

Міністерство освіти і науки України  
Вінницький національний технічний університет

**К. В. Бауман, І. В. Коц**

**КАВІТАЦІЙНА ТЕХНОЛОГІЯ ВИГОТОВЛЕННЯ  
БІТУМНИХ ЕМУЛЬСІЙ**

**Монографія**

Вінниця  
ВНТУ  
2013

УДК 665.775.5

ББК 38.37

Б 29

Рекомендовано до друку Вченою радою Вінницького національного технічного університету Міністерства освіти і науки України (протокол № 9 від 25 квітня 2013 р.)

Рецензенти:

**І. П. Паламарчук**, доктор технічних наук, професор

**В. І. Савуляк**, доктор технічних наук, професор

**Бауман, К. В.**

Б 29      Кавітаційна технологія виготовлення бітумних емульсій : монографія / К. В. Бауман, І. В. Коц. – Вінниця : ВНТУ, 2013. – 128 с.  
ISBN 978-966-641-546-5

Розглянуто питання розробки нової технології виготовлення бітумних емульсій на основі застосування кавітаційних процесів. Обґрунтовано та експериментально підтверджено можливість одержання емульсій, згідно з запропонованою технологією. Запропоновано відповідне технологічне обладнання та встановлені оптимальні параметри й закономірності вибору вхідного тиску в потоці сировини, її температури, конструктивних співвідношень елементів вузла емульгування, що дозволяють отримувати емульсії із наперед заданими фізико-хімічними властивостями, згідно з технологічними вимогами державних будівельних стандартів України. Для студентів, аспірантів та науковців у галузі будівництва та технології будівельного виробництва.

**УДК 665.775.5**

**ББК 38.37**

**ISBN 978-966-641-546-5**

© К. Бауман, І. Коц, 2013

## ЗМІСТ

ПЕРЕЛІК УМОВНИХ СКОРОЧЕНЬ.....	5
ВСТУП .....	6
1 АНАЛІЗ ВІДОМИХ ТЕХНОЛОГІЙ ТА УСТАТКУВАННЯ ДЛЯ ВИГОТОВЛЕННЯ ЕМУЛЬСІЙ БІТУМНИХ ДОРОЖНІХ.....	8
1.1 В'язучі на основі бітуму та напрямки їх застосування у будівництві.....	8
1.2 Основні фізико-механічні властивості бітумних емульсій та вимоги до їх якості.....	10
1.3 Процес утворення бітумних дорожніх емульсій і сучасні технології та устаткування для їх приготування .....	15
1.4 Аналіз існуючого кавітаційного обладнання в технологічних процесах виготовлення емульсій в різних галузях промисловості.....	21
1.5 Аналіз відомих теоретичних та експериментальних досліджень робочих процесів у кавітаційних диспергатора.....	25
2 ВИБІР ТА ОБҐРУНТУВАННЯ РАЦІОНАЛЬНИХ НОВИХ ПРИНЦИПОВИХ ТА КОНСТРУКТИВНИХ СХЕМ УСТАТКУВАННЯ ДЛЯ ПРИГОТУВАННЯ ЕМУЛЬСІЙ БІТУМНИХ ДОРОЖНІХ.....	31
2.1 Основні вимоги та критерії до вибору принципів та конструктивних схем устаткування для приготування бітумних емульсій .....	31
2.2 Принципові та конструктивні схеми устаткування для приготування емульсій бітумних дорожніх.....	32
2.3 Синтез промислової технологічної установки для приготування бітумних емульсій з наперед заданими властивостями.....	38
3 ТЕОРЕТИЧНІ ДОСЛІДЖЕННЯ РОБОЧОГО ПРОЦЕСУ ПРИГОТУВАННЯ БІТУМНИХ ЕМУЛЬСІЙ НА ЗАПРОПОНОВАНОМУ УСТАТКУВАННІ .....	44
3.1 Мета та задачі теоретичного дослідження робочого процесу приготування емульсій бітумних дорожніх на запропонованому устаткуванні. Основні припущення.....	44
3.2 Теоретичні основи попереднього змішування складових компонентів емульсії.....	46
3.3 Кінетика утворення бітумної емульсії в кавітаційному диспергаторі запропонованої установки для приготування бітумних емульсій.....	52

4 ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНІ ДОСЛІДЖЕННЯ НОВОЇ КОНСТРУКЦІЇ УСТАНОВКИ ДЛЯ ПРИГОТУВАННЯ БІТУМНИХ ЕМУЛЬСІЙ ....	60
4.1 Мета та задачі досліджень. Об'єкт досліджень .....	60
4.2 Основні характеристики сировини для виготовлення бітумної дорожньої емульсії.....	68
4.3 Методика експериментальних досліджень і оцінка точності вимірювань .....	70
4.4 Планування багатофакторного експерименту .....	72
4.5 Результати експериментальних досліджень .....	77
4.6 Випробування отриманої продукції – бітумної емульсії на відповідність вимогам .....	82
4.7 Експериментальне дослідження процесу попереднього змішування компонентів емульсії.....	86
4.8 Математична модель оцінки технологічного процесу приготування бітумних емульсій при використанні кавітаційної технології емульгування дорожнього бітуму .....	92
 5 ПРАКТИЧНА РЕАЛІЗАЦІЯ РЕЗУЛЬТАТІВ ДОСЛІДЖЕННЯ. ТЕХНІКО-ЕКОНОМІЧНА ЕФЕКТИВНІСТЬ ВПРОВАДЖЕННЯ КАВІТАЦІЙНОЇ ТЕХНОЛОГІЇ ПРИГОТУВАННЯ БІТУМНИХ ДОРОЖНІХ ЕМУЛЬСІЙ У ВИРОБНИЦТВО .....	 102
5.1 Методика інженерного розрахунку раціональних конструктивних та технологічних параметрів устаткування для приготування бітумних емульсій .....	102
5.1.1 Тепловий розрахунок кавітаційного устаткування для приготування бітумних дорожніх емульсій .....	102
5.1.2 Гідравлічний розрахунок кавітаційного устаткування для приготування бітумних емульсій .....	105
5.2 Технологічна схема приготування бітумних емульсій за допомогою кавітаційного диспергатора.....	107
5.3 Промислове впровадження розробленої технології та устаткування для виготовлення емульсій .....	109
5.4 Техніко-економічне обґрунтування доцільності впровадження кавітаційної технології у виробництво .....	111
5.5 Розрахунок собівартості бітумної емульсії, виготовленої на установці, що реалізує кавітаційну технологію емульгування бітуму .....	112
5.6 Розрахунок економічної ефективності створення кавітаційної технології виготовлення бітумних дорожніх емульсій .....	114
 ВИСНОВКИ.....	 117
 ЛІТЕРАТУРА .....	 119

## ПЕРЕЛІК УМОВНИХ СКОРОЧЕНЬ

ПАР	поверхнево активні речовини
ЕА	емульсія аніонна
ЕК	емульсія катіонна
ЕА-Ш	емульсія аніонна швидкорозпадна
ЕК-Ш	емульсія катіонна швидкорозпадна
ЕА-С	емульсія аніонна середньорозпадна
ЕК-С	емульсія катіонна середньорозпадна
ЕА-П	емульсія аніонна повільноозпадна
ЕК-П	емульсія катіонна повільноозпадна
ГЛБ	гідрофільно-ліпофільний баланс
БРТ	блок регулювання температури
РТ	ртутний термометр
РПА	роторно-пульсаційний апарат
КД	кавітаційний диспергатор
ККД	коефіцієнт корисної дії
ЧДД	Чистий дисконтний дохід

## ВСТУП

Бітум широко відомий загальноприйнятий органічний в'язучий матеріал. Виражені в'язко- та термопластичні властивості, доступність та відносно низька вартість бітуму зумовлюють його попит на ринку будівельних матеріалів і на сьогоднішній день. Але при нормальних умовах бітуми мають високу в'язкість, що ускладнює його використання як в'язучого. Найбільш розповсюджений спосіб зменшення в'язкості бітуму – розігрів до технологічних температур (гарячий спосіб), але він досить енергоємний, отримана продукція має обмежений період використання. Ефективним є також розрідження бітуму спеціальними леткими розчинниками, що мають досить велику вартість та випаровуються за відносно короткий термін. Технологія зниження в'язкості бітуму із застосуванням летких розчинників також має недолік, а саме: леткі сполуки забруднюють навколишнє середовище та підвищують пожежонебезпечність при виконанні робіт. Найбільш ефективним є емульгування бітуму у воді у присутності спеціальних речовин. Виготовлення бітумних емульсій є менш енергоємним способом зниження в'язкості порівняно із гарячим та екологічно безпечним, порівняно із розрідженням за допомогою спеціальних летких розчинників. У більшості промислово розвинутих країн світу все ширшого застосування набувають саме бітумні емульсії. Наприклад, у Франції понад 30 % використововуваного бітуму перетворюють в емульсії, а в Японії – майже 70.

Використання матеріалів на основі бітумних емульсій в будівництві досить різноманітне: як гідроізоляційний, покрівельний, антикорозійний, ґрунтувальний матеріал, мастика для затирання швів, приклеювальні мастики, шпаклівки, асфальтобетон, бітумно-мінеральні композиції та інше.

Одним із найважливіших чинників, що впливають на якість бітумної емульсії є технологія її виготовлення. Приготування бітумних емульсій вимагає спеціального обладнання, що дозволяє диспергувати взаємонерозчинні рідини, такі як бітум та вода. У переважній більшості існуючих бітумно-емульсійних установок як пристрої емульгування застосовуються колоїдні млини різних модифікацій, в яких складові компоненти вихідної сировини піддаються механічним та гі-

дродинамічним впливам. Використання колоїдних млинів потребує великих затрат енергії, установки мають велику металоємність та габарити, а тому їх застосування є не досить ефективним і вимагає подальшого вдосконалення.

Одночасно при механічній обробці в речовині акумулюється додаткова енергія – відбувається механічна активація речовини. Механічна активація суттєво впливає на фізико-хімічні властивості отриманої емульсії. Ступінь активації залежить від структури оброблюваної речовини, а також від величини та способу впливу механічних сил, які діють на неї.

Одним з перспективних способів приготування емульсій є кавітаційний. Цей спосіб набув широкого застосування в деяких галузях промисловості, зокрема, в харчовій, хімічній, нафтопереробній та інших. Завдяки гідродинамічним процесам, супутніх кавітації, відбувається ефективно диспергування взаємонерозчинних компонентів емульсії.

Таким чином, **актуальність цієї наукової роботи** полягає у подальшому розвитку, вдосконаленню і підвищенню ефективності технології та технічних засобів, що призначені для приготування бітумних емульсій, за рахунок емульгування бітуму у воді у присутності спеціальних речовин при застосуванні кавітаційного способу диспергування.

Метою роботи є розробка устаткування для кавітаційного способу приготування бітумних емульсій, яке має дистанційну систему керування параметрами диспергування, спрощене конструктивне виконання та мінімальні питомі енерговитрати.

Наукова робота виконана в НДІ гідродинаміки ВНТУ та на кафедрі ТГП Вінницького національного технічного університету.

# 1 АНАЛІЗ ВІДОМИХ ТЕХНОЛОГІЙ ТА УСТАТКУВАННЯ ДЛЯ ВИГОТОВЛЕННЯ ЕМУЛЬСІЙ БІТУМНИХ ДОРОЖНІХ

## 1.1 В'язучі на основі бітуму та напрямки їх застосування у будівництві

В'язучі речовини – це речовини, фізико-хімічні процеси в яких, призводять до їх переходу у твердий агрегатний стан. При переході з тістоподібного в каменеподібний стан, в'язучі речовини скріплюють між собою камені або зерна піску, гравію, щебеню та інших матеріалів, що робить їх незамінними у будівництві.

Жодне будівництво не обходиться без неорганічних (мінеральних) будівельних в'язучих (цемент, вапно, будівельний гіпс) – тонкоподрібнених мінеральних речовин, що здатні при перемішуванні з водою, утворювати пластичне тісто, що твердіє до каменеподібного стану. Не менш важливе значення у будівництві належить органічним в'язучим (бітуми, дьогті, природні смоли, клеї, полімери та синтетичні полімерні продукти).

Органічні в'язучі речовини – це високомолекулярні або синтетичні речовини, що здатні набувати рідкої в'язкої консистенції при нагріванні чи при дії розчинників, або вже у первинному стані знаходяться у рідкій в'язкій консистенції та протягом певного часу спонтанно або під дією певних факторів (температури, речовин-затверджувачів) переходять у твердий стан [43].

Органічні в'язучі істотно відрізняються від неорганічних. Вони мають кращі адгезійні властивості, їх міцність на стиск порівнянна із неорганічними матеріалами, а на розтяг і згин – у багато разів вища. Більшість з них є водо- та хімічностійкими. Серед недоліків, властивих цьому класу в'язучих, – міцність органічних речовин падає із підвищенням температури, вони мають низьку термостійкість, більшість з них це горючі речовини [43].

В будівництві органічні в'язучі широко використовуються для влаштування дорожніх покриттів, тротуарів, підлог, виготовлення рулонних мастичних і бітумоемульсійних паст, покрівельних і гідроізоляційних матеріалів. Вони застосовуються для захисту від корозії бетону, металів, а також від радіоактивних випромінювань [19, 68, 84].



Бітум є одним з перших органічних матеріалів, який почали застосовувати у будівництві. Історичні дані свідчать про використання бітумних матеріалів, ще в I тисячолітті до н. е.: «висячі» сади Семіраміди, тунель під Євфратом та інші [43].

Бітум – це складна суміш високомолекулярних вуглеводнів та смолисто-асфальтових речовин. Ідентифікація всіх складових бітуму на сьогодні є досить складною невирішеною задачею. Сировиною для бітуму є залишок після виготовлення паливно-мастильних матеріалів, відбору гудрону та крекінгу фракцій нафти. Серед способів виготовлення: атмосферно-вакумнаперегонка нафти (остаточні бітуми), окиснення нафтових залишків (остаточні бітуми) та змішування залишків, що утворилися після перегонки нафти (компаундовані бітуми) [46].

Бітуму властиві досить виражені в'язко-термопластичні властивості, що й зумовлює його широке застосування як в'язучого в будівництві.

Згідно з [46] бітуми поділяються на: дорожні (будівництво та реконструкція дорожнього покриття), покрівельні (при виготовленні різних видів покрівлі як просочувальний та покрівельний матеріал), ізоляційні (ізоляція трубопроводів від ґрунтової корозії), будівельні (як гідро- та теплоізоляційні матеріали).

Бітум доцільно використовувати при мінімально можливій в'язкості [19, 46]. Розрізняють такі способи розрідження – зменшення в'язкості бітуму [19]: розігрів бітуму до технологічних температур (гарячий спосіб), розрідження в'язких бітумів спеціальними, як правило, леткими розчинниками та емульгуванням бітуму в водній фазі у присутності спеціальних речовин (бітумні емульсії).

Перший спосіб використовується для виготовлення гарячих сумішей з попереднім нагрівом вихідних мінеральних матеріалів чи розливом гарячого бітуму на холодну поверхню при влаштуванні підґрунтовки чи проведенні поверхневої обробки. Цей спосіб має переваги та недоліки. До переваг слід віднести можливість отримання конгломерату (асфальтобетону) з високою міцністю, зокрема, при використанні високов'язких бітумів для доріг з важким та інтенсивним рухом, а до недоліків – витрати енергії на нагрів мінеральних матеріалів при виготовленні гарячих сумішей, обмежений термін застосування гарячої суміші, яка постійно охолоджується і потребує безперервного підігріву до технологічно необхідних температур у різноманітних будіве-

льних процесах. Окрім того, подібна технологія чинить негативний вплив на навколишнє середовище під час усього циклу виконання робіт [19].

В окремих випадках ефективним є також спосіб розрідження бітуму спеціальними леткими розчинниками. Цей спосіб має велику вартість через значну вартість розчинників, що випаровуються за відносно короткий термін. Таким чином, технологія зниження в'язкості бітуму із застосуванням летких розчинників має істотні недоліки, а саме: леткі сполуки забруднюють навколишнє середовище та підвищують пожежонебезпечність при виконанні робіт [19].

Найбільш ефективним є емульгування бітуму у водній фазі у присутності спеціальних речовин. Виготовлення бітумних емульсій таким способом є менш енергоємним порівняно із гарячим способом та екологічно більш безпечним порівняно із способом розрідження бітуму леткими розчинниками. Окрім того, застосування бітумних емульсій забезпечує [19, 61, 84, 100]:

- рівномірне розподілення в'язучого більш тонкими шарами на оброблюваній поверхні;
- хорошу текучість в'язучого;
- отримання спрощеної технології виконання робіт завдяки можливості використання емульсій в охолодженому стані;
- достатньо суттєве зменшення витрати бітуму;
- безпечність використання бітумних емульсій порівняно з в'язкими бітумами;
- виробництво емульсійно-мінеральних сумішей безпосередньо на місці будівництва;
- зниження транспортних витрат на перевезення матеріалів;
- повна реалізація властивостей ПАР (не руйнуються при нагріванні в момент введення в суміш).

## **1.2 Основні фізико-механічні властивості бітумних емульсій та вимоги до їх якості**

Бітумні емульсії є мікрогетерогенними дисперсними стабілізованими системами рідина–рідина [84]. Основні складові компоненти емульсії: бітум та вода.

В залежності від того, який з компонентів є дисперсним середовищем розрізняють прямі (типу «олія в воді» рис. 1.1.) та обернені емульсії (типу «вода в олії» (рис. 1.2.). В прямих емульсіях краплини дисперсної фази – бітуму оточені дисперсним середовищем – водою. В обернених емульсіях навпаки: бітум – дисперсне середовище, вода – дисперсна фаза [19, 61, 84].

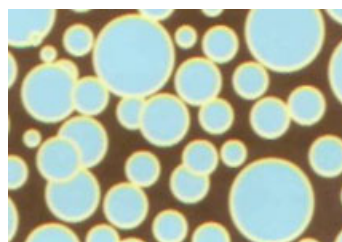
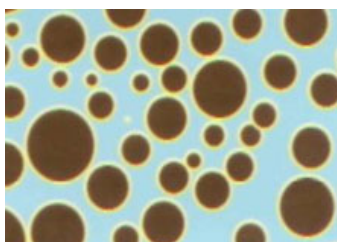


Рисунок 1.1– Емульсія «олія у воді»

Рисунок 1.2– Емульсія «вода в олії»

Для отримання прямої бітумної емульсії частка бітуму має бути в межах 30–70 %, при перевищенні вмісту бітуму більше ніж на 70 %, краплини деформуються, ущільнюються настільки, що частково починають прилипати одна до одної. Одночасно, вода у вигляді дрібних краплинок потрапляє до бітумного середовища, в результаті цього отримується обернена емульсія. Така емульсія вміщує від 70 % до 90 % бітуму, а її в'язкість наближається до в'язкості бітуму.

Оскільки обернені емульсії мають високу в'язкість, то в будівельній практиці найбільше розповсюдження отримали прямі емульсії.

Бітум та вода є взаємонерозчинними речовинами, тому для забезпечення стійкості системи використовують різноманітні емульгатори, що дозволяють стабілізувати емульсію та подовжити тривалість розшарування системи бітум-вода.

В залежності від емульгатора, що використовується для стабілізації емульсії розрізняють аніонні ЕА, катіонні емульсії ЕК і пасти.

Як катіонні емульгатори використовують поверхнево-активні речовини ПАР на основі похідних вищих аліфатичних амінів (моно-, ді-, поліамінів), а також солей четвертинних амонієвих основ. Емульгаторами аніонного типу є ПАР на основі солей (мил) вищих природних чи синтетичних карбонових жирних кислот (фракції  $C_{17} - C_{20}$ ,  $C_{21} - C_{25}$ ) або кубових залишків цих кислот. Для отримання паст використовують мінеральні порошкові матеріали (цемент, глина, вапно, сажа та інші) [30, 84].

Вибір того або іншого емульгатора впливає на адгезійні властивості емульсій. Так ЕА активно взаємодіють з гірськими породами, що вміщують СаО та MgO, та утворюють на їх поверхні водостійку плівку. Використання ЕА для кислих гірських порід (що вміщують SiO<sub>2</sub>) небажане, органічна плівка утворена емульсією цього типу недостатньо водостійка. Найбільш універсальними є ЕК, вони активно взаємодіють як з кислими так і з основними мінеральними матеріалами та утворюють міцну водонепроникну плівку, що і зумовило їх переважне використання в будівництві. Паста по відношенню до гірських порід є малоактивними в'язучими [19, 91, 97, 102].

В залежності від необхідних технологічних та експлуатаційних властивостей зв'язувального матеріалу емульсії можуть бути виготовлені на основі бітумів різної в'язкості як з використанням різноманітних добавок (розчинників, поверхнево-активних речовин, полімерів), так і без них [61, 91, 97, 102].

За наявності полімерного модифікатора емульсії поділяють на не модифіковані та модифіковані [30].

