2. Розраховують потрібну витрату середовища:

$$Q_p = V \cdot n, \quad (2.25)$$

де V - об'єм наявної технологічної ємкості, або необхідна продуктивність автономної установки.

3. Підбирають діаметр трубопровода циркуляційного контура d_m з врахуванням Q_p і необхідності підтримання швидкості v_m не менше 5 м/с.

4. Визначають діаметр робочої камери $d_{кам}$, пристрою з умови:

$$d_{кам} = (0,6...0,7) d_m, \quad (2.26)$$

5. Вибирають величину коефіцієнту стиснення потоку в місці розташування кавітатора $k = d_{кам} / D = 0,6...0,9$, і визначають діаметр кавітатора D . Для середовищ з кінематичною в'язкістю не більше $0,06 \cdot 10^{-4}$ Ст при нормальних умовах доцільно вибирати $k = 0,6...0,75$, для більш в'язких середовищ з кінематичною в'язкістю до $0,4.. 0,5 \cdot 10^{-4}$ Ст при нормальних умовах $k = 0,75...0,9$.

6. Розраховують швидкість потоку середовища в пристінному зазорі в місці розміщення кавітатора v_z : $v_z = Q_p / S_z$. При $v_z \leq 20$ м/с для емульсій з вмістом дисперсної фази 1...5% і подібних їм слабоконцентрованих суспензій $v_z < 15,0$ м/с для емульсій з вмістом дисперсної фази до 15...20% і багатокомпонентних сумішей коригують вибране значення k .

7. Енерговитрати на кавітаційне оброблення безпосередньо в робочій камері визначають за критерієм Ейлера [49]:

$$Eu = 6,17 k^{5,51} \lambda^{0,2}, \quad (2.27)$$

8. Втрату напору h_δ на кавітаційне оброблення в робочій камері визначають з залежності:

$$h_\delta = \rho v_z^2 Eu, \quad (2.28)$$

9. Визначають додаткову втрату напору h_l в робочій камері за її довжиною від хвостової частини кавітаційної каверни до конструкційного переходу робочої камери в дифузор за формулою Дарсі, враховуючи, що:

$$l = (3 \dots 5) \lambda D, \quad (2.29)$$

$$h_l = \lambda_m (l v_3^2) / (d_{кам} 2g), \quad (2.30)$$

При цьому вплив шорсткості поверхонь до уваги не береться, а коефіцієнт λ_m розраховують за формулою Блазіуса:

$$\lambda_m = 0,316 / \sqrt[4]{Re}. \quad (2.31)$$

10. Визначають сумарні втрати напору в робочій камері h_c :

$$h_c = h_d + h_l \quad (2.32)$$

11. За відомими методиками розраховують загальні втрати напору в циркуляційному контурі (технологічній магістралі) h_k .

12. Визначають розрахунковий напір насоса h_p , підсумовуючи розраховані в пп. 10, 11 втрати:

$$h = h_c + h_k \quad (2.33)$$

13. Враховуючи потрібну витрату середовища Q_p з (п.2) і розрахунковий напір h_p (п.12) вибирають з каталога відповідний насос.

Висновки по розділу

В цьому розділі були розглянуті теоретичні основи гідродинамічної кавітації та представлені формули для розрахунку: V_k – об'єм кавітаційної каверни, N – концентрація бульбашок в одиниці об'єму середовища та f – частота відриву кавітаційної каверни.

Визначено, що довжина кавітаційної каверни є основою параметрів технологічного потоку.

В пункті 2.3 було описано послідовність розрахунку ГД пристроїв: $d_{\text{кам}}$ – діаметр робочої камери, D – діаметр кавітатора, а також втрати напору в робочій камері, технологічній магістралі та підбір насоса за його розрахунковим напором.

3 ПРОГРАМА І МЕТОДИКА ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНИХ ДОСЛІДЖЕНЬ

3.1 Програма експериментальних досліджень

На основі теоритичного обґрунтування кавітаційної обробки і методики розрахунку ГД кавітатора було складено програму експериментальних досліджень.

1. Розробити експериментальну установку для дослідження процесу кавітаційної обробки технологічних середовищ.
2. Визначити суттєві фактори та границі їх варіювання.
3. Розробити методику визначення якості гомогенізації молока.
4. Провести експериментальні дослідження впливу конструктивних параметрів гідродинамічного кавітатора на ефективність кавітаційного оброблення молока.
5. Визначення впливу пульсацій технологічного потоку на ефективність його оброблення.
6. Дослідження гідродинамічних параметрів та оптимізація роботи гідродинамічного кавітатора для обробки молока.
7. Зробити висновки за результатами експериментальних досліджень.

3.2 Методика проведення експериментальних досліджень

3.2.1 Методика проведення повнофакторного експерименту

Порядок проведення ПФЕ на прикладі ПФЕ 2².

Кодування факторів необхідно для перекладу натуральних факторів (температури, швидкості нагрівання, нерівномірності перемішування й ін. факторів) у безрозмірні величини, щоб мати можливість побудувати

стандартну ортогональну план-матрицю експерименту [57]. Для перекладу натуральних змінних у кодові x_i заповнюють таблицю кодування змінних на двох рівнях (табл. 3.1). Як нульовий рівень факторів звичайно вибирають центр інтервалу, у якому передбачається вести експеримент. У промислових умовах нульовий рівень відповідає значенням факторів при існуючому технологічному режимі.