Одна з найважливіших характеристик бітумної емульсії є час розпаду [20, 61]. При розпаді дисперсна фаза відділяється від дисперсійного середовища, дисперсійне середовище випаровується, бітумні частинки прилипають до кам'яного матеріалу. Швидкість розпаду залежить від складу бітумної емульсії. Розрізняють емульсії, що швидко розпадаються (ЕА–Ш, ЕК–Ш), які застосовують для підґрунтовки, поверхневої обробки, просочування та при роботі з гудронаторами. Середньорозпадні емульсії ЕА-С та ЕК-С розпадаються повільно тому їх використовують як для приготування чорних сумішей, так і для просочування. Для оброблення дрібнодисперсних матеріалів середньорозпадні емульсії не використовують. У цьому випадку більш придатними є повільнорозпадні емульсії ЕА-П та ЕК-П [30, 68, 84].

Бітумні емульсії на основі дорожніх бітумів, що використовують як в'язучий та плівкоутворювальний матеріал при будівництві і ремонті автомобільних доріг, вулиць, мостів, шляхопроводів та інших інженерних споруд повинні відповідати вимогам ДСТУ Б В.2.7-129:2006 [30]. Покрівельні та гідроізоляційні мастики, що призначені для приклеювання рулонних покрівельних та гідроізоляційних матеріалів, влаштування захисних шарів покрівель, влаштування і ремонту мастичних покрівель, влаштування мастичних шарів гідроізоляції та пароізоляції

будівельних конструкцій будівель і споруд, мають відповідати вимогам ДСТУ Б В.2.7-108-2001 «Мастики покрівельні та гідроізоляційні. Загальні технічні умови» [51].

Серед основних вимог, що висуваються до бітумних емульсій і паст є: в'язкість, однорідність, стійкість при зберіганні та транспортуванні.

Розглянемо кожний з показників більш детально.

Стійкість – властивість емульсії певний час не розшаровуватися на окремі складові, що дає можливість зберігати та транспортувати бітумну емульсію. Як причини розшарування емульсії розрізняють агрегативну та седиментаційну нестійкість. Седиментаційна нестійкість виникає внаслідок дії на частинки дисперсної фази сил ваги. Тобто рідина, що має більшу в'язкість, осідає інша – розміщується зверху. Відбувається розшарування емульсії. Емульсії є тим більше седиментаційно стійкими, чим ближче густини обох фаз. Окрім того, седиментаційна стійкість може бути забезпечена звичайним перемішуванням через певний час, або при виникненні будь-яких незначних перепадів температури, внаслідок броунівського руху частинок [23, 77, 84].

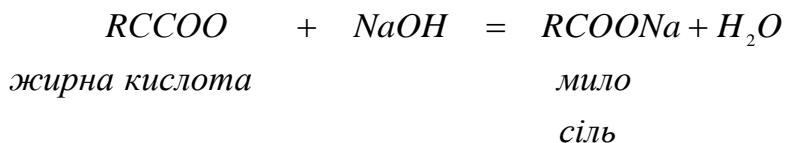
При механічній обробці компонентів емульсії, внаслідок подрібнення частинок дисперсної фази, збільшується міжфазна поверхня, а отже і наявний надлишок вільної поверхневої енергії. Частинки бітуму при цьому проявляють тенденцію до коалесенції (злипання), тобто виникає агрегативна нестійкість емульсії. Оскільки особливих складностей при усуненні седиментаційної нестійкості немає, то основна мета при виготовленні бітумних емульсій є усунення саме агрегативної нестійкості.

Агрегативна стійкість забезпечується високою дисперсністю емульсії та наявністю на частинках сольватної оболонки. Сольватна оболонка виникає внаслідок введення в бітумну емульсію емульгаторів, що при навіть незначній концентрації в речовині впливають на її поверхневий натяг.

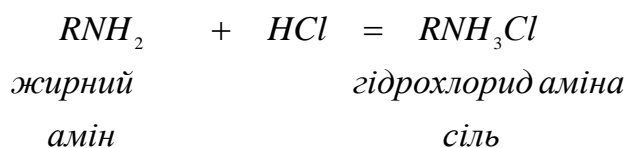
Вибір та концентрація того чи іншого емульгатора суттєво впливає агрегативну стійкість бітумної емульсії. ПАР у яких функціональні групи несуть позитивний заряд – активні в кислому середовищі та неактивні в лужному, тоді як ПАР із функціональною групою, що несе від'ємний заряд навпаки – активні в лужному, неактивні в кислому. Активність ПАР тісно пов'язана із омиленням (утворенням солей)

ПАР і іонів, тому найчастіше в технологічних процесах використовують саме солі емульгаторів.

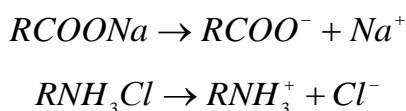
Так, жирні кислоти в лужному середовищі реагують з лугом до утворення мил:



Аміни у кислому середовищі омилюються кислотами:



У дисперсному середовищі солі дисоціюють на катіони та аніони:



В бітумних емульсіях емульгатор переміщується до поверхні розділу бітуму та води. Частинка бітуму неполярна. Гідрофобна частина молекули емульгатора зберігає взаємодію з поверхнею частинки бітуму, гідрофільна – розміщується у дисперсному середовищі – воді.

Гідрофобна частина емульгатора створює на поверхні краплинки плівку, яка має заряд. Знак заряду визначається зарядом гідрофобної або вуглеводневої частинки молекули емульгатора. Якщо гідрофобна частинка несе від'ємний заряд, то емульгатор аніонний, якщо додатний – катіонний.

Ефективність емульгатора оцінюють числом гідрофільно – ліпофільного балансу ГЛБ. Для забезпечення стійкості бітумної емульсії типу В/М ГЛБ емульгатора має бути в межах 3–6, для емульсії типу М/В ГЛБ – 8–13 [77].

Наступний показник – однорідність. Бітумна емульсія вважається однорідною, коли при зануренні скляної палички в готову бітумну емульсію на ній не виявляється крупних недиспергованих частинок бітуму [30, 68]. На однорідність впливає ефективність та тривалість механічної обробки компонентів емульсії у вузлі диспергування.

Знижена в'язкість емульсії дозволяє рівномірно, тонким шаром розподіляти бітумну емульсію на оброблювану поверхню, що дає можливість зменшити витрату гідроізоляційного матеріалу. Згідно з аналізом літературних джерел [23, 77, 89] на в'язкість бітумної емульсії впливають такі основні фактори: масові частки компонентів емульсії та дисперсність готової емульсії.

Отже, на всі перелічені властивості, окрім технології виготовлення, якості та співвідношення складових компонентів емульсії, суттєво впливає також і розмір часток дисперсної фази у дисперсному середовищі, тобто, дисперсність емульсії [28, 39]. Тому, регулювання ступеня подрібнення частинок бітуму у дисперсному середовищі дає можливість впливати на ті чи інші якісні характеристики бітумної емульсії.

### **1.3 Процес утворення бітумних дорожніх емульсій і сучасні технології та устаткування для їх приготування**

Приготування бітумних дорожніх емульсій передбачає такі етапи (рис. 1.3.) [18, 68, 84]:

1) підготовка бітуму:

– зневоднення при температурі 100–110 °С та очищення від сміття і мінеральних домішок;

– подальший підігрів до технологічної температури в межах 140 °С в залежності від марки бітуму (здійснюється з метою забезпечення рівності консистенцій бітуму та водного розчину емульгатора, що сприятиме якісному диспергуванню складових компонентів емульсії).

2) підготовка водного розчину емульгатора:

– підігрів до технологічної температури 70–90 °С (сума температур водного розчину та бітуму має бути не більшою 200 °С, інакше буде відбуватися спінення й викид складових із вузла емульгування);

– дозування емульгатора і кислоти (лугу) в розігріту воду та перемішування компонентів водного розчину емульгатора.

3) диспергування бітуму у водному розчині емульгатора за допомогою спеціального устаткування – диспергаторів.

4) видача готової продукції – бітумної емульсії.

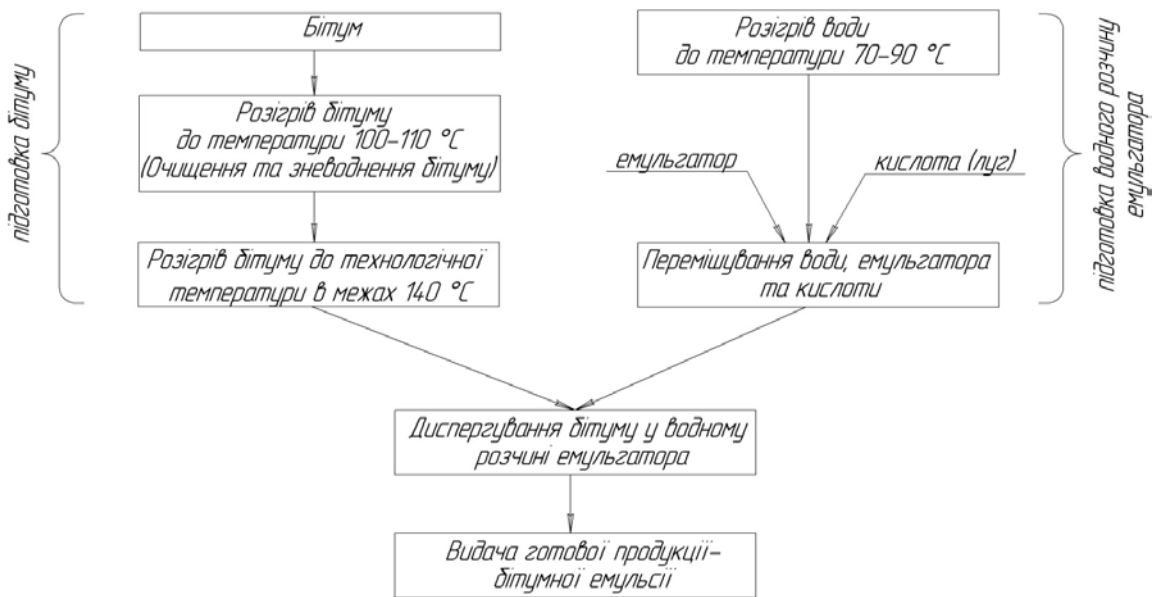


Рисунок 1.3 – Технологічна схема процесу приготування бітумної емульсії

Згідно з [68] для приготування бітумних емульсій можлива і інша технологія, яка передбачає введення емульгатора не в воду, а безпосередньо в бітум.

Технологічна схема приготування бітумної пасти наведена на рис. 1.4 [25, 68].

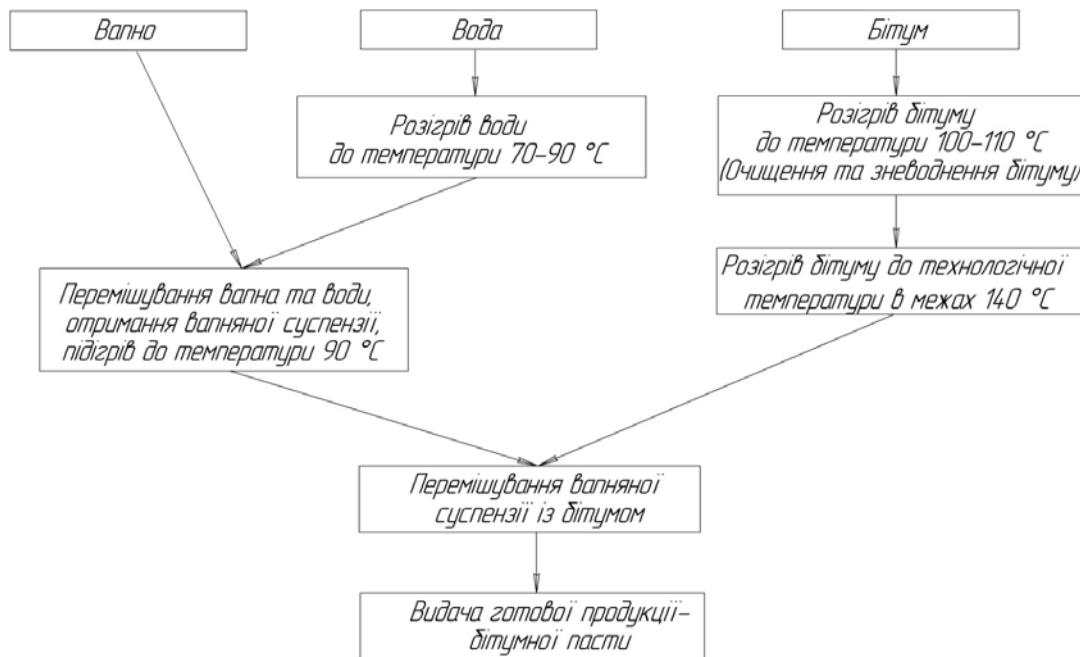


Рисунок 1.4 – Технологічна схема процесу приготування бітумної пасти



Згідно з [85] попереднє зневоднення бітуму не є обов'язковим.

Для приготування бітумної пасти використовують лопатеві асфальтобетонні змішувачі, розчино- та бетонозмішувачі [68].

Для приготування бітумної емульсії застосовується спеціальне обладнання. Розробку та впровадження установок для приготування бітумних емульсій проводять як в Україні, так і за її межами. Серед фірм-виробників такого устаткування найбільш відомі «MASSENZA» (Італія), «IKA WerkeGmbH» (Німеччина), «AkzoNobel» (Швеція), ООО «Давиал» (Росія), ДП НВЦ «Композит», ТОВ «Завод УКРБУДМАШ» (Україна) та багато інших [75].

Бітумно-емульсійні установки класифікують за способом дії, за видом системи дозування, за методом керування, за мобільністю (рис. 1.5.) [19, 68, 84].

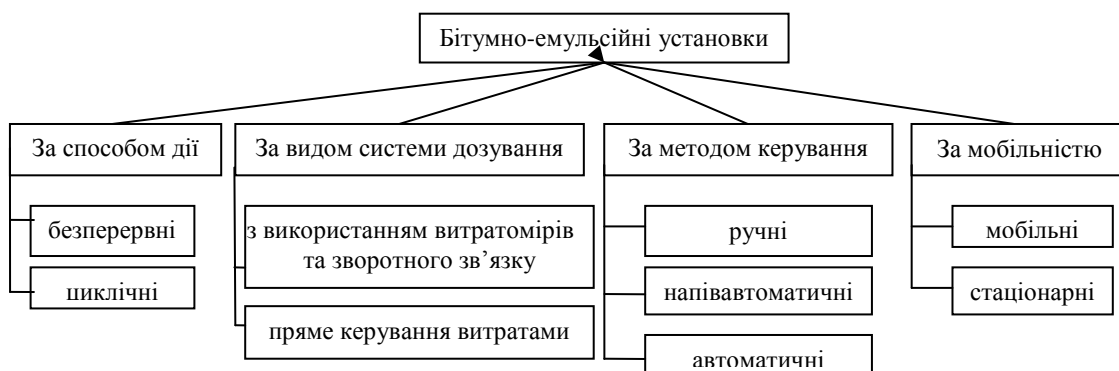


Рисунок 1.5 – Установки для приготування бітумної емульсії

Основні складові бітумно-емульсійних установок такі: вузли емульгування; витратні ємності хімікатів; бітумні котли, ємності для накопичення і збереження гарячого бітуму, готової продукції – емульсії; насосні агрегати для транспортування та дозування компонентів сировини і виготовленої емульсії, трубопровідні обв'язки. Вузол емульгування – основний вузол, в якому відбувається перемішування та диспергація компонентів утворюваної бітумної емульсії.

Бітумно-емульсійні установки також відрізняються між собою за способом емульгування бітуму. Розрізняють такі способи емульгування бітуму [19, 21, 28, 68, 84, 94]: механічний та хімічний.

Хімічне емульгування бітуму відбувається за рахунок гетерогенних хімічних реакцій, що відбуваються на межі розподілу фаз. Серед-

ній діаметр частинок бітуму бітумної емульсії, отриманої таким способом, біля 1 мкм вони також більш стійкі ніж отримані механічним способом емульгування. При хімічному емульгуванні витрачається приблизно в 10 разів менше механічної енергії, а теплової – в 1,5–2 рази [28, 84]. Серед недоліків цього способу – значна вартість поверхнево-активних речовин закордонного виробництва, що підвищує собівартість готової продукції.

При механічному емульгуванні дисперсну фазу піддають зовнішній дії механічних та гідродинамічних сил.

Механічне диспергування включає [19, 84]:

- подрібнення масиву оброблюваного середовища на окремі краплини;
- укрупнення окремих краплин внаслідок їх об'єднання (коалесценції);
- стабілізація краплин визначених розмірів;
- старіння вихідної продукції.

Згідно з [45, 48, 84, 96], процес емульгування рідких гетерогенних систем відбувається у 3 стадії.

На першій стадії краплинки рідини витягується в циліндр, збільшуючи поверхню дисперсної фази. На подолання сил поверхневого натягу витрачається певна робота.

Друга стадія настає, коли довжина витягнутих в циліндр краплин рідини стає більшою від довжини кола її перерізу, краплинки рідини стають нестійкими та розпадаються на більш дрібні краплинки сферичної форми. Зменшується поверхня та вільна поверхнева енергія.

На третій стадії одночасно відбуваються процеси коаліценції при зіткненні утворених краплин та їх диспергуванні. Краплини стають дрібнішими, а тому їх витягування ускладнюється. Збільшується капілярний тиск, дрібні краплини стають більш стійкими та не змінюють своєї форми. Диспергування відбувається не тільки при розтягуванні краплин, але й при невеликому їх стисненні.

Серед механічних способів диспергування бітуму:

- 1) емульгування стисненим повітрям (барботаж);
- 2) емульгування ультразвуком (акустичні диспергатори);
- 3) емульгування за допомогою механічних змішувачів (пропелерна, лопатева мішалка);
- 4) емульгування з використанням колоїдного млина.

Згідно з [28, 52, 84], при тривалій обробці високов'язких органічних речовин таких, як бітум, гудрон, мазут спільно з водою за допомогою стисненого повітря (барботажу) протягом 20–25 хв., середній розмір краплинок води оберненої емульсії складає наближено 60 мкм, а максимальний - 110–160 мкм. Барботаж доцільно використовувати, коли складові повітря (або будь-який інший газ) є однією з речовин, що вступає в реакцію, або потрібен для збудження біологічного процесу. Даний спосіб також використовують на підприємствах, де є надлишок стисненого повітря. Серед недоліків барботажу: даний спосіб емульгування використовують лише для малов'язких рідин (до  $200 \text{ мН}\cdot\text{с}/\text{м}^2$ ), має низький коефіцієнт корисної дії [89].

Схожі результати при виготовленні бітумної емульсії показав і акустичний диспергатор АД-2, дисперсність готової емульсії більше 50 мкм [28, 84]. Принцип емульгування за допомогою ультразвуку більш детально розписаний в пункті 1.4.

При обробці компонентів бітумної емульсії у механічному змішувачі протягом 10–40 хв. та швидкості 1500 об/хв середній діаметр крапель знаходиться в межах 12–18 мкм [28, 84].

Найкращі результати дає використання для емульгування бітуму колоїдних млинів. Дисперсність такої емульсії 3–4 мкм, а найбільший діаметр краплин не перевищує 6–8 мкм [28, 84].

Результати досліджень різних способів емульгування в залежності від дисперсності виготовленої бітумної емульсії представлені на рис. 1.6. Порівняльна характеристика найбільш розповсюджених бітумно-емульсійних установок, що реалізують різні способи емульгування наведена в таблиці 1.1 [68, 84].

Як показав порівняльний аналіз серед способів емульгування бітуму, використання колоїдного млина є більш раціональним, тому пристрій емульгування у більшості бітумно-емульсійних установок – колоїдний млин (рис. 1.7) та його різні модифікації, причому, принцип дії цих установок залишається аналогічним.

Основні складові колоїдного млина – ротор і статор. Суміш води з бітумом надходить до пристрою емульгування, проходить через зазор між нерухомим статором та рухомим ротором, в якому піддається ряду механічних і гідродинамічних впливів: зрізуючих та розтягуючих навантажень, механічних контактів із робочими частинами обладнання, великих зсувних напружень, пульсації швидкості та тиску потоку

рідкого середовища, розвинутої турбулентності потоку рідини тощо. На виході з вузла емульгування отримується готова бітумна емульсія

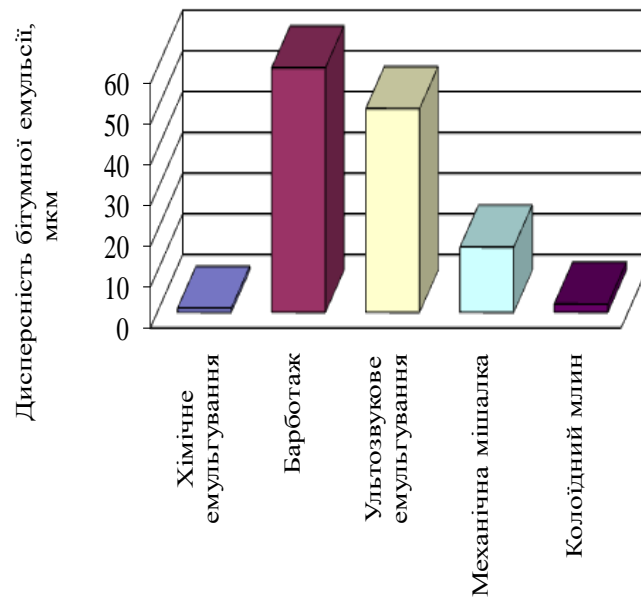


Рисунок 1.6 – Дисперсність бітумної емульсії в залежності від способу її отримання

Таблиця 1.1 – Порівняльні характеристики існуючого устаткування для приготування емульсій

Бітумно-емульсійна установка	Метод емульгування	Продуктивність, т/год	Дисперсність, мкм	Потужність електродвигуна, кВт
Акустичний диспергатор АД	Ультразвукова обробка компонентів	7	50	6
Лопатева мішалка	Обробка компонентів за допомогою механічної мішалки	3	12–18	2,8
MASSENZA Embac 4000x2AB-SK (Італія)	Обробка компонентів за допомогою колоїдного млина	5–6	3–4	7,5

необхідної дисперсності, яка готова до використання [20, 26, 28, 52, 84]. Застосування колоїдного млина для емульгування бітуму значно ускладнює конструкцію установки, збільшує її металоємність. Окрім того, у цій конструкції бітумно-емульсійної установки споживається додаткова електроенергія на обертання ротора колоїдного млина у вузлі емульгування.

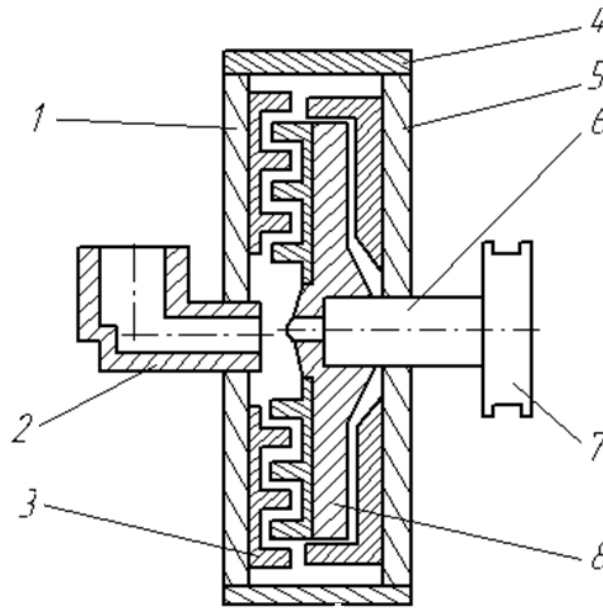


Рисунок 1.7 – Принципова схема колоїдного млина [30, 74]: 1 – статор, 2 – трубопровід для підведення сировини, 3 – зубці стаціонарні, 4 – корпус, 5 – кришка, 6 – вал, 7 – шків, 8 – робоче колесо із зубцями

Останнім часом велику увагу науковців привертає використання нетрадиційних методів змішування взаємонерозчинних компонентів, в основу яких покладені гідродинамічні явища та процеси, що відбуваються в системі дисперсна фаза – дисперсне середовище. Одним з таких методів є створення вимушеної кавітації.

#### **1.4 Аналіз існуючого кавітаційного обладнання в технологічних процесах виготовлення емульсій в різних галузях промисловості**

При механічній обробці рідких середовищ в окремих ділянках обладнання інколи спостерігається таке явище як кавітація. Кавітація – розрив суцільності потоку крапельної рідини під дією розтягувального напруження, що виникає в ній при зниженні тиску. Початкові дослідження віднесли зародження кавітації до небажаних явищ [45, 48,

52, 96]. Опубліковано низку наукових робіт з запобігання цього явища [17, 59, 67, 83]. В процесі дослідження вчені запропонували використовувати руйнівні властивості кавітації для інтенсифікації багатьох технологічних процесів, зокрема, масообмінних, таких як утворення однорідної суміші із взаємонерозчинних гетерогенних середовищ [39, 70, 83, 91]. При розриві суцільності у середовищі крапельної рідини утворюються порожнини – кавітаційні бульбашки, які заповнені паром, газом чи їх сумішшю. При лопанні кавітаційних бульбашок виникають кумулятивні мікроструминки та відбувається розпад останніх на мікрівихорі досить великої інтенсивності, що дозволяє отримувати високу (аж до молекулярного рівня) однорідність незмішуваних оброблюваних рідин [70, 74, 101].

Як показав аналіз реальних конструктивних рішень бітумно-емульсійних установок, що здійснюють кавітаційну обробку компонентів бітумної емульсії, не існує, тому розглянемо обладнання, яке застосовують у хімічній, харчовій та інших галузях промисловості.

Умовно устаткування, що здійснює кавітаційну обробку рідких гетерогенних середовищ, можна розділити на два класи [83]:

- 1) апарати, що забезпечують утворення кавітаційних бульбашок із зародків кавітації при інерційному впливі на рідке середовище;
- 2) апарати, що забезпечують створення кавітаційних бульбашок в зонах нестационарного замикання суперкаверн, які виникають при обтіканні різноманітних кавітаторів.

До першого класу устаткування відносяться гідродинамічні випромінювачі, принцип роботи яких полягає у генеруванні ультразвукових коливань, які приводять до виникнення ультразвукової кавітації. У кожному частотному діапазоні використовується специфічний генератор коливань. На низьких частотах (10–5000 Гц) використовують електромагнітні чи механічні генератори. На частоті 5–50 Гц працюють магнітострикційні генератори. На більш високих частотах використовують п'єзоелектричні генератори [81]. До цього класу також відносяться і роторно-пульсаційні апарати (РПА), дезінтегратори, дезмембратори, віброкавітаційні млини та інше. Оброблюване середовище в такому обладнанні піддається різного роду впливам : стирання, вібрації, пульсації та додатково супроводжується кавітацією. Окрім того, для інтенсифікації технологічних процесів застосовують різно-

манітні мішалки, які працюють на великих обертах із утворенням бульбашкової кавітації на лопатях.

Одним з основних недоліків, властивих устаткуванню першого класу, є кавітаційна ерозія робочих деталей обладнання – частина утворених кавітаційних бульбашок лопають безпосередньо на поверхнях обладнання. Другим суттєвим недоліком є слабкий ступінь регулювання інтенсивності кавітаційної обробки. Процеси кавітаційно-кумулятивної обробки інтенсифікуються підвищенням статичного тиску, підбором оптимальної температури та газовмісту, в'язкостю, частотою коливань тощо [26, 42, 52, 83].

До другого класу обладнання відносяться різноманітні суперкавітуючі апарати. Суперкавітація (СК)-утворення за тілом, що обтікається рідиною, єдиної порожнини – каверни, заповненої газом та парою. За способом створення суперкаверн в потоці рідини розрізняють: статичні апарати – за допомогою нерухомих статичних кавітаторів у вигляді конусів, пластин, гвинтових коліс із лопатями СК-профілю; динамічні – шляхом обертання СК-крильчаток, що працюють у режимі насоса або турбіни; струменеві – за допомогою зустрічних струменів та комбіновані [56, 83].

До динамічних СК-апаратів відносяться:

– СК-насоси, що перекачують та одночасно обробляють рідкі середовища (рис. 1.9.);

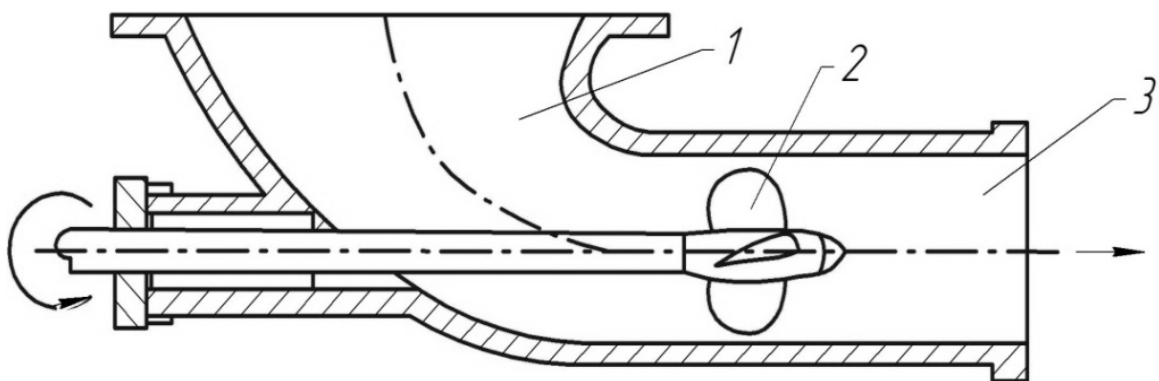


Рисунок 1.9 – Конструктивна схема СК насоса (осьовий насос) [45, 83]:

1 – завантажувальна камера; 2 – СК-крильчатка; 3 – камера кавітаційної обробки

– СК-турбіни, в яких кавітаційне оброблення рідких середовищ відбувається у трубопроводах за рахунок використання енергії технологічних потоків;

– СК-мішалки, що використовують для кавітаційно-кумулятивної обробки рідких середовищ в об'ємі апарату. Робочі органи СК - мішалок подібні до коліс СК-насосів.

Серед статичних СК-апаратів розрізняють:

– СК-статичні змішувачі, що нерухомо встановлюють в трубопроводах чи циркуляційних контурах. СК-статичні змішувачі використовують енергію технологічних потоків. Конструкція їхніх робочих органів близька до конструкції коліс осьових СК-насосів;

– СК-апарати із симетрично розміщеними відносно осі кавітаторами у вигляді дисків, конусів, різноманітних тіл обертання тощо (рис. 1.10).

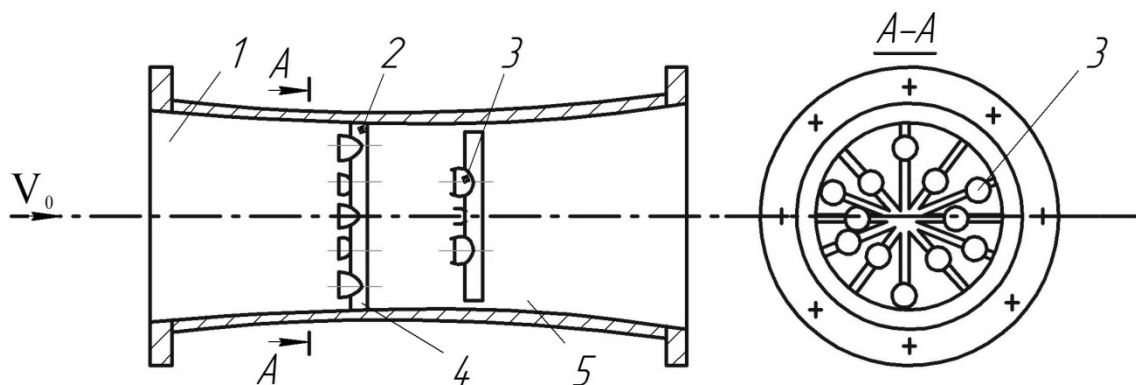


Рисунок 1.10 – СК - апарат із симетрично розміщеними відносно осі кавітаторами:  
1 – конфузор; 2 – проточна камера; 3 – кавітатори; 4 – решітки; 5 – дифузор

Струменеві апарати є : статичні – робочі органи яких сопла встановлені проти потоку рідини; динамічні – сопла обертаються на зустріч основному круговому потоку та пульсаційно-струменеві, в який може пульсувати як основний потік, так і потік струминного кавітатора [83].

Окрім того, можливі різноманітні комбінації наведених апаратів.

Принцип роботи СК-апаратів полягає в утворенні за кавітаторами суперкаверни, нестационарна хвостова частина якої генерує кавітаційні бульбашки, лопання яких відбувається на деякій відстані від робочих частин кавітаторів, що дозволяє уникнути кавітаційної корозії і



забезпечити їхню надійну роботу. В СК-апаратах кількість і розміри кавітаційних бульбашок не залежать від фізичних параметрів рідини, тобто від кількості кавітаційних зародків. Регулювання інтенсивності кавітаційної обробки здійснюється створенням оптимальних умов для утворення суперкаверни із нестационарною хвостовою частиною. Окрім того, більшість СК-апаратів не потребує додаткової енергії на реалізацію кавітаційної технології обробки гетерогенних середовищ, оскільки достатньо енергії технологічного потоку, що знижує енергоємність самого процесу приготування емульсій. [45, 83]. Таким чином, використання подібних кавітаційних пристроїв для приготування емульсій таких як бітумна є перспективним.

### **1.5 Аналіз відомих теоретичних та експериментальних досліджень робочих процесів у кавітаційних диспергатора**

Кавітаційна обробка гетерогенних середовищ, що сприяє перемішуванню, емульгуванню, диспергуванню, активації, а також інтенсифікації багатьох інших технологічних процесів, можлива завдяки низки гідродинамічних процесів супутніх кавітації [2, 22, 45, 90, 91, 100]:

- виникнення інтенсивних полів тиску (~1000 атм) та хвиль розрідження–стиснення під час пульсації та лопання парогазових каверн і бульбашок;
- утворення кумулятивних мікроструминок (діаметром 30–70 мкм, зі швидкістю 100–200 м/с та більше) в асиметричному полі тиску на кінцевій стадії лопання каверни;
- виникнення турбулентних зон у потоці оброблюваної рідини, що заповнені вихорами та лопаючими бульбашками інфразвукового й ультразвукового діапазону частот.

Чинники, що сприяють подрібненню дисперсної фази при приготуванні емульсій наведені на рисунку 1.11.

Основним параметром, що характеризує кавітацію, є число кавітації [74, 78]

$$\chi = 2 \frac{p - p_n}{\rho V^2}, \quad (1.1)$$

де  $p$  – гідростатичний тиск потоку рідини;  $p_n$  – тиск насиченої пари рідини;  $\rho$  – густина рідини;  $V$  – швидкість рідини.

Згідно з (1.1), необхідне число кавітації забезпечується збільшенням швидкості або зменшенням тиску потоку рідини. Окрім того, кавітаційний диспергатор повинен забезпечувати падіння тиску до деякого критичного значення, при якому у потоці рідини починають утворюватися кавітаційні бульбашки, що є порогом кавітації [74]

$$p_{кр} = p_n - \frac{4}{3\sqrt{3}} \frac{\sigma}{R_0} \sqrt{\frac{2\sigma}{R_0 \left( p_0 - p_n + \frac{2\sigma}{R} \right)}}, \quad (1.2)$$

де  $p_n$  – тиск насиченої пари рідини;  $p_0$  – початковий тиск всередині бульбашки;  $\sigma$  – коефіцієнт поверхневого натягу рідини;  $R_0, R$  – початковий і поточний радіус бульбашки.

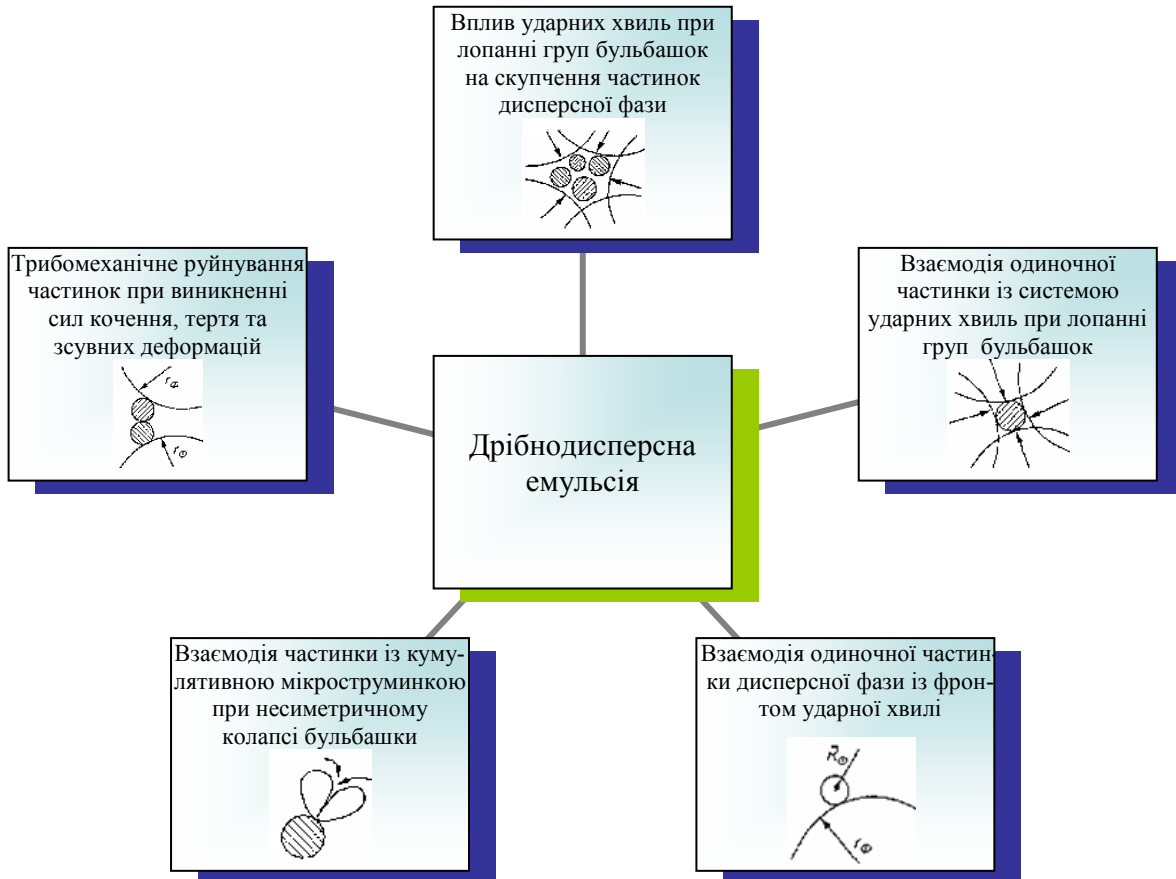


Рисунок 1.11 – Чинники, що викликають подрібнення дисперсної фази

В потоці рідини завжди присутня певна кількість газів, бульбашки якого є зародками кавітації. На ділянках робочого обладнання, в яких тиск рідини наближається до тиску насиченої пари відбувається адіабатне кипіння. При цьому утворюються парові бульбашки [74]. В міру досягнення критичного тиску радіус окремих парогазових бульбашок збільшується до деякого значення [38]

$$R_{кр} = \sqrt{3R_0 \sqrt{(R_0/2\sigma) (p_\infty - p_n + 2\sigma/R_0)}}, \quad (1.3)$$

де  $p_\infty$  – гідростатичний тиск у рідині, Па.

Заповнені парою, газом або їх сумішшю кавітаційні бульбашки радіусом  $R_{кр}$ , потрапляючи в область підвищеного тиску, лопаються, що супроводжується виникненням ударних імпульсів тиску, які досягають  $10^3$  МПа та супроводжуються підвищенням температури майже до  $1000^\circ\text{C}$  та електричними розрядами [38, 45, 48, 69].

Сумарна механічна енергія дозуючих насосів, що постачають оброблювану рідину до вузла емульгування, перетворюється в енергію рідини (кінетичну та потенціальну). Частина енергії рідини в кавітаторі переходить у теплову енергію [22]. В зоні кавітації, яка утворюється за кавітатором, статичний тиск знижується до тиску насиченої пари, що сприяє розриву суцільності рідини (кавітації). Відповідно, енергія, що витрачається на гідравлічний розрив [22]

$$E_p = \sum_{i=1}^n E_{pi}, \quad (1.4)$$

де  $E_{pi}$  – величина енергії на утворення 1 бульбашки пара, Дж.

Згідно з Релеєм [22]

$$E_{pi} = 4 \pi R_{газ}^2 \sigma + \frac{4}{3} \pi R_{газ}^3 P_0 + \frac{4}{3} \pi R_{газ}^3 P_{газ}, \quad (1.5)$$

де перший доданок – це енергія на утворення вільної поверхні бульбашки, другий – енергія утворення порожнини бульбашки, а останній – енергія заповнення бульбашки парою.

Окрім того, частина потенціальної енергії трансформується в енергію адіабатного стиснення бульбашок в зоні підвищеного тиску та в кумулятивну струминку, що виникає при лопанні бульбашки [22, 41]. Внаслідок втрат енергії на стиснення бульбашки в енергію удару перетворюється не більше 0,01 % потенціальної енергії.

Згідно з [52], енергія руйнівної дії однієї бульбашки

$$E_{p.kp} = 0,5 \frac{\sigma_m^2}{E}, \quad (1.6)$$

де  $\sigma_m$  і  $E$  – відповідно межа міцності та модуль пружності матеріалу.

Перепад тиску у рідині забезпечується шляхом збільшення місцевих швидкостей потоку крапельної рідини, що обумовлено особливою конструкцією кавітаційного диспергатора.