Таблиця 3.1 - Кодування факторів

Інтервал варіювання i рівень факторів	Перший фактор	Другий фактор
Нульовий рівень $X_i = 0$	2	2
Інтервал варіювання ε	1	1
Нижній рівень $X_i = -1$	1	1
Верхній рівень $X_i = +1$	3	3
Кодове позначення	X_1	X_2

При виборі інтервалу варіювання справа вважається трохи складнішою. Часто, особливо при оптимізації процесу, спочатку доцільно описати його лінійним рівнянням, і тому інтервал варіювання повинен бути досить малий для одержання лінійного рівняння, але разом з тим досить великий, щоб не одержати помилкового висновку про незначущий вплив якого-небудь із факторів [56].

Перед початком експерименту фактори кодуються по формулі:

$$x_{код} = \frac{x_n - x_o}{\varepsilon}, \quad (3.1)$$

де $x_{код}$ - кодоване значення фактора (верхній рівень позначається +1, а нижній -1);

x_n - натуральне значення фактора;

x_o - натуральне значення фактора на основному рівні;

$\varepsilon = (x_n^e - x_n^h) / 2$ - натуральне значення інтервалу варіювання фактора;

x_n^e - натуральне значення фактора на верхньому рівні,

x_n^h - натуральне значення фактора на нижньому рівні.

Перевірка відтворюваності досвідів. При однаковому числі паралельних досвідів на кожному сполученні рівнів факторів відтворюваність процесу перевіряється за критерієм Кохрена [56]:

$$G = \frac{s_{u\max}^2}{\frac{n}{\sum_{u=1}^m s_u^2}} \leq G_{(0,05; f_n; f_u)}, \quad (3.2)$$

де $s_u^2 = \frac{\sum_{p=1}^m (y_{u_p} - \bar{y}_u)^2}{m-1}$ - дисперсія, що характеризує розсіювання

результатів досвідів на u -м сполученні рівнів факторів;

$p = 1, 2, \dots, m$ — число паралельних досвідів;

$s_{u\max}^2$ — найбільша з дисперсій у рядках плану;

$G_{(0,05; f_n; f_u)}$ — табличне значення критерію Кохрена при 5%-ном рівні значимості;

$f_n = n$ — число незалежних оцінок дисперсії;

$f_u = m - 1$ — число ступенів свободи кожної оцінки.

Процес вважається відтвореним, якщо виконується нерівність (3.2). При цьому дисперсія відтворюваності (помилка досвіду) визначається по формулі

$$s_y^2 = \frac{\sum_{u=1}^n s_u^2}{n}. \quad (3.3)$$

Якщо нерівність (3.2) не виконується, то необхідно прийняти міри до уточнення вимірів у досвіді з максимальною дисперсією.

У випадку відтворюваності процесу розраховують коефіцієнти регресії.

Для нашого приклада із двома факторами рівняння регресії буде мати вигляд

$$y = b_0 + b_1x_1 + b_2x_2. \quad (3.4)$$

Відповідно, коефіцієнти знаходимо по формулах

$$b_0 = \frac{\sum_{u=1}^n \overline{y_u}}{n}; \quad (3.5)$$

$$b_i = \frac{\sum_{u=1}^n x_i \overline{y_u}}{n}; \quad (3.6)$$

$$b_{ij} = \frac{\sum_{u=1}^n x_i x_j \overline{y_u}}{n}. \quad (3.7)$$

Перевірка адекватності лінійної моделі виконується за допомогою критерію Фішера. Лінійна модель адекватна, якщо виконується нерівність:

$$F = \frac{s_{ad}^2}{s_y^2} \leq F_{(0,05; f_{ad}; f_y)}, \quad (3.8)$$

де $s_{ad}^2 = \frac{\sum_{u=1}^n (\overline{y_u} - y_u)^2}{n - k - 1}$ - дисперсія адекватності;

y_u – розрахункове значення відгуку в u -м досвіді;

$F_{(0,05; f_{ad}; f_y)}$ - критерій Фішера при 5% - ному рівні значимості;

$f_{ad} = n - k - 1$ - число ступенів волі дисперсії адекватності;

f_y - число ступенів волі дисперсії відтворюваності.

Оцінка значимості коефіцієнта регресії виробляється за допомогою критерію Стьюдента. Коефіцієнт вважається значимим, якщо виконується нерівність

$$|b_i| \geq \Delta b_i = t_{(0.05; f_y)} \frac{s_y}{\sqrt{n}}, \quad (3.9)$$

де $t_{(0.05; f_y)}$ - 5% - ова крапка розподілу Стьюдента з f_y ступенями волі.

Незначущий коефіцієнт при факторі означає, що даний фактор не впливає (або впливає незначно) на параметр оптимізації [58]. Однак на величину коефіцієнта регресії впливає не тільки роль даного фактора, але також обраний інтервал варіювання. Це значить, що при дуже вузьких межах зміни фактора в експерименті його внесок у зміну параметра оптимізації може бути дійсно дуже малим. Однак тільки по цьому не можна ще говорити про те, що фактор є незначущим. Тому статистичний сигнал про незначущість фактора повинен бути по можливості перевірений або хоча б обговорений з технологічної точки зору.