Згідно з [52], тривалість лопання кавітаційної бульбашки в декілька разів менша ніж тривалість її зростання. Тривалість лопання парогазової бульбашки визначається згідно з формулою Релея [41]

$$\tau_c = 0,915 R_{max} \sqrt{\rho/p_\infty}. \quad (1.7)$$

Таким чином, аналіз рівняння (1.7) показав, що на тривалість процесу кавітаційної обробки істотний вплив має густина оброблюваної рідини та гідродинамічний тиск потоку рідини, що обробляється. Експериментальні дослідження динаміки лопання кавітаційної бульбашки підтвердили припущення зменшення тривалості лопання та збільшення інтенсивності ударних хвиль із збільшенням гідростатичного тиску, але до певного значення [69, 70].

Опір зростанню парогазової бульбашки чинить приєднана маса рідини, статичний тиск та тиск поверхневого натягу. Згідно з [45], тиск всередині бульбашки

$$p_\sigma = \left( p_1 + \frac{2\sigma}{R_0} - p_d \right) \left( \frac{R_0}{R} \right)^3 + p_d. \quad (1.8)$$

Істотний вплив на тиск всередині бульбашки на момент лопання має газовміст  $\alpha$  [69]:

$$p_{max} \cong p_\infty / (81\alpha^3). \quad (1.9)$$

Із збільшенням температури оброблюваного потоку рідини тиск всередині кавітаційної бульбашки, що обумовлений тиском пари та газу, який вміщується в ній, суттєво збільшується. Це сприяє збільшенню області кавітації [49]. Згідно з [28], максимальний тиск всередині бульбашки в залежності від прийнятих граничних умов коливається в межах 20 – 100 МПа.

На підставі аналізу фізики процесу кавітаційної ерозії Тірувенгадам описує її такими виразами [45]:

для сферичної ударної хвилі

$$\theta = \frac{\chi}{\delta} \sqrt{\Delta\chi} \exp\left[\frac{2}{3} \frac{p}{Q_0} - \frac{2,67}{We(\Delta\chi)}\right], \quad (1.10)$$

для удару струминки

$$\theta = \frac{\chi}{\delta} \sqrt{\Delta\chi} \exp\left[-\frac{2,67}{We(\Delta\chi)}\right], \quad (1.11)$$

для гідравлічного удару

$$\theta = \frac{\chi}{\delta M} \sqrt{\Delta\chi} \exp\left[-\frac{2,67}{We(\Delta\chi)}\right], \quad (1.12)$$

де  $\theta = I_e / (0,5\rho V^2)$ ;  $I_e$  – інтенсивність ерозії,  $I_e = p_i R_i f$ , тут  $p_i$  – тиск удару,  $f$  – частота удару,  $R_i$  – радіус ударної хвилі;  $\delta = d/l$  – відносний розмір бульбашки ( $d$  – діаметр ядра,  $l$  – довжина каверни);  $We = (0,5V^2 d) / \sigma$  – число Вебера;  $\Delta\chi = \chi_1 - \chi$  – ступінь кавітації;  $\chi_1 = (p - p_a) / 0,5V^2$  – критичне число кавітації (початок кавітації);  $M = V/a$  – число Маха ( $a$  – швидкість звуку);  $Q_0$  – парціальний тиск неконденсованого газу у бульбашці перед початком лопання.

Одним з факторів, що впливають на фізико-механічні властивості емульсій та суспензій, є розмір частинок дисперсної фази. При кавітаційній обробці компонентів емульсії чи суспензії вихідний розмір частинок залежить від низки факторів, серед яких: концентрація дисперсної фази, концентрація парогазових бульбашок, режим руху потоку рідини, число кавітації, тиск, швидкість, час обробки рідкого середовища, початкові розміри частинок дисперсної фази тощо.

Ступінь механічної активації отриманої продукції залежить від кінцевих розмірів частинок дисперсної фази [45]

$$\varepsilon = AR_{\phi}g \left[ 1 - \left( -\frac{C}{R_{\phi}}\tau \right) \right], \quad (1.13)$$

де  $\varepsilon$  – ступінь механоактивації;  $A$ ,  $C$  – коефіцієнти, що враховують фізико-хімічні властивості матеріалу;  $g$  – швидкість питомого енергопідведення;  $\tau$  – тривалість обробки;  $R_{\phi}$  – кінцевий розмір частинок дисперсної фази.

У свою чергу ступінь подрібнення частинок дисперсної фази  $i$  залежить від початкового розміру частинок  $R_{\phi}^0$ , питомого енергопідведення  $E$  та тривалості обробки сировини  $\tau$  [45]

$$E = A_1 \cdot i \cdot \exp \left[ \frac{b}{R_{\phi}^0} i \tau \right], \quad (1.14)$$

де  $A_1$  та  $b$  – коефіцієнти, що визначають фізико-механічні властивості матеріалу.

Досить важливим фактором, що впливає на кінцевий розмір часток дисперсної фази є густина дисперсної фази та дисперсного середовища. У випадку, коли дисперсна фаза має більшу густину ніж густина дисперсного середовища, то більш важкі краплинки будуть відкидатися від центра вихору та не будуть зазнавати диспергуючої дії несферичного лопання каверни. Процес емульгування буде відбуватися завдяки градієнту тиску та швидкості, інтенсивних полів інфра- та ультразвукового діапазону частот, що супроводжують кавітацію. Але розміри утворених частинок будуть дещо більші, ніж у випадку однакових густин дисперсної фази та середовища [18].

## **2 ВИБІР ТА ОБҐРУНТУВАННЯ РАЦІОНАЛЬНИХ НОВИХ ПРИНЦИПОВИХ ТА КОНСТРУКТИВНИХ СХЕМ УСТАТКУВАННЯ ДЛЯ ПРИГОТУВАННЯ ЕМУЛЬСІЙ БІТУМНИХ ДОРОЖНІХ**

### **2.1 Основні вимоги та критерії до вибору принципів та конструктивних схем устаткування для приготування бітумних емульсій**

Поставлена задача полягає в створенні низки можливих принципів схем і варіантів конструктивного виконання устаткування для приготування бітумних емульсій, що здійснюють кавітаційним способом емульгування бітуму.

З розглянутого у попередньому розділі кавітаційного обладнання для приготування емульсій, що застосовується у інших галузях промисловості, найперспективнішими виявилися СК-апарати із симетрично розміщеними відносно осі кавітаторами у вигляді різноманітних тіл обертання. Принцип роботи цього обладнання полягає у створенні суперкавітаційної каверни за кавітатором за рахунок енергії технологічного потоку. Нестаціонарна хвостова частина каверни генерує кавітаційні бульбашки, лопання яких сприяє ефективному диспергуванню складових компонентів емульсії.

Основними критеріями, які необхідно реалізувати у новому принциповому та конструктивному виконанні устаткування для приготування бітумних емульсій:

- простота і надійність роботи кавітаційного диспергатора при відносно малій металоємності, невеликій вазі та габаритах, а також незначних питомих енерговитратах;
- забезпечення необхідних гідродинамічних параметрів: продуктивність, тиск на вході в кавітатор та необхідного конструктивного виконання самого кавітатора, які сприятимуть виникненню вимушеної кавітації в потоці сировини;
- дотримання технологічних вимог щодо приготування бітумних емульсій: встановлення оптимальної згідно з рекомендаціями, температури бітуму, водної фази, сировини на вході в кавітаційний диспергатор, рівня рН водної фази, дотримання рекомендованого співвідношення складових компонентів емульсій;

- отримання готової продукції – бітумної емульсії, що відповідає вимогам встановленого ДСТУ Б В.2.7-129:2006;
- можливість регулювання інтенсивності кавітаційної обробки вихідної сировини, що дасть змогу отримувати готову продукцію заданої дисперсності;
- можливість застосування устаткування для приготування бітумних емульсій як у стаціонарному, так і у мобільному виконанні.

Розглянемо окремі можливі принципові та конструктивні схеми устаткування для приготування бітумних емульсій, які розробляються і досліджуються у Вінницькому національному технічному університеті за участю авторів.

## **2.2 Принципові та конструктивні схеми устаткування для приготування емульсій бітумних дорожніх**

В науково-дослідній лабораторії гідродинаміки Вінницького національного технічного університету за участю авторів розробляються і досліджуються установки для диспергування гетерогенних середовищ. Для розробки реальних конструкцій, зокрема, установок для приготування бітумних емульсій, які забезпечують отримання готової продукції із необхідними технологічними параметрами, необхідно попередньо розглянути можливі принципові схеми їх виконання.

Як зазначалося раніше у розділі 1, основними складовими частинами установок для приготування емульсій є вузол емульгування; витратні ємності хімікатів, ємності для накопичення та збереження гарячого бітуму, готової продукції – емульсії; насосні агрегати для транспортування та дозування компонентів сировини та виготовленої емульсії, трубопровідні обв'язки. Блок-схема типової емульсійної установки представлена на рис. 2.1.

Головну роль у процесах гомогенізації гетерогенних середовищ таких як бітумна емульсія в установках для приготування емульсій відіграє саме вузол емульгування.

В НДЛ гідродинаміки ВНТУ спільно з ДП НВЦ «Композит» (м. Київ) розроблена конструкція установки для приготування бітумної емульсії, в якій вузол емульгування представлений кавітаційним диспергатором. Принципова схема запропонованої нами установки для приготування бітумної емульсії показана на рис. 2.2 [8, 5].



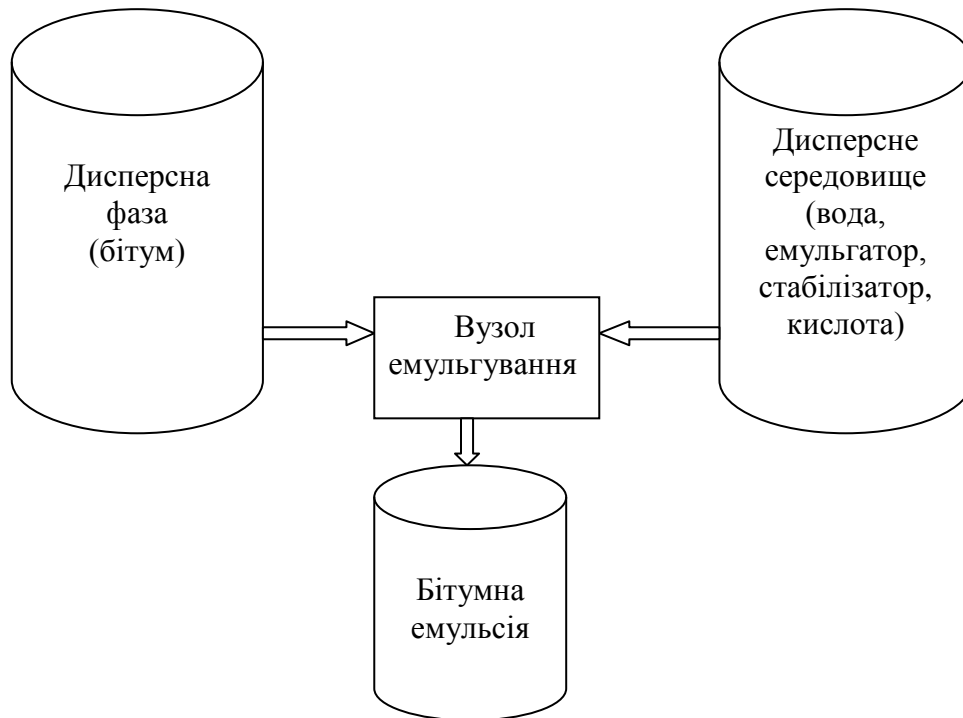


Рисунок 2.1 – Блок-схема емульсійної установки

Установка складається із ємностей для зберігання компонентів бітумної емульсії, трубопроводів – напірних ліній, якими з’єднані насосні агрегати із вузлом емульгування. В установці передбачається підігрів та зовнішня теплоізоляція.

Працює запропонована установка таким чином.

У ємність з водяною фазою 2 з ємностей 3, 4, 5 по трубопроводах за допомогою насосів - дозаторів 8, 9, 10 подаються емульгатор, кислота та стабілізатор [8, 11, 62].

Бітумний та водяний вузли установки попередньо прогрівають. Крани водяний і бітумний вхідний, кран водяний і бітумний байпасний та запірні вентиля встановлюються у відкритому положенні. Бітумний та водяний насоси 6 та 7 при цьому працюють, а триходові крани встановлені у положенні подачі на байпас, при якому компоненти по лініях повернення подаються в ємності 1 та 2. По досягненню бітумом та водною фазою необхідного температурного режиму, частково відкривається випускний кран на подачу бітумної емульсії на склад готової продукції та, після вирівнювання тисків води та бітуму, переключасться трьохходовий кран, а після 1 – 2 секунд триходовий кран на подачу компонентів у вузол емульгування 11.

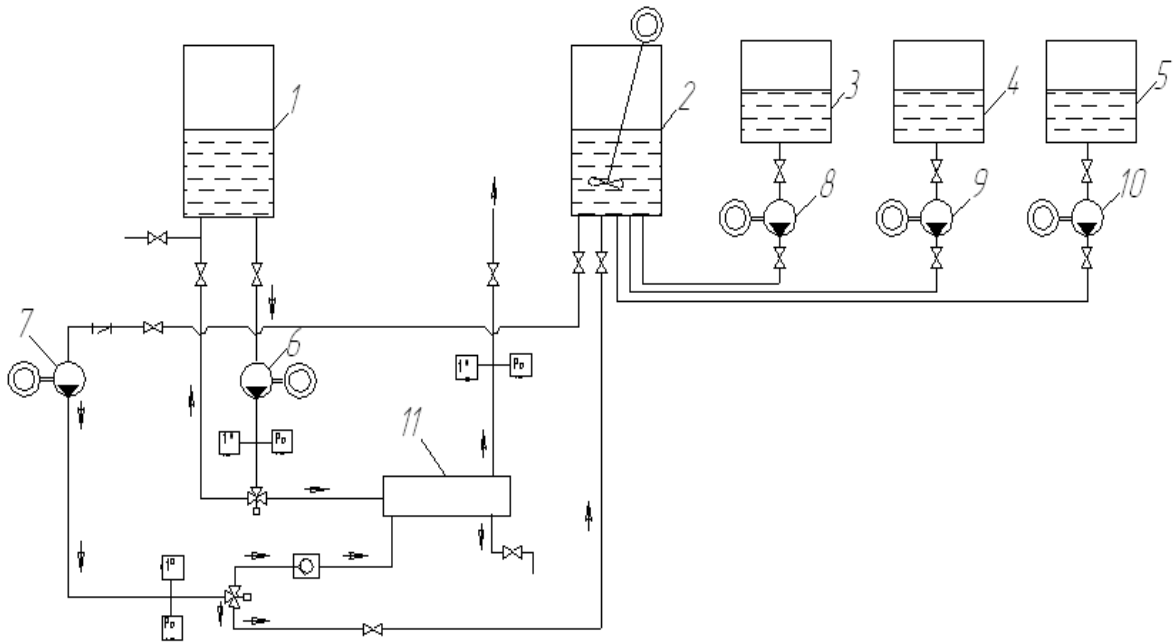


Рисунок 2.2 – Принципова схема установки для приготування бітумних емульсій

Окрім того, нами запропоновано декілька варіантів конструкцій вузла емульгування.

Принципова схема вузла емульгування I наведена на рис. 2.3 [13, 63].

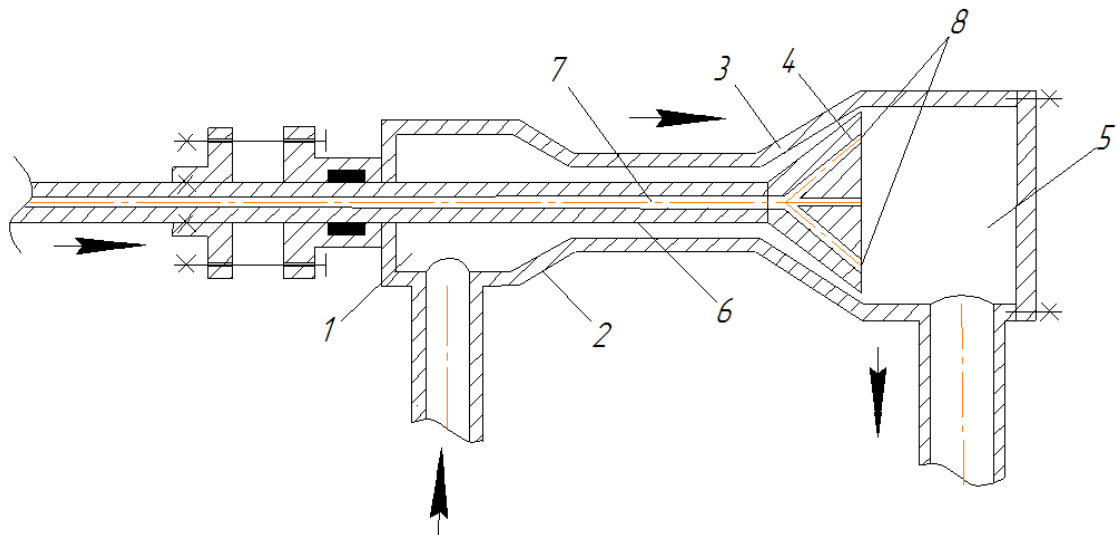


Рисунок 2.3 – Конструктивне виконання вузла емульгування I

Вузол емульгування складається з акумулюючої камери 1, конфузорної 2 та дифузornoї 3 частин, які з'єднані між собою трубопроводом меншого діаметра, конусоподібного робочого органу 4 та змішувальної камери 5. Регулювання зазору між конічною поверхнею кону-

соподібного робочого органа диспергатора 4 та внутрішньою поверхнею конфузора здійснюється за допомогою натяжного стержня 6, один кінець якого приєднаний до робочого органу кавітатора, а інший жорстко приєднаний до основи, що механічно закріплена на корпусі кавітатора. В середині натяжного стержня виконано основний 7 та допоміжні 8 канали для подачі водного розчину із технологічних наповнювачів в зону кавітації змішувальної камери.

Рідкий бітум надходить до акумулюючої камери 1 після якої рух бітуму прискорюється внаслідок зменшення прохідного отвору у конфузорній 2 частині кавітатора. При проходженні рідкого бітуму крізь зазор між конічною поверхнею конусоподібного робочого органу 4 диспергатора та внутрішньою поверхнею конфузора у змішувальній камері 5 виникає перепад тиску, що і сприяє виникненню кавітації. Завдяки кавітаційному процесу відбувається безперервне приготування бітумної емульсії із необхідними вихідними якісними параметрами. Далі емульсія подається в ємність готового продукту.

Регулювання зазору між конічною поверхнею підпружиненого конусоподібного робочого органу 4 та поверхнею дифузора дає можливість підібрати необхідну швидкість та тиск оброблюваного середовища для забезпечення оптимальних умов створення гідродинамічної кавітації.

Наведений вузол емульгування здійснює диспергування бітуму без сторонніх приводних механізмів, без додаткових витрат механічної енергії на рух рухомих частин диспергатора та мають спрощену конструкцію порівняно із відомими установками.

Серед недоліків цієї конструкції вузла емульгування можна виділити такі:

- 1) складність регулювання. Регулювання положення робочого органу кавітатора вимагає безпосереднього втручання оператора;
- 2) непередбачено наявність у рідкому бітумі твердих великих нерозчинних домішок, що можуть частково або навіть повністю перекривати зазор між конічною поверхнею конусоподібного робочого органу диспергатора та внутрішньою поверхнею конфузора.

Перекриття зазору між конічною поверхнею конусоподібного робочого органу диспергатора та внутрішньою поверхнею конфузора може як погіршити якість вихідної продукції, так і зупинити процес приготування емульсії в цілому.

В НДЛ гідродинаміки ВНТУ була також розроблена конструкція вузла емульгування, в якій було усунуто недоліки наведеного раніше вузла емульгування. Принципова схема удосконаленого вузла емульгування наведена на рис. 2.4 [11, 62].

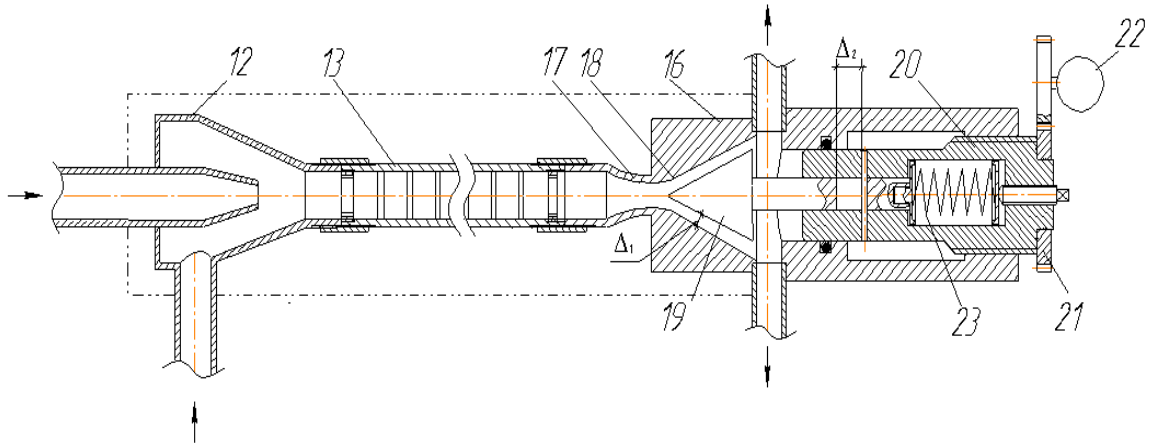


Рисунок 2.4 – Конструктивна схема вузла емульгування

Вузол емульгування (рис. 2.4) установки включає статоміксер для попереднього змішування 13, що виконаний у вигляді трубопроводу, всередині якого послідовно розташовані переділки 14 із зміщеними отворами 15 (рис. 2.5). Перед статоміксером розташовано пропорційний змішувач 12 із патрубками приєднаними до напірних ліній насосних агрегатів подачі складових компонентів. Після статоміксера встановлено кавітатор 16, вхідний отвір якого приєднаний до статоміксера та має конфузурну частину 17, що переходить в дифузурну частину 18.