У випадку неадекватності лінійної моделі можна спробувати перевірити адекватність неповного квадратного рівняння:

$$y = b_0 + b_1 x_1 + b_2 x_2 + b_{1,2} x_1 x_2 \quad (3.10)$$

3.2.2 Методика визначення якості гомогенізації молока

В молочній промисловості для оцінки якості гомогенізації використовують такі способи [59,60]:

1. седиментаційний аналіз;

2. метод центрифугування;
3. метод оптичної спектрофотометрії,
4. пряме вимірювання під мікроскопом.

З них перші два є інтегральними способами оцінки якості гомогенізації і використовуються на виробництві, а останній – диференційним. Зрозуміло, що для ретельного дослідження якості гомогенізації, наприклад при розробці або випробуваннях нових гомогенізаторів, необхідно використовувати вимірювання під мікроскопом. Але цей спосіб відрізняється складністю його проведення, значними витратами часу та потребує достатньо високої кваліфікації від лаборанта [61,62].

Для підвищення продуктивності, полегшення вимірювань та підрахунків і зменшення похибок при підрахунку кількості та діаметра жирових кульок під мікроскопом пропонується використовувати фото або відеокамеру, вмонтовану у мікроскоп [63]. При цьому відпадає необхідність у використанні консервуючих засобів для знешкодження броунівського руху жирових кульок, камер для підрахунку та окулярних лінійок. Але вартість такої установки є досить великою.

Для отримання зображення та передачі його до комп'ютера часто використовуються веб-камери. Поєднавши таку камеру (підключену до звичайного офісного комп'ютера) зі світловим мікроскопом, що використовується для вимірювання жирових кульок, отримаємо просту систему для оцінювання якості гомогенізації методом вимірювання під мікроскопом.

Вартість цифрових веб-камер найбільшим чином залежить від їх максимальної розрішуючої здібності. Найбільш розповсюдженими є камери з максимальною розрішуючою здібністю 640×480 пікселів, що відповідає розміру зображення 10,8×8,1 см. Такі камери коштують від 20 у.од. Веб-камери з розрішуючою здібністю 1024×768 пікселів коштують від 150 у. од. На практиці, зображення, що отримане з камери з розрішенням 640×480

можна збільшувати у 2 рази та більше без значної втрати якості стосовно вигляду жирових кульок. Тобто для використання веб-камери для визначення якості гомогенізації цілком достатньо мати камеру з максимальним розрішенням 640×480 .

Приєднати веб-камеру до мікроскопа можливо декількома способами. Для отримання оптимального поля зору та найбільш якісного зображення слід зняти зовнішній об'єктив камери та прикріпити її до місця на мікроскопі, призначеного для приєднання фотонасадки (рис.3.1). Приєднання камери без об'єктива до мікроскопа замість окуляра (у більшості мікроскопів) дозволяє отримати збільшене у декілька разів зображення але менше у таку ж кількість разів поле зору (рис.3.2).

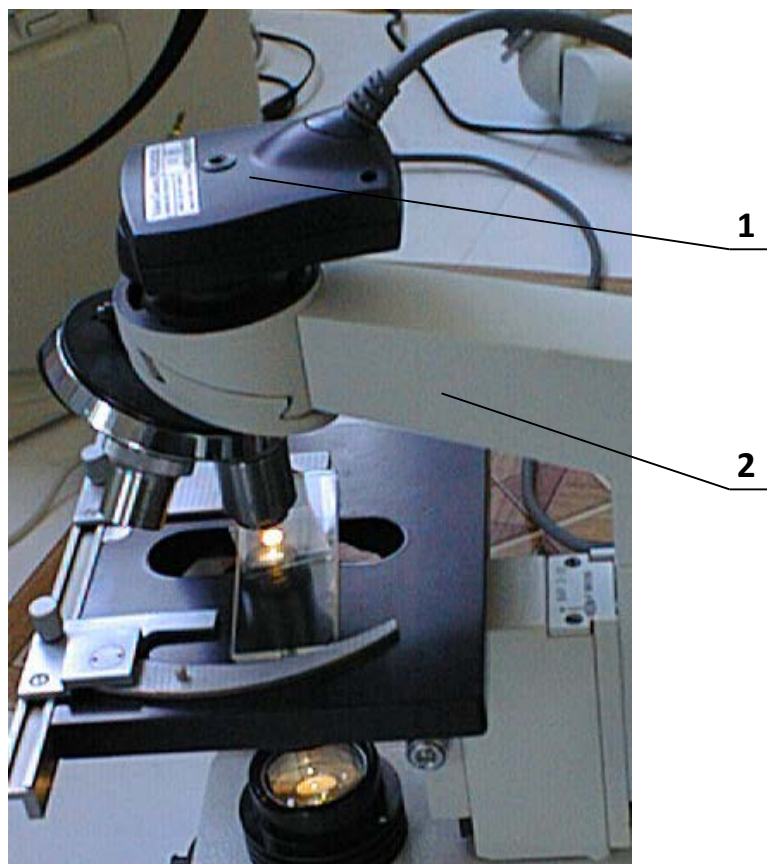


Рисунок 3.1 – Пристосування веб-камери без об'єктива до місця на мікроскопі, призначеного для приєднання фотонасадки:

1 – веб-камера; 2 – мікроскоп.

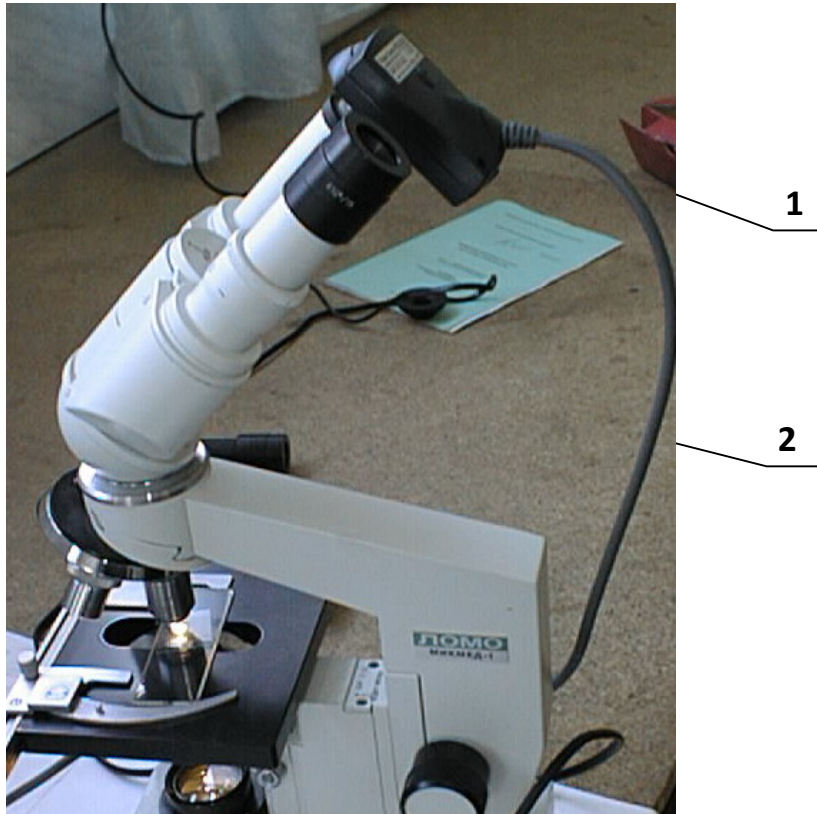


Рисунок 3.2 – Пристосування веб-камери без об'єктиву до мікроскопу замість окуляра

1 – веб-камера; 2 – мікроскоп.

Зображення зразка, що аналізується під мікроскопом у реальному часі виводиться на екран монітора комп'ютера. Це зображення зберігається у вигляді файлів у пам'яті комп'ютера. У подальшому для аналізу зразків відбираються найбільш характерні поля зору і вже з ними відбувається подальша робота. В залежності від програмного забезпечення, що використовується можливо зробити отримані фотографії більш сприятливими для вивчення інвертувавши кольори, збільшивши чіткість, контрастність, видаливши шум і т.п.

Для подальшого вимірювання розмірів жирових кульок необхідно визначити масштаб збільшення мікроскопа з камерою, для чого використовується об'єкт мікрометр.

При мікроскопуванні молоко після гомогенізації розводять у певному співвідношенні дистильованою водою. При нанесенні краплі розбавленого молока на предметне скло її покривають покривним склом. При накриванні препарату покривне скло легко придавлюють, і утворюється закритий об'єм препарату, глибина якого складає близько 70 мкм. При вимірюванні можливо отримати чітке зображення тільки верхнього шару жирових кульок, тому препарат залишають стояти протягом 20 - 30 хвилин для спливання жирових кульок [61,64]. З кожної проби готують три розведення, а з кожного розведення два препарата [64]. Робляться фотографії. Після цього на екрані монітора комп'ютера відбираються найбільш характерні поля зору зразків. Приблизна мінімальна кількість фотографій одного препарата, яку необхідно дослідити, визначається за статистичними методами відбору проб на основі приблизної кількості жирових кульок, що попадають у поле зору на одній фотографії.

Для зручності подальших підрахунків фотографії роздруковують на принтері. Рекомендується підібрати масштаб друку таким чином, щоб він був кратним 1 см. Наприклад 1 мкм – 1 см.

Процес підрахунку майже повністю автоматизується, якщо використовувати програму аналізу зображень. Одна з таких програм має назву IBAS [63]. Вона дозволяє визначати та аналізувати більше 20 параметрів кожної жирової кульки, в тому числі: площину проекції зображення, максимальний та мінімальні її діаметри, діаметр еквівалентної по площі перерізу кола, а також різні параметри поля зображення: кількість усіх часток, відсоток заповнення поля частками та інш.

3.3 Розробка експериментальної установки для дослідження процесу кавітаційної обробки технологічних середовищ

На кафедрі «Обладнання переробних і харчових виробництв» нами було проведено дослідження гідродинамічної обробки молока та якості її від визначених факторів.

Досліди проводили на установці (рис. 3.3) яка містить технологічну ємкість 1, насос 2, робочу ділянку 3 з кавітаційним пристроєм, які включені в замкнений циркуляційний контур. Зміну і регулювання гідродинамічних умов роботи здійснювати кранами 4 і 5.