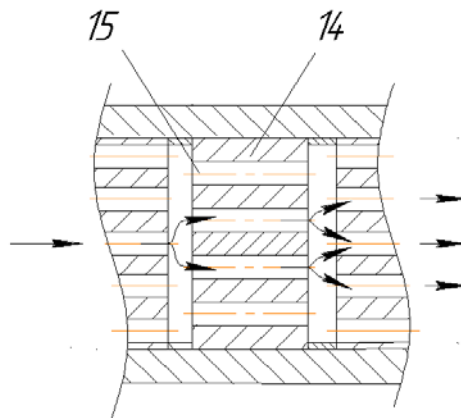


Рисунок 2.5 – Фрагмент конструкції статоміксера

Окрім того, із регульованим зазором  $\Delta_1$ , відносно поверхні дифузornoї частини 18 розташований підпружинений конусоподібний робочий орган 19, який виконаний із можливістю встановлення цього зазору між його конічною поверхнею та внутрішньою поверхнею дифузornoї частини 18. Регулювання зазору здійснюється рухомим шпинделем 20, що приєднаний до зубчастого колеса 21, який шестернею з'єднаний із валом крокового електродвигуна 22.

Витікаючи із великою швидкістю із сопла пропорційного змішувача 12, рідкий бітум створює розрідження в області вакуумного входу та підсмоктує емульсовану водяну суміш. Бітум перемішується з водною фазою і надходить у статоміксер 13, всередині якого, проходячи через отвори 15 послідовно розташованих переділок 14, надходить до кавітатора 16, сторона якого, що приєднана до статоміксера, виконана у вигляді конфузornoї 17 та дифузornoї 18 частин, із зазором  $\Delta_1$  відносно поверхні дифузора розташований підпружинений конусоподібний робочий орган 19, що у випадку проходження великих твердих нерозчинних часток спрацьовує як запобіжний клапан, внаслідок збільшення тиску у протікаючому середовищі при зменшенні поперечного перерізу прохідного отвору, що призводить до підвищення гідродинамічного тиску, сила дії якого деформує протидіючу механічну пружину 23, налаштовану завчасно на певну величину спрацювання  $\Delta_2$ , що й запобігає перекриванню прохідного отвору кавітатора, в результаті відходження робочого органу 19 на більшу відстань від сидла. В процесі налагодження необхідного режиму кавітації механічний привід регулювання зазору Механічний привід регулювання зазору надає можливість регулювати прохідний переріз кавітатора. Завдяки кавітаційному процесу відбувається безперервне приготування бітумної емульсії із необхідними вихідними якісними параметрами.

Використання крокового електродвигуна дає можливість автоматично, без втручання оператора, змінювати положення робочого органу кавітатора.

Окрім того, встановлені перед кавітатором пропорційний та статичний змішувачі попередньо змішують та інтенсифікують процес приготування якісної емульсії.

У випадку використання запропонованої конструкції для приготування емульсій на великих підприємствах, для збільшення продуктивності установки як варіант можливе встановлення декількох паралельних кавітаторів (рис. 2.6.) [64].

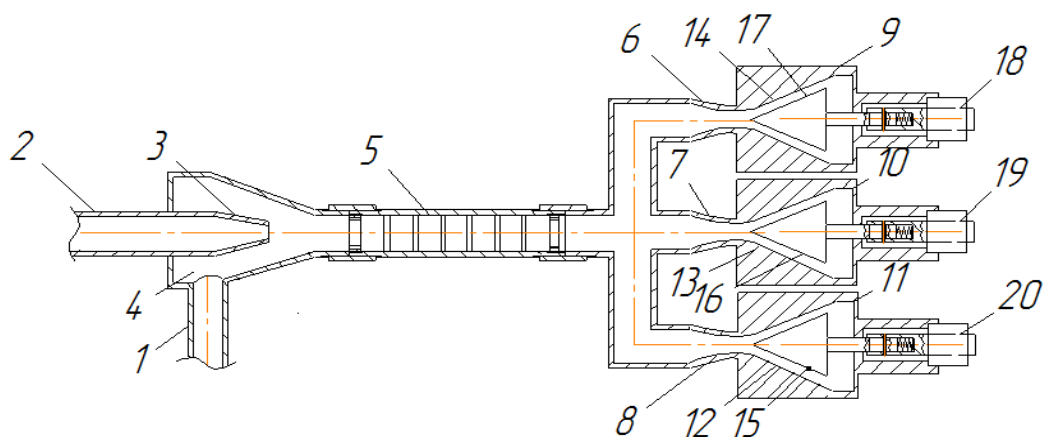


Рисунок 2.6 – Конструктивна схема вузла емульгування із паралельно встановленими кавітаторами: 1 – трубопровід подачі дисперсної фази; 2 – трубопровід подачі дисперсного середовища; 3 – сопло пропорційного змішувача; 4 – вакуумний вхід; 5 – статичний змішувач; 6, 7, 8, 12, 13, 14 – конфузорна та дифузорна частини; 9, 10, 11 – кавітатор; 15, 16, 17 – підпружинений конусоподібний робочий орган; 18, 19, 20 – механічний привід

### 2.3 Синтез промислової технологічної установки для приготування бітумних емульсій з наперед заданими властивостями

На підставі аналізу розроблених нами конструкцій вузлів емульгування п.2.2., як об'єкт досліджень була прийнята конструкція бітумно-емульсійної установки, в конструкції якої враховані основні суттєві параметри та характеристики попередніх конструкцій та ліквідовані властиві їм недоліки. Принципова схема промислової технологічної установки для приготування бітуму – об'єкту досліджень – наведена на рис. 2.7.

На рис. 2.8 наведений загальний вигляд установки для приготування бітумних емульсій запропонованої конструкції.

Згідно з рекомендаціями [26, 30, 68, 84] під час приготування бітумних емульсій необхідно контролювати такі параметри:

- дозування складових компонентів бітумної емульсії;
- узгодження тисків водної фази та бітуму на вході в вузол емульгування;
- температуру вхідних компонентів емульсії;
- якість вихідної сировини.

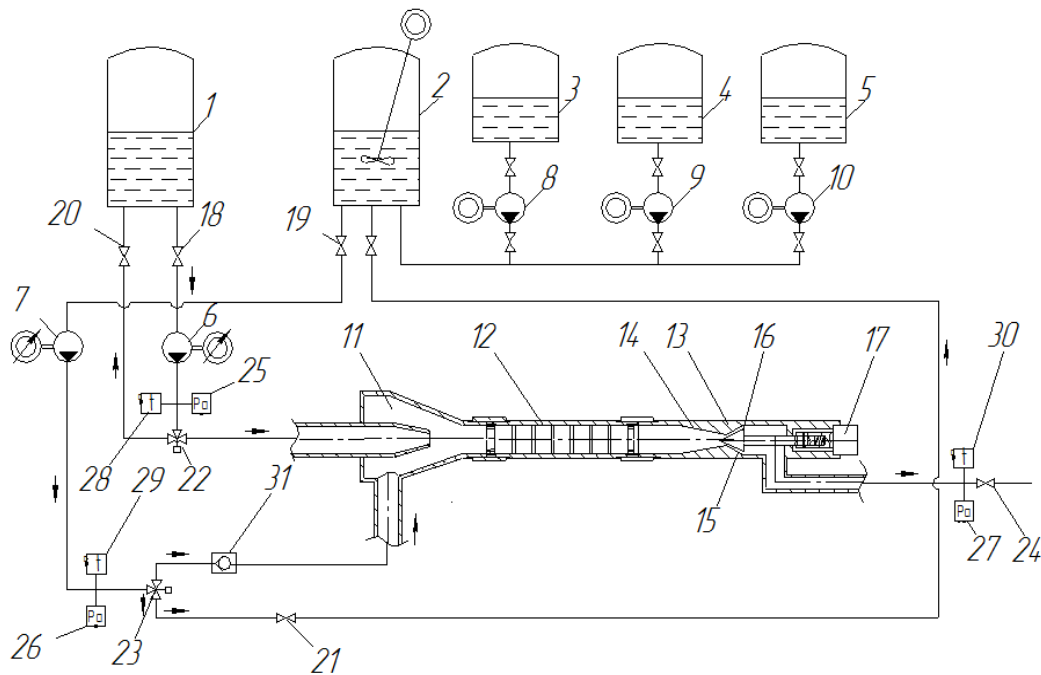


Рисунок 2.7 – Принципова схема промислової технологічної установки для приготування бітумних емульсій: 1 – 5 – ємності для зберігання компонентів бітумної емульсії; 6 – 10 – насосні агрегати; 11 – пропорційний змішувач – ежектор; 12 – статоміксер; 13 – кавітаційний диспергатор; 14 – конфуз орна частина кавітатора; 15 – дифузорна частина кавітатора; 16 – підпружинений конусоподібний робочий орган; 17 – кроковий електродвигун; 18, 19 – вхідні крани бітумний та водяний; 20, 21 – байпасні крани бітумний та водяний; 22, 23 – триходові крани; 24 – випускний кран; 25 – 30 – сенсори тиску та температури; 31 – зворотний клапан

Одним із важливих конструктивних вузлів, який визначає функціонування технологічного обладнання в цілому та якість вихідної продукції, є його система керування та інформаційно-вимірвальні пристрої. Завдяки наявності цього устаткування стає можливим відслідковування параметрів та характеристик протікання технологічного процесу приготування бітумних емульсій із наперед заданими властивостями [12, 58].

Структурна схема системи адаптивного автоматичного керування процесом приготування бітумної емульсії на запропонованій промисловій технологічній установці для приготування бітумних емульсій наведена на рис.2.9, де  $DT_1$ ,  $DT_2$ ,  $DT_3$  – сенсори температури;  $t_6$  – температура бітуму;  $t_b$  – температура водного розчину емульгатора;  $t_c$  – температура суміші складових компонентів емульсії у вузлі емульгу-

вання;  $DP_1, DP_2, DP_3, DP_4$  – сенсори тиску;  $P_6$  – тиск бітуму в подавальному трубопроводі;  $P_b$  – тиск водного розчину емульгатора в подавальному трубопроводі;  $P_c$  – тиск суміші складових компонентів емульсії на вході у вузол емульгування;  $P_e$  – тиск емульсій за робочим органом кавітаційного диспергатора; ТХ – тахометри;  $f_6$  – частота обертання лопатей бітумного насосу;  $f_b$  – частота обертання лопатей водяного насосу; ДП – сенсор переміщення;  $x$  – положення робочого органу кавітатора; РО – регулюючий орган; ВМ – виконавчий механізм; РТ – регулятор температури; РВ – регулятор витрати; РР – регулятор тиску; РП – регулятор положення робочого органу кавітатора.

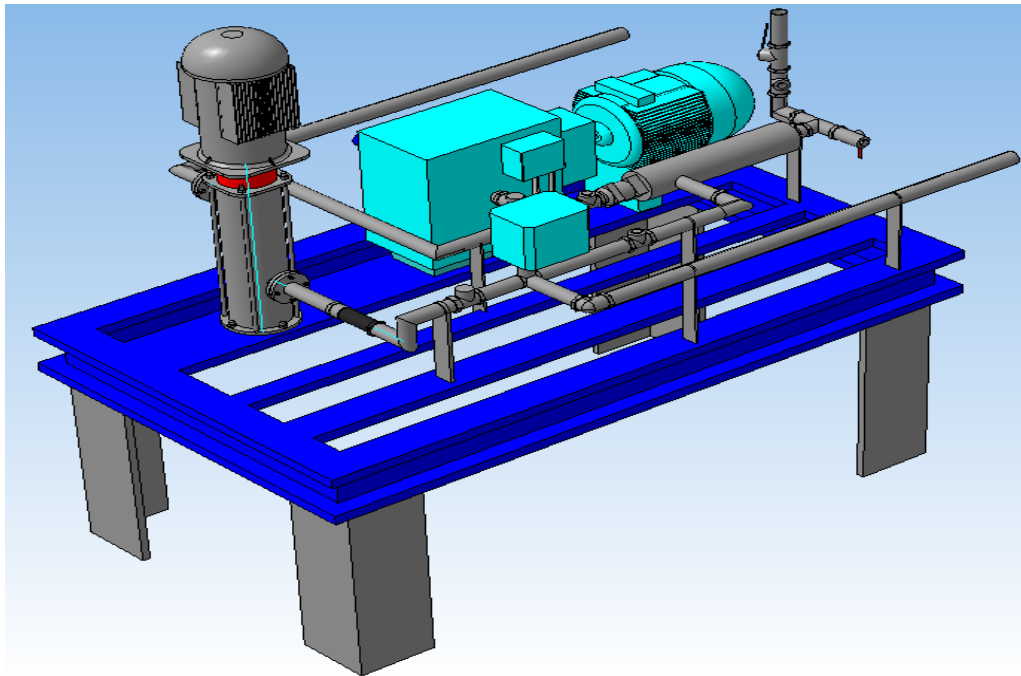


Рисунок 2.8 – Загальний вигляд установки для приготування бітумних емульсій

До основних функцій системи автоматизованого керування відноситься регулювання (стабілізація) заданих значень масових витрат компонентів, що необхідні для утворення якісної бітумної емульсії. Окрім того, система здійснює контроль і управління температурним режимом нагрівачів, а також здійснює видачу команд на механічне переміщення засувки, триходових клапанів, клапанів регулювання тощо [12]



У випадку, коли певні робочі параметри технологічного процесу (температура, тиск, масові витрати компонентів) виходять за встановлені межі, то відбувається блокування подачі компонентів на диспергування, спрацьовують захисні пристрої і компоненти повертаються через байпасні трубопроводи у технологічну ємність.

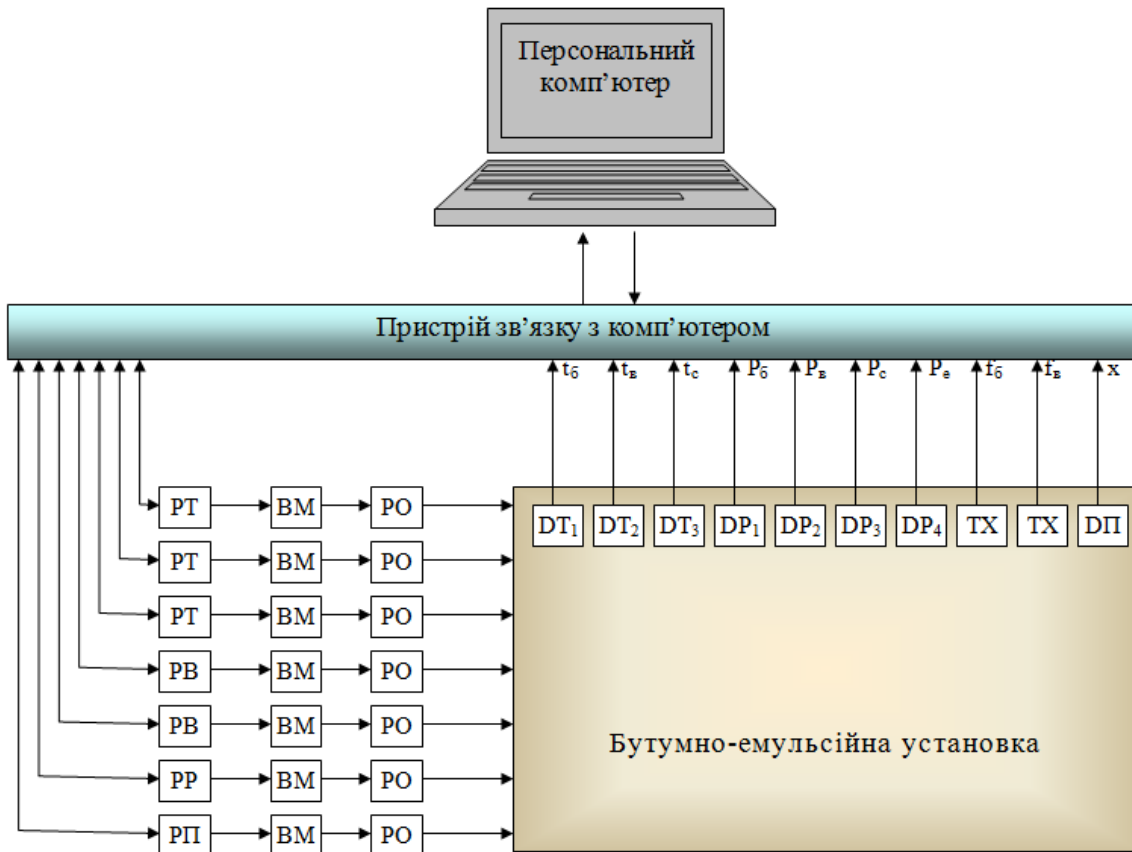


Рисунок 2.9 – Структурна схема системи адаптивного автоматичного керування процесом приготування бітумних емульсій на промисловій технологічній установці для приготування бітумних емульсій

В процесі роботи система виконує постійне корегування величини подачі кожної із окремих ліній дозування у випадку відхилення їх від заданих масових співвідношень. Концентрація емульсії визначається автоматично в залежності від різниці температур бітуму і бітумної емульсії, бітумної емульсії і води згідно з таблицею 2.1.



Інформаційне забезпечення системи реалізується завдяки використанню відеотерміналу АРМ оператора. На мнемонічній схемі відображується в графічному вигляді склад, розміщення та взаємозв'язки обладнання технологічного процесу. На відеотермінал виводяться числові значення прямих та опосередкованих змінних, що характеризують технологічні параметри процесу і стан обладнання.

Виводяться дані інтерактивного введення, дата та час роботи ліній дозування з моменту їх запуску для виконання заданого рецепту, графіки зміни значення масової витрати та похибок стабілізації кожного з компонентів, а також текстові повідомлення про нештатні випадки процесу, де вказується час та ідентифікатор джерела аварії.

Система реалізує автоматичне ведення протоколу та архіву даних та подій із можливістю їх перегляду на відеотерміналі операторської станції в ході процесу.

Оператор в інтерактивному режимі може змінювати поточний рецепт емульсії, керувати засувками, триходовими клапанами, клапанами регулювання тиску, запуском насосів подачі бітуму та водного розчину емульгатора, регулювати положення робочого органу кавітатора. В автоматичному режимі система автоматизованого керування підтримує процентне співвідношення компонентів суміші у відповідності із заданими значеннями витрат за рахунок стабілізації масової витрати компонентів. Система розраховує такі значення: задане значення маси кожного компонента, задане значення масової витрати кожного із компонентів.

Отже, використання запропонованої промислової установки для приготування бітумних емульсій, що здійснює кавітаційну технологію диспергування компонентів емульсії, яка обладнана адаптивною системою керування дозволяє отримувати готову продукцію – бітумну емульсію – при максимально контрольованих вхідних та вихідних параметрах із додержанням всіх технологічних вимог процесу та максимально спростити роботу оператора, яка в даному випадку полягає лише у заданні необхідних параметрів, рецептури та контролю роботи установки в цілому.

### **3 ТЕОРЕТИЧНІ ДОСЛІДЖЕННЯ РОБОЧОГО ПРОЦЕСУ ПРИГОТУВАННЯ БІТУМНИХ ЕМУЛЬСІЙ НА ЗАПРОПОНОВАНОМУ УСТАТКУВАННІ**

#### **3.1 Мета та задачі теоретичного дослідження робочого процесу приготування емульсій бітумних дорожніх на запропонованому устаткуванні. Основні припущення**

Метою теоретичного дослідження робочого процесу емульгування дорожнього бітуму за допомогою кавітаційного диспергатора запропонованої конструкції при виготовленні будівельної продукції, а саме бітумної емульсії, є: дослідження умов виникнення та розвитку кавітації у кавітаційному диспергаторі, розроблення моделі динаміки робочого процесу емульгування бітуму, вибір узагальнених функціональних залежностей, що дозволяють здійснювати вибір раціональних режимів та конструктивних параметрів вузла емульгування, аналіз за допомогою чисельного експериментування впливу параметрів та характеристик установки для приготування бітумної емульсії на характеристику вихідного матеріалу – бітумну емульсію.

При розробці математичної моделі робочого процесу приготування бітумної емульсії за допомогою кавітаційного диспергатора запропонованої конструкції були прийняті такі припущення:

- процес адіабатичний;
- враховуючи незначну, порівняно з бітумом та водою, кількість соляної кислоти та емульгатора, вплив останніх на реологічні властивості суміші не враховуємо;
- втрати тиску по довжині не враховуємо;
- приймаємо коефіцієнт кінетичної енергії потоку (коефіцієнт Коріоліса)  $\alpha = 1$  [49];
- стисливістю робочої рідини нехтуємо;
- тиск насиченої пари для компонентів обираємо згідно з [49] в залежності від температури;
- густина кожного з компонентів та їх суміші залежить від фізико-механічних властивостей рідини і від температури [49].

Бітум – нерозчинна у воді речовина. Приготування емульсії здійснюється диспергуванням – подрібненням частинок бітуму (пряма емульсія) у водному розчині. Для приготування стійкої емульсії (як

було зазначено у першому розділі) у сировину перед диспергуванням вводять різноманітні ПАР, які сприяють ефективному диспергуванню бітуму і забезпечують стійкість отриманої емульсії. Важливим перед етапом диспергування бітуму є ефективне перемішування складових компонентів емульсії з метою рівномірного розподілення ПАР у сировині.

Серед основних способів перемішування рідких середовищ: перемішування безпосередньо в трубопроводі; в апаратах з насосною циркуляцією; в апаратах з механічною мішалкою та у змішувачах із застосуванням стисненого повітря (рис. 3.1) [11].



Рисунок 3.1 – Основні способи перемішування рідин

Як показали останні дослідження, для приготування механічної суміші в бітумно-емульсійних установках використовують механічні мішалки. Висуваємо гіпотезу, що якісного перемішування можна досягти і перемішуванням безпосередньо в трубопроводі. Це дозволить спростити технологію виготовлення бітумної емульсії.

Далі розглянемо більш детально етапи приготування бітумної емульсії: перемішування та диспергування складових компонентів у запропонованій бітумно-емульсійній установці.

### 3.2 Теоретичні основи попереднього змішування складових компонентів емульсії

Віддозована згідно з рецептурою сировина перед кавітаційним диспергатором проходить багатостадійне змішування. Перша стадія перемішування – пропорційний змішувач, в якому рідкий бітум, витікаючи із великою швидкістю із сопла пропорційного змішувача, створює розрідження в області вакуумного входу, підсмоктує емульсовану водяну суміш, що надходить по іншому трубопроводу. Відбувається турбулізація потоку сировини, що сприяє інтенсифікації тепломасообмінним процесам.

Наступна стадія – це статичний змішувач, який складається з  $n$ -ї кількості модулів, представлених ділянками трубопроводу з переборками із зміщеними отворами заданих розмірів. Кількість таких модулів обумовлена забезпеченням ними потрібної однорідності суміші.

Найбільш складно розподіляти у суміші компоненти, що входять до неї у малій кількості. Такий компонент будемо називати контрольним. Якщо він розподілятиметься рівномірно, то і інші компоненти будуть розподілятися рівномірно.

Теоретичний опис багатостадійного перемішування в технічній літературі відсутній. Для виявлення закономірностей процесу багатостадійного перемішування контрольного компоненту із іншими розглянемо структурну схему приготування механічної суміші компонентів бітумної емульсії, що включає багатостадійну обробку.

Нехай технологічний процес відбувається у змішувачах  $N$  (рис. 3.2).

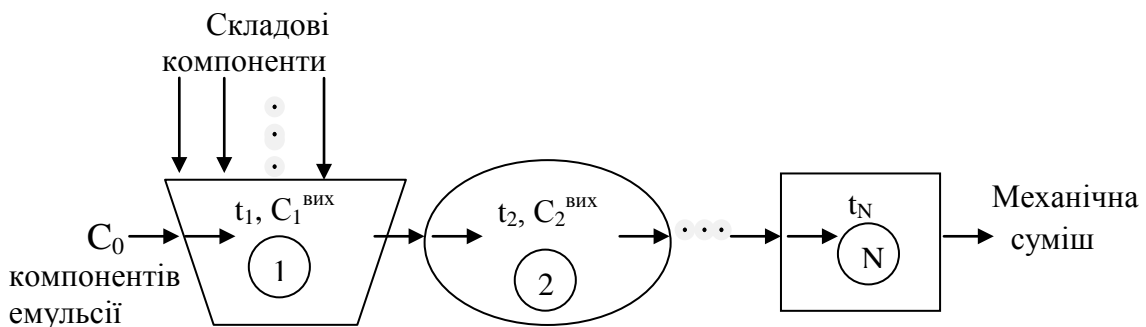


Рисунок 3.2 – Схема введення та руху компонентів бітумної емульсії при багатостадійному перемішуванні

Змішувачі пронумеровані від початку до кінця так, що вхідний потік надходить до змішувача 1, кінцевий продукт – механічна суміш компонентів бітумної емульсії виходить зі змішувача N. У змішувачі N реалізуються кінцеві характеристики процесу, а число змішувачів може змінюватися в залежності від умов проведення процесу.

Передбачається, що змішувачі можуть бути різноманітної конструкції, у зв'язку з чим на рис. 3.2 змішувачі зображені різними умовними позначеннями. Із точки зору теорії систем, система, що розглядається, належить за класифікацією до складних, оскільки складається з елементів різних типів.

Тривалість перебування  $t_n$  є керуючою змінною в N-му змішувачі, а вихідним параметром є показник неоднорідності механічної суміші бітумної емульсії  $C_n^{eux}$ , який розраховується за показниками розподілення в суміші контрольного інгредієнта.

Ітераційний вираз для розрахунку зміни показника неоднорідності суміші має вигляд:

$$C_n^{eux} = f(C_{n-1}, t_n). \quad (3.1)$$

Тоді в термінах теорії оптимізації математичну модель будуть складати:

1. Функція оптимізації – показник відхилення неоднорідності суміші від необхідного на виході з останнього (за ходом потоку) змішувача

$$J = (C_N^{eux} - [C])^2 \rightarrow \min, \quad (3.2)$$

де  $[C]$  – необхідний показник неоднорідності суміші.

2. Рівняння зв'язку

$$\begin{aligned} C_1^{eux} &= f(C_0, t_1); \\ C_2^{eux} &= f(C_1, t_2); \\ &\dots\dots\dots; \\ C_n^{eux} &= f(C_{n-1}, t_n); \\ n &= \overline{1, N}. \end{aligned} \quad (3.3)$$

3. Обмеження:

$$0 \leq C \leq 1; t > 0. \quad (3.4)$$

Чисельні експерименти показують, що крива змішування для однієї стадії (побудована в координатах: неоднорідність суміші  $C$ , час  $t$ ) має приблизно вигляд, що показаний на рис. 3.3.

В міру зменшення неоднорідності суміші процес змішування уповільнюється. Математично це може бути записано у вигляді

$$\frac{dC}{dt} = -kC, \quad (3.5)$$

де  $k$  – коефіцієнт пропорційності, що показує залежність швидкості змішування  $\frac{dC}{dt}$  від технологічних властивостей сировини та конструктивних особливостей змішувача.

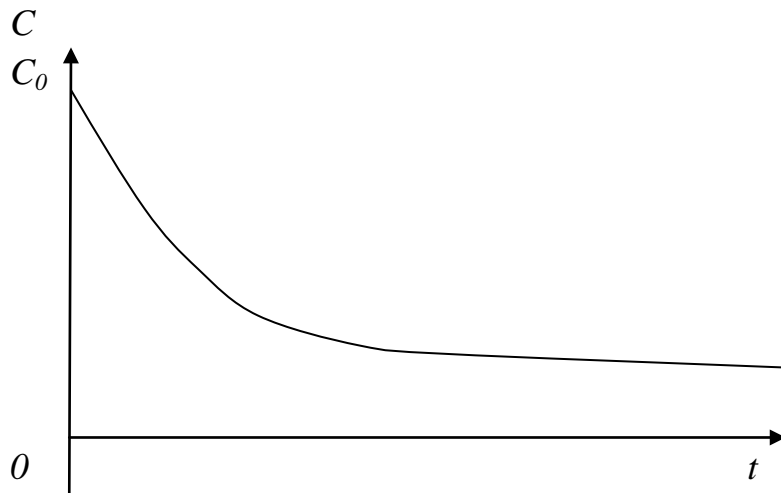


Рисунок 3.3 – Крива кінетики змішування для однієї стадії

Помножимо рівняння (3.5) на вираз  $\frac{dt}{C}$ , отримаємо

$$\frac{dC}{C} = -kdt.$$

Інтегрування дає вираз

$$\ln C = -kt + N,$$

де  $N$  – стала інтегрування.



Сталу інтегрування знаходимо із початкової умови:  $t = 0; C = C_0$ .

$$N = \ln C_0. \quad (3.6)$$

Далі послідовно знаходимо:

$$\begin{aligned} \ln C - \ln C_0 &= -kt; \\ \ln \frac{C}{C_0} &= -kt; \\ C &= C_0 e^{-kt}. \end{aligned} \quad (3.7)$$

Остання формула і є математичним виразом кривої, що зображена на рис. 3.3.

Для  $n$ -ї стадії формулу (3.7) можемо представити у вигляді

$$C_n = C_{n-1} e^{-k_n t}. \quad (3.8)$$

Використовуючи рис. 3.3 та формули (3.6) й (3.7), можемо записати математичний вираз показника неоднорідності на вході та виході кожного змішувача:

$$\begin{aligned} C_1^{ex} &= C_0; \\ C_1^{mix} &= C_1^{ex} e^{-k_1 t_1}; \\ C_2^{ex} &= C_1^{mix}; \\ C_2^{mix} &= C_2^{ex} e^{-k_2 t_2}; \\ &\dots\dots\dots \\ C_N^{ex} &= C_{N-1}^{mix}; \\ C_N^{mix} &= C_N^{ex} e^{-k_N t_N}, \end{aligned} \quad (3.9)$$

де  $t_1, t_2, \dots, t_N$  – тривалість перебування суміші бітуму у відповідному змішувачі.

Таким чином, однорідність, відповідно:

- для однієї стадії

$$C_1^{mix} = C_1^{ex} e^{-k_1 t_1} = C_0 e^{-k_1 t_1}; \quad (3.10)$$

- для двох стадій

$$C_2^{eux} = C_1^{eux} e^{-k_2 t_2} = C_0 e^{-k_1 t_1} e^{-k_2 t_2}; \quad (3.11)$$

- для трьох стадій

$$C_3^{eux} = C_3^{ex} e^{-k_3 t_3} = C_2^{eux} e^{-k_3 t_3} = C_1^{eux} e^{-k_2 t_2} e^{-k_3 t_3} = C_0 e^{-k_1 t_1} e^{-k_2 t_2} e^{-k_3 t_3}; \quad (3.12)$$

- для  $N$  стадій

$$C_N^{eux} = C_0 e^{-\sum_{n=1}^N k_n t_n}; \quad (3.13)$$

$$n = \overline{1, N}.$$

Формула (3.13) дозволяє підрахувати показник неоднорідності суміші після  $N$  стадій.

Метою теоретичного дослідження багатостадійного процесу приготування суміші компонентів бітумної емульсії є мінімізація величини, що відповідає оптимуму числа стадій змішування:

$$J = (C_N^{eux} - [C])^2 \rightarrow \min.$$

Умова мінімуму відповідає нульовому значенню похідної

$$\frac{dJ}{dN} = 0. \quad (3.14)$$

Перед тим як розрахувати похідну, перетворимо величину  $J$ :

$$J = (C_N^{eux} - [C])^2 = (C_N^{eux})^2 - 2C_N^{eux} [C] + [C]^2.$$

Знаходимо похідну

$$\frac{dJ}{dN} = 2C_N^{eux} (C_N^{eux})' - 2[C](C_N^{eux})' = 0;$$

$$\frac{dJ}{dN} = 2(C_N^{eux} - 2[C])(C_N^{eux})' = 0.$$

Таким чином, число стадій перемішування, що відповідає мінімуму величини  $J$ , може бути знайдено з рівняння

$$2(C_N^{eux} - [C])(C_N^{eux})' = 0.$$

Оскільки  $2 \neq 0$ , то корені цього рівняння можуть бути знайдені з умови

$$C_N^{вих} - [C] = 0; \quad (3.15)$$

$$(C_N^{вих})' = 0. \quad (3.16)$$

Розв'язання рівнянь (3.15) та (3.16) ускладнене дискретно змінним аргументом, оскільки число стадій  $N$  може бути лише цілим числом. Такі задачі вирішуються в основному методами динамічного програмування, а також за допомогою алгоритмів виключення залежних змінних, «блукаючої трубки», послідовної перевірки досяжності. Всі ці методи складні у застосуванні, включають багато евристичних положень, а тому цінність отриманих результатів викликає великий сумнів.

У нашому випадку оптимальне значення  $N$  можна отримати графічним способом, який є більш наочним (рис. 3.4).

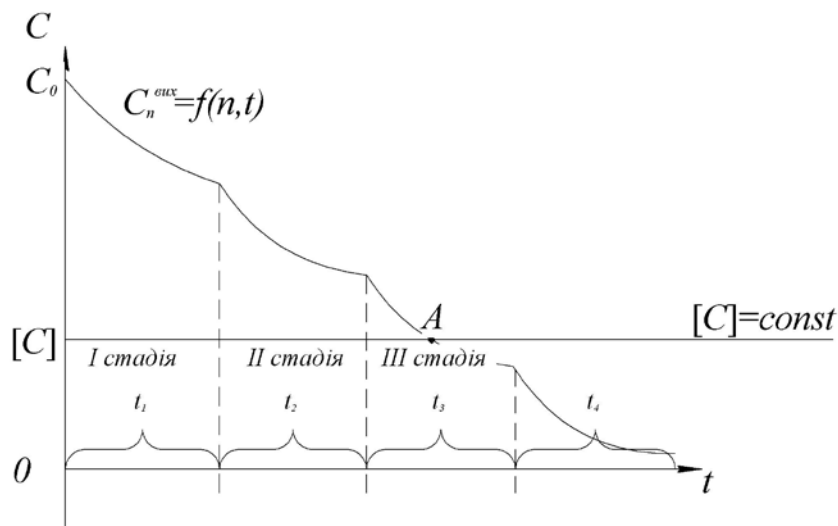


Рисунок 3.4 – Графічне визначення числа стадій перемішування

Перетин графіків  $C^{вих}$  та  $[C]$  дає розв'язок – точку А.

Цей приклад обґрунтовує необхідність трьох стадій перемішування для досягнення заданої однорідності суміші за розподіленням в ній контрольного компонента.

Таким чином, отриманий вираз (3.13) та запропонований метод оптимізації числа стадій перемішування можуть бути покладені в основу розрахунку багатостадійної технології приготування суміші компонентів бітумної емульсії.

### 3.3 Кінетика утворення бітумної емульсії в кавітаційному диспергаторі запропонованої установки для приготування бітумних емульсій

Процес емульгування бітуму у водному розчині складових компонентів емульсії у запропонованій установці для приготування бітумних емульсій відбувається таким чином [62]. Після статичного змішувача, в якому відбулося попереднє змішування складових компонентів емульсії, сировина надходить до конфузornoї частини 1 кавітаційного диспергатора (рис. 3.5), де відбувається поступове звуження потоку, як наслідок збільшується швидкість руху потоку, а отже, тиск поступово зменшується.

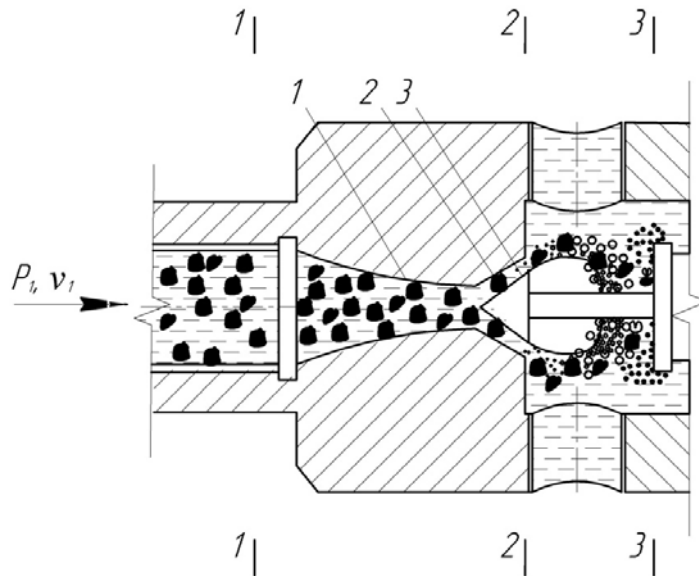


Рисунок 3.5 – Схема отримання бітумної дорожньої емульсії в кавітаційному диспергаторі запропонованої конструкції

Далі потік надходить у дифузornoю частину 2 кавітаційного диспергатора, де влаштований конусоподібний робочий орган 3 кавітатора таким чином, що утворений зазор між внутрішньою поверхнею дифузornoї частини 2 та зовнішньою поверхнею робочого органу диспергатора 3, забезпечує падіння тиску до деякого критичного значення (до тиску насиченої пари для цієї рідини). В рідині, що потрапляє у зону критичного тиску, відбувається холодне кипіння – утворення парогазових бульбашок (кавітація), які рухаються далі і при потраплянні у зону підвищеного тиску (за вузлом емульгування) інтенсивно лопа-

ють. Низка чинників супутніх кавітації (детально описаний у розділі 1) спричиняє диспергування бітуму у водному розчині ПАВ.

Основним параметром, що характеризує процес кавітації є число кавітації [38, 70, 74, 83], фізичний зміст якого полягає у співвідношенні повного тиску, що призводить до лопання кавітаційної каверни, до швидкісного напору цього потоку:

$$\chi = 2 \frac{p_3 - p_n}{\rho_c v_2^2}, \quad (3.17)$$

де  $p_3$  – абсолютний тиск, Па;  $p_n$  – тиск насиченої пари, Па;  $\rho$  – густина сировини, кг/м<sup>3</sup>;  $v_2$  – швидкість потоку рідини на виході з найвужчої ділянки кавітаційного диспергатора, м/с.

Зміна тиску на поверхні тіла або на стінках будь-якого каналу, що обмежує потік рідини, в основному пов'язана із зміною швидкості течії. Тому швидкісний напір можна розглядати як величину, що визначає падіння тиску, внаслідок чого відбувається утворення та зростання каверни. А отже, число кавітації це співвідношення тиску, під дією якого відбувається лопання кавітаційної каверни, до тиску який призводить до її утворення та зростання.

Визначимо швидкість проходження потоку рідини через зазор, утворений внутрішньою поверхнею конфузорної частини та поверхнею робочого органу кавітаційного диспергатора. Для цього запишемо рівняння Бернуллі для перерізів 1-1 та 2-2

$$z_1 + \frac{p_1}{\gamma} + \frac{v_1^2}{2g} = z_2 + \frac{p_2}{\gamma} + \frac{v_2^2}{2g} + \sum h_{wi}, \quad (3.18)$$

де  $z_1, z_2$  – геометричний напір в перерізах 1-1 та 2-2, м;  $p_1, p_2$  – абсолютний тиск в перерізах 1-1 та 2-2, Па;  $\gamma$  – питома вага, Н/м<sup>3</sup>;  $v_1, v_2$  – швидкість руху потоку рідини в перерізах 1-1 та 2-2, м/с;  $\sum h_{wi}$  – сумарні втрати напору на ділянці між перерізами, що розглядаються, м;

Рівняння витрат для перерізів 1-1 та 2-2

$$v_1 S_1 = v_2 S_2, \quad (3.19)$$

де  $S_1, S_2$  – площа поперечного перерізу прохідних отворів диспергатора 1-1 та 2-2, м<sup>2</sup>.

Нехтуючи втратами тиску по довжині, втрати на місцевих опорах розраховуємо за формулою Вейсбаха [3]

$$h = \xi_m \frac{v_1}{2g}, \quad (3.20)$$

де  $\xi_m$  – коефіцієнт місцевого опору.

Отже, швидкість руху потоку сировини через переріз 2-2

$$v_2 = \frac{1}{\sqrt{1 - \frac{S_2^2}{S_1^2}(\xi_m - 1)}} \sqrt{2g \frac{p_1 - p_2}{\gamma}}. \quad (3.21)$$

Коефіцієнт витрат визначаємо за формулою

$$\mu_1 = \frac{1}{\sqrt{1 - \frac{S_2^2}{S_1^2}(\xi_m - 1)}}. \quad (3.22)$$

В нашому випадку  $p_1$  – абсолютний тиск в диспергаторі,  $p_2$  – атмосферний тиск, різниця цих тисків дає нам надлишковий тиск  $p_m$ .

$$v_2 = \mu_1 \sqrt{2g \frac{p_m}{\gamma}}. \quad (3.23)$$

При розгляді перерізу 3-3 отримаємо значення абсолютного тиску  $p_3$ , при якому відбувається лопання кавітаційних бульбашок

$$p_3 = \frac{\rho_c v_3^2}{2}, \quad (3.24)$$

де  $v_3$  – швидкість руху потоку сировини в перерізі 3-3, м/с.