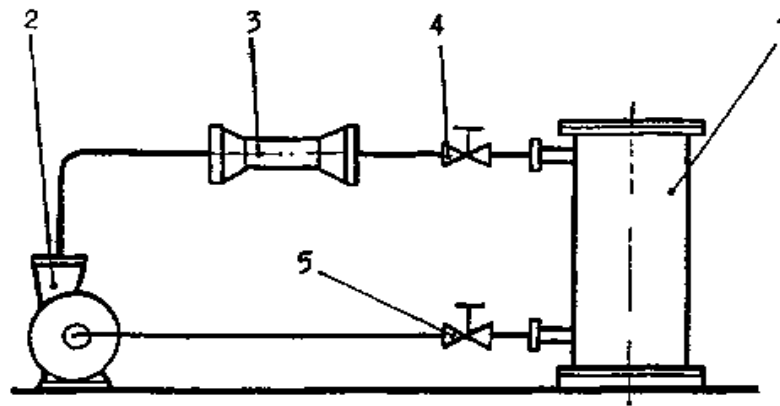


Рисунок 3.3 – Експериментальна технологічна установка: 1- технологічна ємкість; 2- насос; 3- робоча ділянка з кавітатором; 4,5- крани.

Фото розробленої установки представлено на рис.3.4

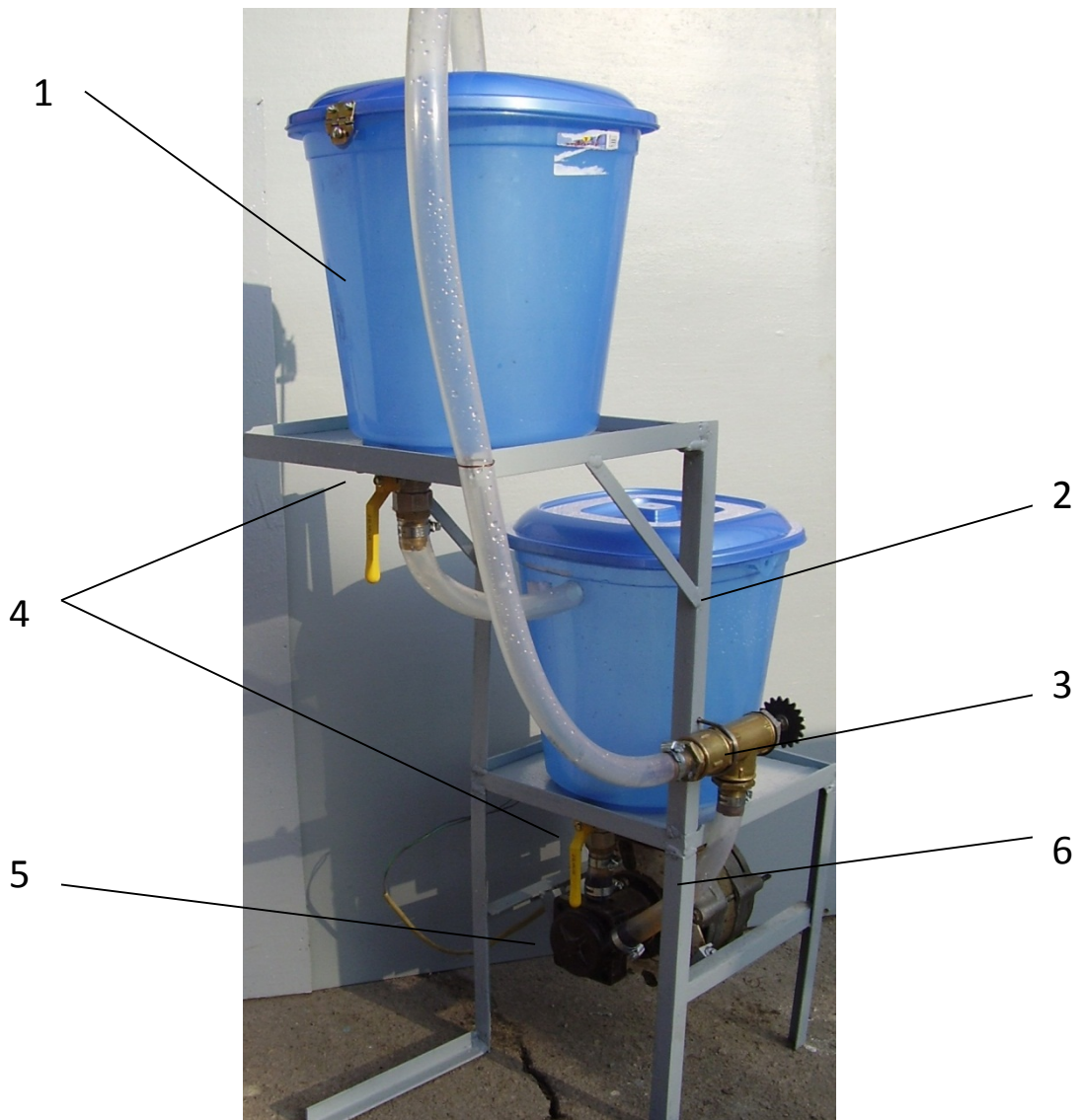


Рисунок 3.4 – Фото установки: 1,2 – технологічна ємкість; 3 – кавітатор; 4 – крани; 5 – насос; 6 – електродвигун.