Оскільки відстань між перерізами 2-2 та 3-3 мала, то припустимо, що  $v_3 \cong v_2$ . Підставимо в (3.17) рівняння (3.23) та (3.24):

$$\chi = 1 - \frac{p_n \gamma}{\rho_c \mu_1^2 g p_m}. \quad (3.25)$$

Підставимо в рівняння (3.25) вираз (3.22):

$$\chi = 1 - \frac{p_n \left(1 - \frac{S_2^2}{S_1^2} (\xi_m - 1)\right)}{p_m} . \quad (3.26)$$

З аналізу рівняння (3.26) видно, що із збільшенням тиску в системі  $p_m$  число кавітації збільшується. Окрім того, відбувається збільшення числа кавітації із збільшенням площі зазору між робочим органом та внутрішньою поверхнею дифузornoї частини диспергатора.

Розглянемо реальний процес приготування бітумної емульсії в кавітаційному диспергаторі коли параметри процесу такі:

– тиск насиченої пари низькокиплячого компонента (води) при температурі потоку сировини  $T = 90^\circ$  [73],  $p_n = 70927,5$  Па;

– площа поперечного перерізу вхідного патрубку конфузornoї частини диспергатора,  $S_1 = 0,000804$  м<sup>2</sup>;

– густина бітуму при нагріванні наближається до густини водного розчину емульгатора, на підставі проведених дослідів (див. розділ 4) приймаємо густина механічної суміші вхідних компонентів сировини,  $\rho_c = 1000$  кг/м<sup>3</sup>;

– із врахуванням наявних між перерізами 1-1 та 3-3 місцевих опорів: поступове звуження потоку, раптове звуження потоку та раптове розширення потоку, згідно з [35]  $\xi_m = 1,44$ .

На основі цих даних можна побудувати залежність числа кавітації  $\chi$  від тиску в системі  $p_m$  (рис. 3.6) та числа кавітації  $\chi$  від площі зазору між робочим органом та внутрішньою поверхнею дифузornoї частини кавітаційного диспергатора  $S_2$  (рис. 3.7).

Збільшення числа кавітації  $\chi$  при збільшенні тиску на вході у вузол диспергування та збільшенні зазору між робочим органом та внутрішньою поверхнею дифузornoї частини диспергатора, пояснюється зростанням швидкості витоку сировини через переріз 2-2.

Знайдемо швидкість руху сировини через переріз 1-1:

$$v_1 = \frac{v_2 S_2}{S_1} . \quad (3.27)$$

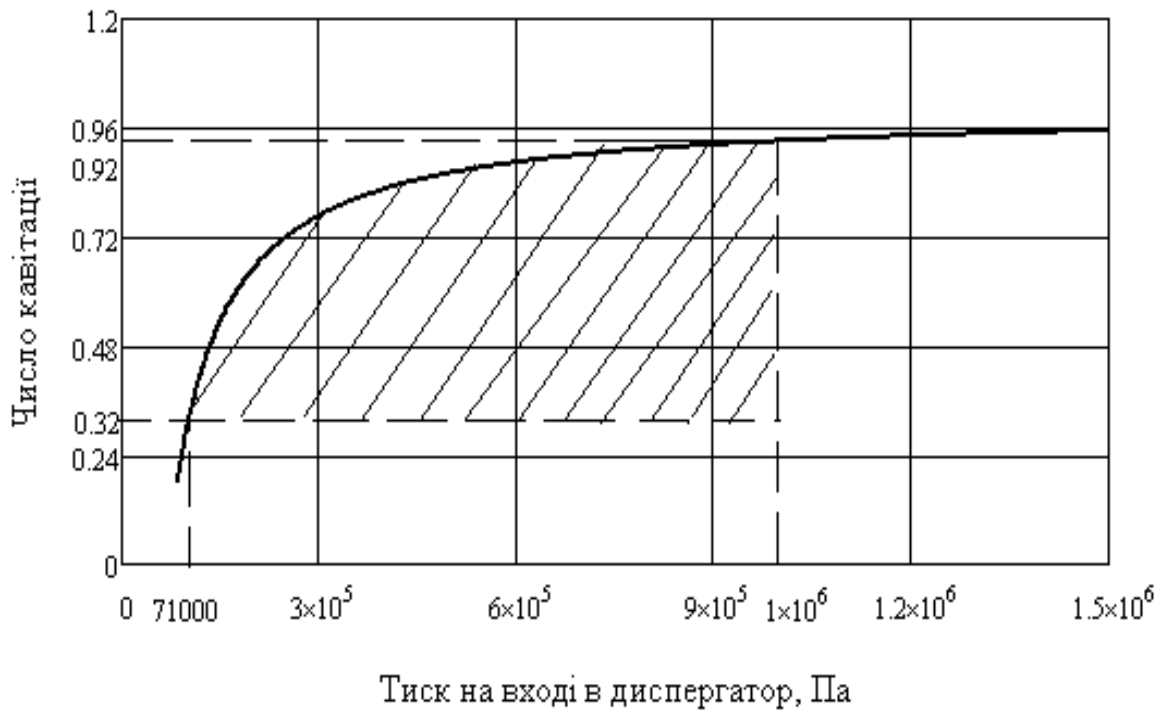


Рисунок 3.6 – Залежність числа кавітації від тиску на вході в диспергатор

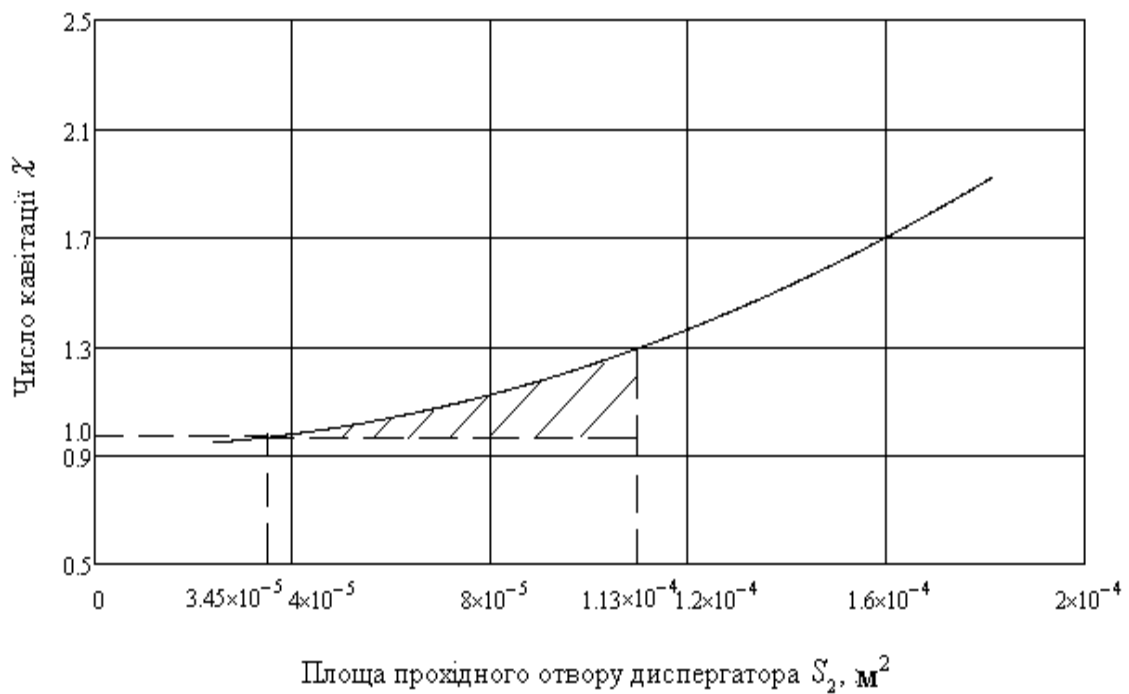


Рисунок 3.7 – Залежність числа кавітації від площі прохідного отвору диспергатора



Підставимо (3.23) в (3.27):

$$v_1 = \frac{\mu_1 S_2}{S_1} \sqrt{2g \frac{p_m}{\gamma}}. \quad (3.28)$$

Як зазначалося в [28] «...Якість емульсії, за інших однакових умов, визначається її дисперсністю, тобто розміром дисперсної фази. Висока дисперсність бітуму в дорожніх емульсіях і пастах обумовлює їх стійкість і суттєво впливає на основні технологічні властивості – в'язкість, швидкість розпаду, однорідність, товщину плівки в'язучого та зчеплення з мінеральними матеріалами...». Гідродинамічні процеси супутні кавітації дозволяють отримувати дрібнодисперсні емульсії. При цьому збільшення числа кавітації спочатку призводить до зменшення діаметра часток, а потім до збільшення [85].

Аналіз попередніх досліджень показав, що прямої залежності між числом кавітації та дисперсністю, отриманої за допомогою цієї кавітації емульсії, не встановлено. Експериментальні дослідження (див. розділ 4.5) показали, що крива залежності між дисперсністю та числом кавітації має вигляд параболи, що обмежена граничними умовами. Отже, залежність між числом кавітації та розміром частинок бітуму можна наближено виразити квадратичним рівнянням

$$d_{ч1} = ax^2 + bx + c, \quad (3.29)$$

де  $a$ ,  $b$ ,  $c$  – коефіцієнти, що визначаються експериментально,  $m$ ;  $x$  – число кавітації.

Підставимо (3.26) в (3.29):

$$d_{ч1} = a \cdot \left[ 1 - \frac{p_n \left( 1 - \frac{S_2^2}{S_1^2} (\xi - 1) \right)}{p_m} \right]^2 + b \cdot \left[ 1 - \frac{p_n \left( 1 - \frac{S_2^2}{S_1^2} (\xi - 1) \right)}{p_m} \right] + c. \quad (3.30)$$

Згідно з [2, 52], коефіцієнти  $a$ ,  $b$ , а також вільний член  $c$  залежності (3.30), які встановлюються експериментально, можна визначити за формулами:

$$a = \frac{y_3 - \frac{x_3(y_2 - y_1) + x_2y_1 - x_1y_2}{x_2 - x_1}}{x_3(x_3 - x_1 - x_2) + x_1x_2};$$

$$b = \frac{y_2 - y_1}{x_2 - x_1} - a(x_1 + x_2);$$

$$c = \frac{x_2y_1 - x_1y_2}{x_2 - x_1} + ax_1x_2,$$

де  $x_1, x_2, x_3$  – абсциси трьох будь-яких точок, що знаходяться на експериментальній кривій;  $y_1, y_2, y_3$  – відповідно ординати цих точок.

Наприклад, згідно з експериментальними даними залежність дисперсності від площі прохідного отвору диспергатора при сталому тиску  $P = 0,9$  МПа та розміру частки бітуму в емульсії  $n = 60\%$  наведена на рис. 3.8.

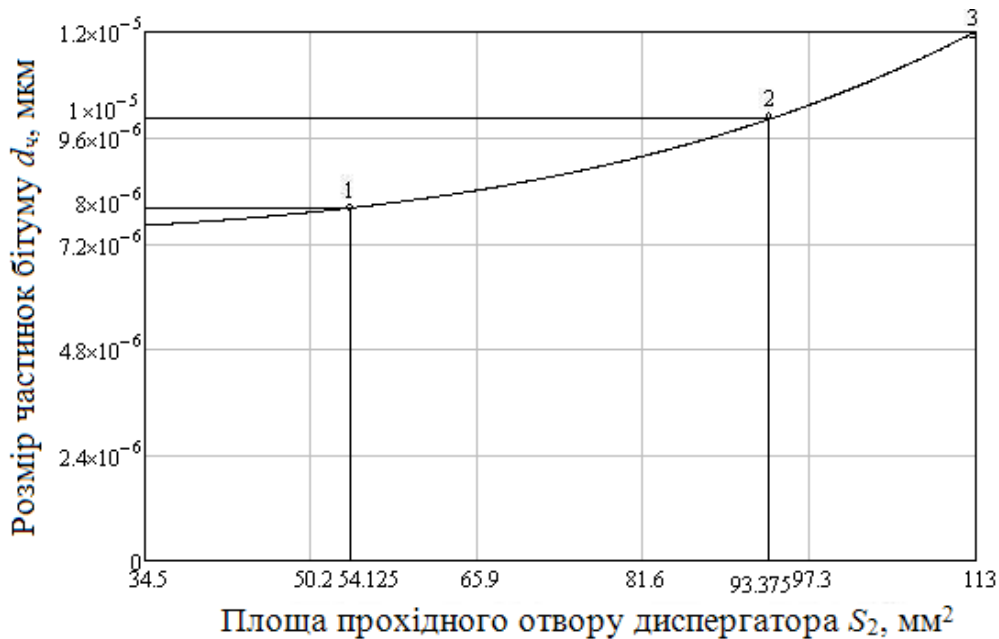


Рисунок 3.8 – Залежність діаметра частинки бітуму від площі прохідного отвору диспергатора при  $P = 0,9$  МПа та  $n = 60\%$ .

У даному випадку рівняння (3.30) набуває вигляду:

$$d_{\text{ч1}} = 5,2425 \cdot \left[ 1 - \frac{p_{\text{н}} \left( 1 - \frac{S_2^2}{S_1^2} (\xi - 1) \right)}{p_{\text{м}}} \right]^2 - 9,65553 \cdot \left[ 1 - \frac{p_{\text{н}} \left( 1 - \frac{S_2^2}{S_1^2} (\xi - 1) \right)}{p_{\text{м}}} \right] + 4,445847 \cdot \quad (3.31)$$

Зведена таблиця 3.1 ілюструє значення старшого  $a$ , другого  $b$  коефіцієнтів та значення вільного члена  $c$  в залежності від параметрів обробки компонентів емульсії.

Таблиця 3.1 – Уточнюючі коефіцієнти математичної моделі процесу емульгування бітуму в запропонованій кавітаційній установці

Параметри диспергування			Коефіцієнти		Вільний член, $c$	Примітка
Площа прохідного отвору диспергатора, $S$ , мм <sup>2</sup>	Частка бітуму в емульсії, $n$ , %	Тиск на вході в диспергатор $P$ , МПа	старший, $a$	другий, $b$		
var	40	0,9	6,491444	-11,95647	5,505604	див.рис.4.10
var	60	0,9	5,2425	-9,65553	4,445847	див.рис.4.9
var	40	1,1	23,666031	-44,280461	20,712804	див.рис.4.8
var	60	1,1	-0,000663	0,01434	-0,012833	див.рис.4.7
var	50	1	0,12056	-0,070093	0,010189	див.рис.4.6
73,5	50	var	-0,000417	0,0006707	-0,00025488	див.рис.4.5

## **4 ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНІ ДОСЛІДЖЕННЯ НОВОЇ КОНСТРУКЦІЇ УСТАНОВКИ ДЛЯ ПРИГОТУВАННЯ БІТУМНИХ ЕМУЛЬСІЙ**

### **4.1 Мета та задачі досліджень. Об'єкт досліджень**

Одним з основних етапів в розробці нових конструкцій устаткування для приготування бітумних дорожніх емульсій, в основу роботи яких покладене кавітаційне диспергування складових компонентів, є експериментальне дослідження з метою дослідження взаємозалежностей між параметрами і характеристиками нового запропонованого устаткування та фізико-механічними властивостями оброблюваної сировини.

Для досягнення поставленої мети розв'язувались такі задачі:

- перевірка працездатності об'єкта досліджень – експериментального зразка установки для приготування бітумних емульсій, що здійснює кавітаційну технологію емульгування бітуму;
- перевірка адекватності прийнятих припущень при складанні математичних моделей робочого процесу;
- встановлення реальних закономірностей зміни фізико-механічних властивостей отриманої сировини при регулюванні параметрів кавітаційної обробки компонентів емульсії;
- підтвердження основних положень теоретичного аналізу процесу приготування бітумних емульсій за допомогою кавітаційної технології емульгування бітуму.

Перед проведенням експериментальних досліджень було попередньо визначено параметри, що підлягають реєстрації і обробці. Необхідність і достатність цих параметрів полягає у пошуку можливостей розв'язання задач, які ставилися перед експериментальними дослідженнями.

Для експериментальних досліджень був спроектований і виготовлений стенд, принципова схема та загальний вигляд якого наведені, відповідно, на рис. 4.1 та рис. 4.2.

Експериментальні дослідження об'єкта досліджень проводилися у науково-дослідній лабораторії гідродинаміки Вінницького національного технічного університету з використанням відповідного обладнання та засобів для реєстрування вимірювальних величин. Необхідний склад бітумної емульсії, якість матеріалів і відповідність технології виготовлення контролювалася в умовах лабораторії гідродинаміки ВНТУ та лабораторії ВАТ «Південьзахідшляхбуд» м. Вінниця.

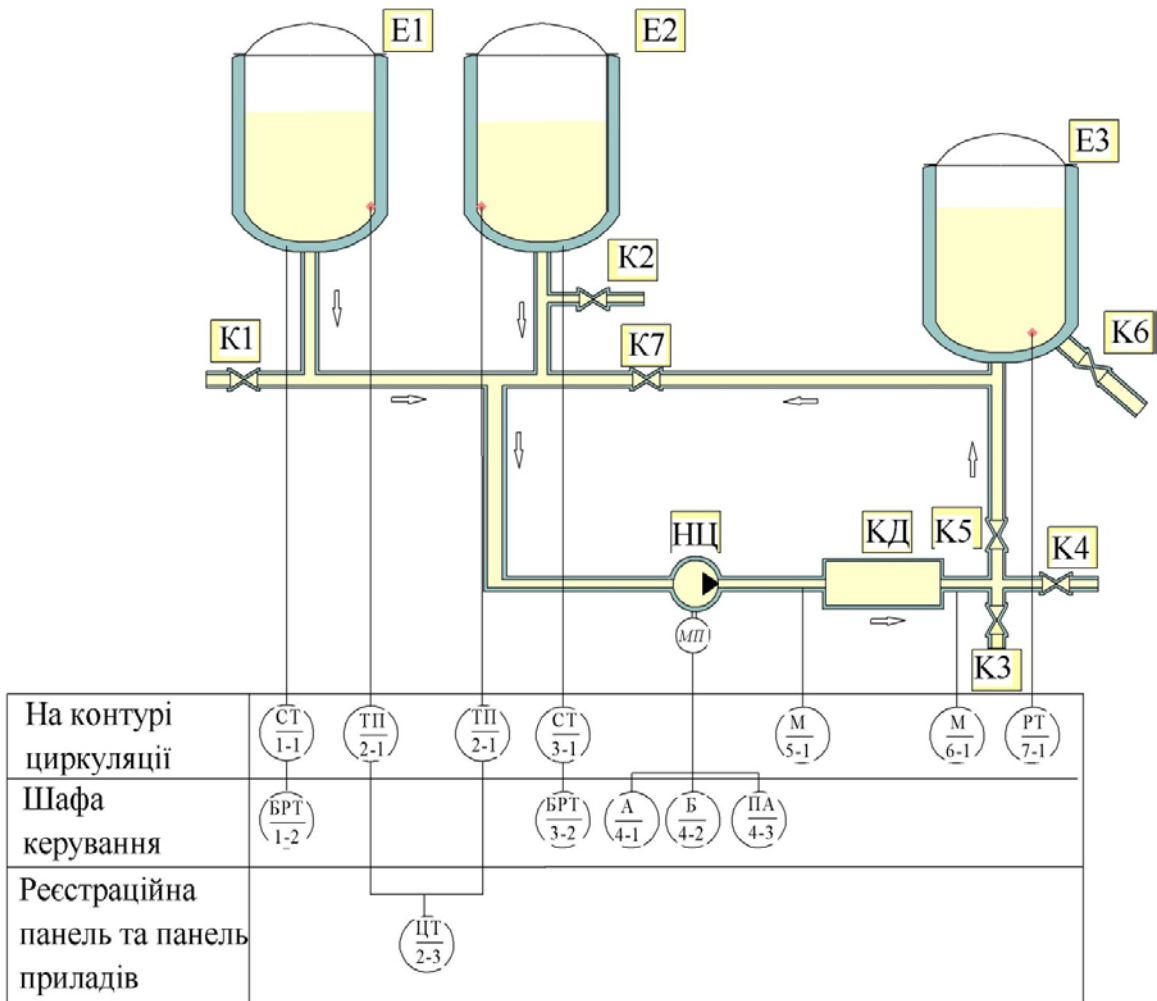


Рисунок 4.1 – Принципова схема експериментального станда: Є1, Є2 – ємності для збереження компонентів емульсії; Є3 – ємність для збереження готової емульсії; К1...К7 – запірно-регулююча арматура установки; КД – кавітаційний диспергатор; НЦ – насос циркуляційний

Є1 та Є2 – ємності для збереження бітуму та водного розчину емульгатора та кислоти об'ємом по 2,5 л кожна; Є3 - ємність для готової емульсії об'ємом 5 л.

Насос НЦ типу НШ 10–3 ГОСТ 8753–80 призначений для транспортування досліджуваного середовища по циркуляційному контуру. Приводиться в дію трифазним асинхронним двигуном потужністю 1,2 кВт.