В установці використовували гідродинамічний кавітатор (рис.3.5)

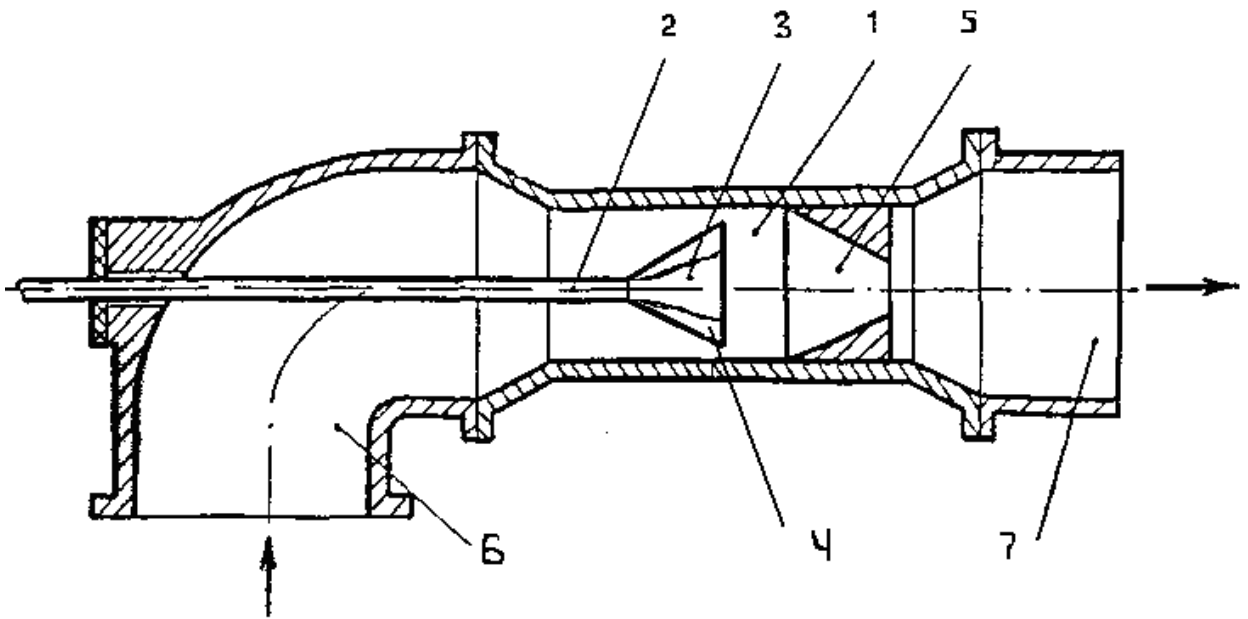


Рисунок 3.5 – Гідродинамічний кавітатор статичного типу: 1- проточна камера; 2- шток; 3- кавітатор; 4- конічний насадок; 5- дифузор; 6- конфузор; 7- патрубок відведення середовища.

Кавітаційний змішувач складається із циліндричної проточної камери 1, у якій, наприклад, на рухливому в осьовому напрямку штоку 2 установлений з можливістю обертання кавітатор 3, виконаний у вигляді усіченого конуса й звернений меншою основою назустріч потоку. Кавітатор 3 має прорізу 4 пірамідальні форми, які розташовані під гострим кутом до його осі й спрямовані вершиною назустріч потоку. За кавітатором 3 у проточній камері 1 розміщений порожній конічний насадок 5, звернений своєю більшою основою убік кавітатора 3. При цьому діаметр більшої основи насадка 5 дорівнює діаметру проточної камери 1. Для підведення в змішувач і відводу з нього оброблюваного середовища служать, відповідно, патрубок 6 і патрубок 7.

Кавітаційний змішувач працює таким чином.

Оброблюване рідке середовище через патрубок підведення 6 надходить у проточну камеру 1 і натікає на розміщений у ній конусоподібний кавітатор

3, звернений меншою основою назустріч потоку. Потоки рідини, потрапляючи в пірамідальні прорізи 4, закручуються й за рахунок збільшення швидкості утворюють кавітаційний режим течії, змушуючи при цьому обертатися кавітатор, за яким утворюються кавітаційні каверни, що переміщуються по гвинтовій лінії й генерують поле кавітаційних пухирців, що насичують потік середовища по всьому об'єму проточної камери 1 змішувача. Оскільки за кавітатором 3 у проточній камері 1 розміщений порожній конічний насадок 5, звернений своєю більшою основою у бік кавітатора 3, а діаметр більшої основи насадка 5 дорівнює діаметру проточної камери 1, двофазний закручений потік, що містить розподілені навігаційні пухирці, попадає на вхід насадка 4. У насадці 4 за рахунок стиснення швидкість потоку істотно зростає, що викликає подальше зниження в ньому гідростатичного тиску. За таких умов кавітаційні пухирці не схлопуються, а починають збільшуватися в об'ємі до виходу з насадка 4, створюють на виході стійкий двофазний потік з досить великими кавітаційними пухирцями. Схлопуючись, кавітаційні пухирці утворюють пульсуючі ударні хвилі й кумулятивні мікрострумені, що роблять інтенсивний вплив на перемішування на оброблюваному середовищі. При цьому, на розміри кавітаційних пухирців впливає як час перебування в зоні зниженого тиску, так і співвідношення розмірів вихідного отвору насадка 5 і кавітатора 3.

Переміщаючи кавітатор 3, закріплений, наприклад, на штоку 2 уздовж осі проточної камери 1, можна змінювати відстань від кавітатора 3 до насадка 4, регулюючи в такий спосіб довжину обертової кавітаційної каверни.

Застосування технічного рішення, що заявляється, для одержання емульсій, суспензій у гідродинамічному кавітаційному полі дозволяє підвищити ефективність змішування шляхом створення суцільного обертового кавітаційного поля високої активності.

ВИСНОВКИ

1. Як показав аналіз науково-технічної інформації, кавітаційні пристрої, що застосовуються в харчовій та переробній промисловості, мають суттєві технологічні переваги в порівнянні з іншим обладнанням, призначеним для виконання однакових з кавітаційними пристроями операцій, найперспективнішими з яких є проточні пристрої статичного типу.

2. Встановлено, що обробка молока за допомогою гідродинамічної кавітації дозволяє одержувати кінцевий продукт з переважним вмістом дрібнодисперсної фази з розмірами жирових кульок до 1 мкм. Але деякі важливі гідродинамічні і технологічні умови кавітаційної дії, які визначають ефективність гомогенізації молочних продуктів досліджені недостатньо.

3. Розроблена класифікація кавітаційних пристроїв для обробки молока за способом збудження кавітації.

4. За результатами теоретичних досліджень встановлено основні фактори, які суттєво впливають на ефективність гідродинамічної кавітації – це відстань між конусною насадкою та дифузором і кратність обробки.

5. Встановлено, що оптимальна кратність оброблення молока жирністю 2,5...2,7% дорівнює двом, причому ефективність гомогенізації найбільша при температурі 60°C (75...79%). При цьому створюється система «рідина – рідина», відбувається часткова термодерація продукту і, таким чином ефективність дії на нього кавітації підвищується.

6. За результатами експериментальних досліджень виявлено конструктивні параметри гідродинамічного кавітатора, основним його параметром для виявлення ефективності кавітації є відстань між конусною насадкою та конфузором яка при максимальній гомогенізації дорівнює 10мм.

7. Запропонована методика інженерного розрахунку гідродинамічного кавітатора, яка рекомендована при виконанні курсових та дипломних проектів по спеціальності ОПХВ.

8. На основі результатів досліджень запропонована кавітаційна установка та вдосконалена конструкція гідродинамічного кавітатора з регульованої відстанню 10-30мм, які дозволяють здійснювати регульовану кратність кавітаційної обробки молока і мають новизну, що підтверджена заявкою на корисну модель.

9. Розроблена кавітаційна установка та вдосконалений гідродинамічний кавітатор пройшли лабораторні випробування в лабораторії кафедри ПОПХВ та рекомендовані для впровадження у навчальний процес при вивчанні дисциплін машини і обладнання для переробки сільськогосподарської продукції та технологічне обладнання переробних і харчових виробництв.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Машкін М.І. Молоко і молочні продукти.-К.: Урожай, 1996-333с.
2. Горбатова К.К. Биохимия молока и мол. Продуктов.-М.: Легкая и пищевая промышленность, 1984-344с.
3. Молоко / Под ред. Р.Б. Давидова-М.:Колос, 1989-303с.
- 4.Федоткин И.М., Немчин А.Ф. Использование кавитации в технологических процессах.-К.:Высшая школа. Изд-во при Киев. ун-те.1984.-68с.
5. .Федоткин И.М., Жарик Б.Н., Погоржельский Б.И. Интенсификация технологических процессов пищевых производств.-К.: Техника.1984.-176с.
6. Беззубов А.Д., Гарлинская Е.И., Фридман В.М. Ультразвук и его применение в пищевой промышленности.-М.: Пищ. пром-сть,1984.-196с.
7. Вайткус В.В. Гомогенизация молока.-М.: Пищ. пром-сть,1977-216с.
8. Заяс Ю.Ф. Ультразвук и его применение в технологических процессах мясной промышленности.-М.: Пищ. пром-сть,1970-282с.
9. Лубэ В.М., Котов А.Л., Лунев В.Н. Опыт промышленного исследования низкочастотных упругих колебаний для получения эмульсии для сахарного печенья // Хлебопекарная и кондитерская пром-сть.-1977.-№2-18-20с.
10. Коган Ф.І. Електрофізичні методи в технології консервування харчових продуктів.-К.: Техніка,1968.-123с.

11. Балабудкин М.А. Роторно-пульсационные аппараты в химико-фармацевтической промышленности.-М.: Медицина, 1983.–160с.
12. Молчанов Г.И. Ультразвук в фармации (Состояние и перспективы применения).-М.: Медицина, 1980.–176с.
13. Герштал Д.А., Фридман В.М. Ультразвуковая технологическая аппаратура.-М.: Энергия, 1986.–320с.
14. Новицкий Б.Г. Применение акустических колебаний в химико-технологических процессах.-М.: Химия, 1983.–192с.
15. Резник Н.Е. Гидродинамическая кавитация и использование ее разрушающего действия //Тр. ин-та / Всес. ин-т с/х машиностр. им. В.П.Горячкина.-1969.-Вып. 59– 144-160с.
16. Пат.2001669 РФ. Кавитационный взбиватель / Ю.И. Коротин, А.С. Мирзоян, Ю.Н. Глебов.-Опубл.31.10.93, Бюл. №30-40.
17. Самсонова А.Н., Ушева В.В. Фруктовые и овощные соки (Техника и технология).-М.: Агропромиздат, 1990–287с.
18. Ходыкер М.М. Диспергирование плодоовощных консервов на роторном гомогенизаторе // Пищ. пром-сть.-1991.-№1–с.39-41.
19. А.с. 1183162 СССР. Диспергатор / А.Ф.Немчин, В.А. Анистатенко, В.Д. Касиянчук.- Опубл. 07.10.85. Бюл. №39.
20. Касиянчук В.Д., Анистатенко В.А., Иванов В.С. и др. Новый способ получения фруктово-ягодных соков // Пищ. пром-сть.-2004.-№4-с.38-39.
21. Голубев В.Н., Каландазе В.В. Измельчение растительного сырья в гидродинамическом кавитационном диспергаторе // Пищ. пром-сть.-1997.-№8–с.40.

22. Голубев В.Н., Губанов С.Н., Микеладзе О.Г. Роторно-кавитационный аппарат для обработки пектиносодержащего сырья // Пищ. пром-сть.- 2000.-№9–с.30-32.
23. Немчин А.Ф. Опыт применения суперкавитирующих аппаратов в сахарной промышленности.: Обзорная информация. - М.: 1986.- Вып.1.–32с.
24. Немчин А.Ф., Анিকেев Ю.В., Жижина Р.Г. и др. Гидродинамические методы интенсификации процессов очистки диффузионного сока: Обзорная информация. - М., ЦНИИТЭИ Пищепром, 1984.- Вып. 8. – 28с.
25. Немчин А.Ф. Создание новых технологий на основе гидродинамической кавитации // Сах. пром-сть. – 1987 - №6. – с.21-24.
26. Федоткин И.М., Чекой А.И. Комплексное использование отходов пищевых производств. – Кишинев.: 1983.- 154с.
27. Ивченко В.М., Кулагин В.А., Немчин А.Ф. Кавитационная технология. – Красноярск.: Изд-во Красноярск. Ун-та, 2008.-200с.
28. Балабышко А.Н. Прогрессивное оборудование для получения высококачественных СОЖ.: Обзорная информация.– М., ВИИТЭМР, 1989. – Вып. 2-40с.
29. Немчин А.Ф., Сергеев Г.И., Мачинский А.С. Суперкавитирующие аппараты: Обзорная информация – М., ЦНИИТЭХим, 1988. – Вып.5. – 40с.
30. Мачинский А.С., Козюк О.В., Шишлов Д.Н. Кавитационные аппараты : Обзорная информация.–М., ЦНИИТЭИ Нефтехим, 1990. – Вып.1.-52с.

31. Ивченко В.М., Немчин А.Ф. Применение суперкавитирующих насосов для обработки полуфабрикатов // Прикладная гидромеханика и теплофизика.– Красноярск.: Изд-во Красноярск. ун-та,1975. – Вып. 5.- с.39-50.
32. А.с. 467159 СССР. Кавитационный реактор для размола волокнистых материалов / В.М. Ивченко, А.Ф. Немчин.-Опубл. 15.04.85, Бюл. №14.
33. Ивченко В.М. Гидродинамика суперкавитирующих механизмов.– Иркутск.: Изд-во Иркутск. Ун-та.1985.-231с.
34. А.с. 1099990 СССР. Кавитационный реактор для обработки потока материалов / И.М. Федоткин, О.В. Козюк .– Опубл. 30.06.84, Бюл. №24.
35. А. с. 1380767 СССР. Кавитационный смеситель / И.М. Федоткин, Б.Ю. Петров, О.В. Козюк.– Опубл.15.03.88, Бюл. №10.
36. А.с. 827138 СССР. Кавитационный смеситель / А.Г. Бескорвайный, И.М. Федоткин, А.Ф. Немчин и др.– Опубл. 07.05.81, Бюл. №17.
37. Немчин А.Ф. Суперкавитирующие технологические аппараты // Гидродинамика больших скоростей : Тр. Всес. Школы-семинара.– Красноярск.: Изд-во Красноярск. политехн. Ин-та,1987.- с.15-17.
38. А.с. 1472543 СССР. Гидродинамический кавитационный реактор / И.Е. Вьюков, А.И. Вьюков, Р.А. Солоницин.– Опубл. 03.11.72,Бюл. №34.
39. А.с. 1472543 СССР. Гидродинамический кавитационный реактор / О.В. Козюк, Б.Ю. Петров, Б.Н. Метлов и др.– Опубл. 15.04.89, Бюл. №14.
40. А.с. 1377317 СССР. Гидродинамический кавитационный реактор / Л.И. Пищенко, В.Б. Русин, А.М. Ермолов.– Опубл.29.02.88, Бюл. №8.

41. А.с. 1353858 СССР. Кавитационный аппарат / О.В. Козюк, Б.Б. Булгаков, А.И. Павловский и др.–Опубл. 23.11.87, Бюл. №43
42. А.с. 10887333 СССР. Кавитационный реактор / О.В. Козюк, И.М. Федоткин.– Опубл. 30.04.84, Бюл. №16.
43. Пилипенко В.В. Кавитационные автоколебания.-К.: Наукова думка, 1989.-316с.
44. А.с. 719702 СССР. Генератор колебаний давления воды / В.В. Пилипенко, В.А. Задонцев, И.К. Манько.- Опубл. 05.05.80, Бюл. №9.
45. А.с. 1428438 СССР. Установка для кавитационного диспергирования / М.Ю. Тимофеев.- Опубл.07.10.88, Бюл №37.
46. Низкочастотная акустическая кавитация как результат работы гидродинамического кавитационного генератора импульсов давления / Манько И.К., Костюк В.И.: - Ин-т механики АН УССР.- Днепропетровск, 1988- 9с.-Рус.- Деп. в ВИНТИ, №4573- В88.