В розробленій установці регулюється тиск на вході у вузол емульгування, положення робочого органу кавітатора відносно його дифузійної частини, контролюються температури компонентів та готової емульсії, фіксується тиск на вході та на виході з вузла емульгування.



Рисунок 4.2 – Загальний вигляд випробувального стенду

Контрольно-вимірвальна апаратура стенду наведена в таблиці 4.1.

Експериментальний стенд (див. рис. 4.1) складається з таких блоків: контуру циркуляції; шафи керування та контрольно-вимірвального вузла.

Таблиця 4.1 – Контрольно-вимірювальна апаратура стенда (див. рис. 4.1)

Позначення	Назва	Кількість
1-1	Термоперетворювач напруги мідний ТСМ-0879-01 ГОСТ 6654-84	1
1-2	Блок регулювання температури БРТ-3 ТУ УЗ.11-05814256-107-98	1
2-1	Термопара занурювальна контактна АТА-2102 тип ТХА (К)	1
2-2	Термопара занурювальна контактна АТА-2102 тип ТХА (К)	1
2-3	Цифровий реєструвальний пристрій Meterman TMD 90	1
3-1	Термоперетворювач напруги мідний ТСМ-0879-01 ГОСТ 6654-84	1
3-2	Блок регулювання температури БРТ-3 ТУ УЗ.11-05814256-107-98	1
4-1	Амперметр Э 8030-М1, ТУ25-04.4050-81	1
4-2	Вольтметр Э 8030 ТУ25-04.4050-81	1
4-3	Пускова апаратура для керування електродвигуном	1
5-1	Манометр МТП-100 клас точності 2,5 ГОСТ 2405-80	1
6-1	Манометр МТП-100 клас точності 2,5 ГОСТ 2405-80	1
7-1	Ртутний термометр ТТЖ-М ГОСТ 2823-59 (°C)	1

Тиск на вході та на виході з кавітаційного диспергатора фіксувався за допомогою манометра МПТ-100, технічні характеристики якого представлені в таблиці 4.2.

Таблиця 4.2 – Технічна характеристика манометра МТП-100

Робочий діапазон	0..1,6 МПа
Клас точності	2,5
Температура навколишнього середовища, °C	-10 ... +60
Вологість оточуючого середовища, %	до 100 % (при 25 °C)
Температура робочого середовища, °C	до 95
Маса манометра (не більше), кг	1,5
Ступінь захисту від зовнішніх твердих предметів та пилу і води	IP50
Міжповірочний інтервал	1 рік

Манометри під'єднувалися до трубопроводів через розділювач середовищ РМО-19, технічні характеристики якого наведені в таблиці 4.3.

Таблиця 4.3 – Технічна характеристика розділювача середовищ РМО-19

Робочий діапазон	0,025..2,5 МПа
Максимально допустимий тиск (короткочасно)	4 МПа
Тиск руйнування	6 МПа
Температура середовища	-30 °С ...+100 °С
Матеріал під'єднання фланців, болтів	нерж. сталь SS 304
Матеріал мембрани	нерж. сталь SS 316
Маса розділювача (не більше), кг	2,4

Для контролювання температури готової продукції в експериментальних дослідженнях застосовувався термометр технічний ртутний марки ТТЖ-М, технічна характеристика наведена в таблиці 4.4.

Таблиця 4.4 – Технічні характеристики термометра технічного ртутного ТТЖ-М

Марка термометра	ТТЖ-М
Довжина верхньої частини термометра, мм	240
Стандартні довжини нижньої частини, мм	66, 100, 160
Діаметр оболонки верхньої частини, мм	20
Діаметр оболонки нижньої частини, мм	9
Ціна поділки, °С	1
Діапазон вимірювання, °С	0–100
Термометрична рідина термометра ТТЖ-М	ртуть

Випробувальний стенд обігрівається за допомогою нагрівальних стрічок ЭНГЛ-1-0,66/220(180С)-16,48: максимальна температура – 180 °С; питома потужність – 40 Вт/м; номінальна потужність – 660 Вт; електричний опір – 74 Ом; довжина – 16,48 м.

Для регулювання та підтримання заданих параметрів температур нагрівальних стрічок на шафі керування встановлені блоки регулювання температури БРТ-3, які за допомогою сенсорів температури (технічні характеристики сенсорів наведені в таблиці 4.5), що встановлені на нагрівальних стрічках, фіксують дійсне значення температур та, відповідно, змінюють напругу живлення нагрівальних стрічок. Реєстрування температури відбувається безперервно.



Таблиця 4.5 – Технічні характеристики сенсора тиску

Тип	TSM-0879-01
Позначення номінальної статичної характеристики	50M
Межі вимірювання, °C	-50...200
Матеріал захисної арматури	Сталь 08X13
Довжина монтажної частини, мм	60
Інерційність, с	30
Умовний тиск, МПа	0,4
Допустиме відхилення значень температури	± 0,1 %

Технічні характеристики блока регулювання температури БРТ-3 наведені в таблиці 4.6.

Реєстрація температури вхідної сировини фіксується за допомогою цифрового реєструвального пристрою Meterman TMD 90 (рис. 4.3), до якого під'єднані давачі тиску АТА-2102. Цифровий термометр має трійний дисплей із підсвічуванням, що дозволяє одночасно продивлятися вимірювання T1, T2 та T1-T2. Через USB вихід реєструвальний пристрій Meterman TMD 90 під'єднується до ПК, в якому за допомогою спеціального програмного забезпечення Meterman TMSW фіксуються температури компонентів емульсії у вигляді графіків залежності температур від часу.

На шафі керування також розміщені пристрої для контролю параметрів роботи стенду: напруги, сили струму, використовуваної потужності, а також пускорегулювальна апаратура та автоматика захисту насоса.

Таблиця 4.6 – Технічні характеристики блока регулювання температури БРТ-3

Напруга живлення, В	220
Споживана потужність, Вт	8
Використаний давач тиску	TSM, ТСП
Діапазон заданих температур регулювання, °C	Від 0,1 до 3 °C
Точність підтримання температури	В межах нечутливості (повернення)
Спосіб увімкнення завантаження	Контактний
Комутаційна здатність вихідних кіл напруги, В	220 (50 Гц)
Струм, А	2
Діапазон зони	
- пропорційності, °C	плавно регулюються
- нечутливості, °C	0,5 – 10
Режим роботи	Двухпозиційний
Ступінь захисту:	
- зовнішньої панелі	IP54
- корпусу	IP20
- роз'єму	00
Наявність індикації	немає
Габаритні розміри (Н×L×В), мм	87×100×167
Маса, кг, не більше	0,85



Рисунок 4.3 – Реєструвальний пристрій Meterman TMD 90 під'єднаний до експериментальної установки

Використані вимірювальні прилади пройшли державну повірку у відповідності до ГОСТ 8.002-71 «Організація і порядок повірки засобів вимірювання» (контроль міжповірочних інтервалів здійснювався метрологічною службою Вінницького національного технічного університету). До і після експериментів давачі тарувались.

Таблиця 4.7 – Характеристики давачів тиску АТА - 2102

Тип термопари	ТХА
Позначення	К
Матеріал термоелектродів позитивний	Сплав хромель (90,5 % Ni + 9,5 % Cr)
від'ємний	Сплав алюмель (94,5 % Ni + 5,5 % Al, Si, Mn, Co)
Діапазон робочих температур, °С	-50...900
Довжина, мм	100
Діаметр, мм	3,2
Допустима похибка, %	0,1

Таблиця 4.8 – Характеристика вимірювача температури Meterman TMD 90

Інтерфейс	RS232
Сумісні термопари	К, J, T, R, Se, E
Ціна ділення, °С	0,1
Точність	± 0,1 % + 0,7 °С
Робоча температура, °С	0...50
Батарея	1 шт. 9V тип 6LR61/6F22
Розміри, мм	70×180×31
Маса, кг	0,230

Кавітаційний диспергатор КД представлений статичним СК – апаратом із симетрично розміщеними відносно осі кавітатором у вигляді тіла обертання (рис.4.4).

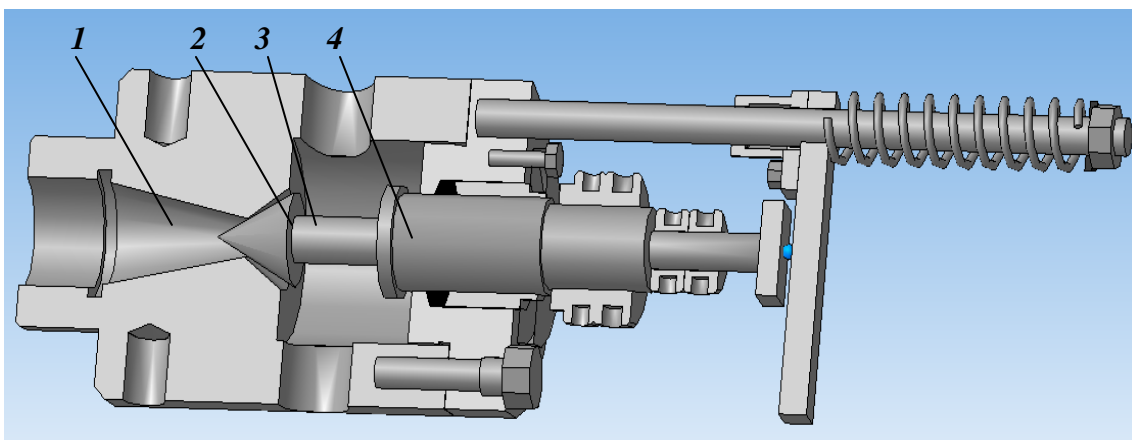


Рисунок 4.4 – Експериментальний кавітаційний диспергатор

Базовими елементами кавітаційного диспергатора є: конфузорна 1, дифузорна 2 частини кавітаційного диспергатора та кавітатор 3, виконаний у вигляді конуса. За рахунок зміни площі поперечного перерізу отвору між внутрішньою поверхнею дифузорної частини кавітаційного диспергатора 2 та зовнішньою поверхнею кавітатора 3 регулюванням положення кавітатора 3 вздовж осі за допомогою напрямного стержня 4 в кавітаційному диспергаторі виникають значні градієнти гідродинамічних та термодинамічних параметрів (тиску, температури, швидкості та інші), що забезпечують умови динамічного подрібнення дисперсної фази гетерогенної системи в камері змішування 5.

Витрата бітумної емульсії визначалася ваговим способом за допомогою мірної ємності, що встановлювалася на ваги, та секундоміра.

Для проведення досліджень процесу диспергування та аналізу властивостей досліджуваної системи згідно з рекомендаціями випробування готової бітумної емульсії [30], додатково використовували: скляну паличку за ГОСТ 25336; дротяні сита № 1,25; № 0,14 за ГОСТ 6613; порцелянові чашки об'ємом 100 мл за ГОСТ 9147; термометри ртутні за ГОСТ 400; шафу сушильну типу СНОЛ-3,5,3,5,3,5/3, 5-М1, ТУ16-681.032-81; секундомір; індикаторні папірці, ТУ 6-09-1181-71; ваги лабораторні ВЛКТ-500-М, кл. 4, ТУ 25-06.1101-79; циліндр мірний; нитка; фільтр беззольний; плитка електрична; баня піщана; бюкси; віскозиметр типу ВУ ГОСТ 1532-81 №769 1986; колба з пробкою; прилад для струшування; мікроскоп для морфологічних досліджень «МИКМЕД-1», ТУ 9443-077-07502348-97.

## 4.2 Основні характеристики сировини для виготовлення бітумної дорожньої емульсії

Склад та якість вхідних матеріалів для приготування катіонної бітумної емульсії на експериментальній установці нормувалися згідно з ДСТУ Б В.2.7-129:2006 п. 6.4 [30].

**4.2.1. Бітум** використовувався в'язкий нафтовий дорожній ВАТ «Лукойл-Одеський НПЗ» марки БНД 90/130, що відповідає вимогам ДСТУ 44044–2001 [14]. В таблиці 4.8 наведені фізико-механічні властивості використаного в роботі бітуму.

Таблиця 4.8 – Фізико-механічні властивості проби бітуму БНД 90/130

№ п/п	Найменування показника	Норма за нормативним документом	Результат випробування	Метод контролювання
1	Глибина проникності голки (пенетрація), 0,1 мм – за температури 25 °С – за температури 0 °С	від 91 до 130 не менша 28	105 30	ГОСТ 11501-78
2	Температура розм'якшення бітуму, °С	не нижча 43	45	ГОСТ 11506-73
3	Розтяжність (дуктильність), см – за температури 0 <sup>0</sup> С – за температури 25 <sup>0</sup> С	не менше 4,0 не менше 65	6,5 >100	ГОСТ 11505-75
4	Зміна властивостей після прогрівання: – зміна маси після прогрівання, %  – залишкова пенетрація, %  – зміна температури розм'якшення, °С	не більша 1,0  не менша 55  не більша 5,0	0,8  68  4,5	ГОСТ 18180-72 з додатком п. 8.3 ДСТУ 4044-2001 ГОСТ 11501-78 з додатком п. 8.4 ДСТУ 4044-2001 ГОСТ 11506-73 з додатком п. 8.5 ДСТУ 4044-2001
5	Температура крихкості, °С	не вища –17	–22	ГОСТ 11507-78
6	Температура спалаху у відкритому тиглі, °С	не нижча 230	286	ГОСТ 4333-87
7	Зчеплюваність із поверхнею скла	не нормується, визначення обов'язкове	33,5	ДСТУ Б В.2.7-81-98 з додатком п. 8.6 ДСТУ 4044-2001
8	Масова частка парафінів, %	не нормується, визначення обов'язкове	3,3	ГОСТ 17789-72
9	Розчинність в органічному розчиннику, %	не менша 99,00	99,96	ГОСТ 20739-75
10	Індекс пенетрації	від –2,0 до +1,0	–1,0	п. 8.7 ДСТУ 4044-2001

**4.2.2. Вода** мала жорсткість меншу 6 мг-екв/л. Жорсткість води усувалася кип'ятінням.

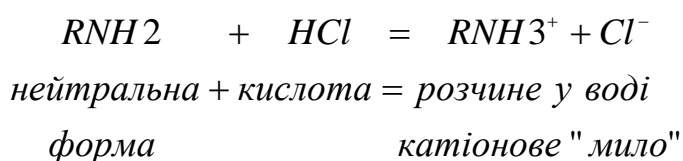
**4.2.3. Емульгатор.** Як емульгатор використовувався емульгатор REDICOTE RM007 виробник Шведська фірма Akzo Nobel. До складу емульгатора входить алкіламініентоксілат 35 % та алкілдіамініентоксілат 55 %. Основні фізико-хімічні властивості цього емульгатора наведені в таблиці 4.9 [72].

Таблиця 4.9 – Фізичні та хімічні властивості емульгатора REDICOTE RM007

Зовнішній вигляд	Рідина
Колір	Жовтий
Точка кипіння / межа	>100 °C
Точка плавлення / межа	<0 °C
Точка займання	100 – 200 °C
Температура самозаймання	>100 °C
Густина (t = 20 °C)	920 кг/м <sup>3</sup>
В'язкість(t = 20 °C)	440 мПа·с
Розчинність у воді	Емульгується
Розчинність в інших розчинниках	Розчинний в етанолі та октанолі

Цей катіоновий емульгатор є нейтральною, нерозчинною у воді рідиною. Для утворення катіонової форми його необхідно нейтралізувати соляною, фосфорною, оцтовою чи сірчаною кислотою.

**4.2.4. Соляна кислота.** Під час проведення експерименту для нейтралізації емульгатора використовувалася соляна кислота, що відповідає вимогам ГОСТ 857-88, марка Б (таблиця 4.10).



Таблиця 4.10 – Фізико-хімічні показники соляної кислоти, що використовувалася в роботі

№ з/п	Найменування показника	Норма за нормативним документом	Результат випробування	Метод контролювання
1	Зовнішній вигляд	Прозора безбарвна або жовта рідина	Прозора рідина жовтого кольору	Візуально

Продовження табл. 4.10

№ з/п	Найменування показника	Норма за нормативним документом		Результат випробування	Метод контролювання
		(А)	(Б)		
2	Масова частка хлористого водню, %, не менший	35	31,5	(Б) 32,1	Згідно з ГОСТ п. 3.5
3	Масова частка заліза, (Fe), не більша	0,001	0,015	0,012	Згідно з ГОСТ п. 3.6
4	Масова частка залишку після випалювання, % не більший	0,01	0,10	0,07	Згідно з ГОСТ п. 3.7
5	Масова частка миш'яку (As), % не більший	0,0003		0,0001	Згідно з ГОСТ п. 3.10

Кількість соляної кислоти встановлювалося практично. рН розчину емульгатора у воді має бути 2,5. Якщо рН більший ніж 2,5, то необхідно додати ще HCl [68].

#### 4.3 Методика експериментальних досліджень і оцінка точності вимірювань

В залежності від програми конкретного дослідження перед його початком проводилася підготовка випробовуваного експериментального стенду, зокрема, експериментального кавітаційного диспергатора. Виконувалися необхідні вимірювання і регулювання положення кавітатора відносно внутрішньої поверхні дифузорної частини кавітаційного диспергатора. Окрім того, перевірялося закріплення давачів, стан з'єднувальних дротів, заземлення і налагоджування вимірювальної апаратури.

Порядок проведення експериментальних досліджень нової технології виготовлення бітумних емульсій відбувається в такій послідовності:

- увімкнути обігрів установки;
- встановити задану температуру на блоках регулювання температури БРТ - 3;
- довести температуру системи до заданої регламентом досліджень;
- відміряти необхідну кількість компонентів системи ваговим або об'ємним способом;
- підготувати суміш емульгатора та кислоти;
- віддозовані компоненти помістити у відповідні ємності установки;
- встановити режим роботи кавітаційного диспергатора;
- увімкнути циркуляційний насос;

– провести вимірювання параметрів роботи кавітаційного диспергатора.

В процесі досліджень вимірюються та фіксуються такі величини:

- струм, який споживає насос;
- тиск в системі до та після кавітаційного диспергатора;
- температура бітуму, суміші емульгатора та кислоти, а також температура готової бітумної емульсії;
- масова або об’ємна витрата через кавітаційний диспергатор;
- тривалість процесу.

Властивості отриманої бітумної емульсії повинні відповідати вимогам ДСТУ Б В.2.7-129:2006. Перевірялися такі показники для даної бітумної емульсії [30]: однорідність, умовна в’язкість, стійкість при зберіганні, стійкість при транспортуванні, зчеплення з поверхнею мінерального матеріалу, швидкість розпаду, водневий показник (рН) та дисперсність. Згідно з [68] проби емульсії відбиралися та досліджувалися через добу після її приготування. Випробовування проводилися згідно зі стандартними методиками [30].

Після обробки експериментальних даних результати представлялись у вигляді графічних залежностей.

При значній кількості вимірювань, похибки вимірювань розподіляються за законом, близьким до нормального. Для знаходження дійсного значення вимірюваного параметра та його середнього квадратичного відхилення використовувалися формули [59]:

$$\bar{X} = \frac{1}{n}(x_1 + x_2 + \dots + x_n);$$
$$\sigma = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{X})^2}{n-1}}, \quad (4.1)$$

де  $x_i$  – виміряна величина параметра;  $\bar{X}$  – середнє арифметичне виміряної величини, яке приймають за дійсне;  $n$  – кількість вимірювань.

При  $n < 30$  можна використати квантілі розподілення Стюдента  $t$ . В такому випадку довірче значення похибки оцінки  $\bar{X}$  при значенні довірчої імовірності  $p = 0,95$  знаходиться так [59]:

$$\Delta_{0,95\bar{X}} = t_{0,95} \frac{\sigma}{\sqrt{n}}. \quad (4.2)$$

#### 4.4 Планування багатofакторного експерименту

Для удосконалення технології отримання та поліпшення якості бітумної емульсії необхідні дослідження процесів диспергування дисперсних частинок в системі «рідина – рідина». Дослідження особливостей диспергування бітуму у водному розчині емульгатора виконувалися на експериментальному стенді та обладнанні описаному у п. 4.1.

До виконання експериментальних досліджень було здійснено планування експерименту [36, 87]. Параметром оптимізації була обрана дисперсність емульсії. Дослідження процесів диспергування бітуму в розчині емульгатора відбувалося шляхом варіювання таких факторів:

$S$  – площі прохідного отвору кавітатора,  $\text{мм}^2$ ;

$n$  – частка бітуму в емульсії, %;

$p$  – тиск на вході в кавітатор, МПа.

Отже, дисперсність бітумної емульсії є функцією від 3 параметрів

$$d_q = f(S, n, p). \quad (4.1)$$

Дослідження впливу перерахованих вище факторів на дисперсність готової бітумної емульсії при проведенні однофакторних експериментів пов'язаний із значними труднощами і об'ємами робіт. Тому, на наш погляд, доцільно провести багатofакторний експеримент для отримання рівнянь регресії для функцій відгуку  $D$  за допомогою повнофакторного експерименту виду  $2^3$  методом Бокса–Уїлсона [1, 16].

З метою визначення діапазонів варіювання факторів функції (4.1) були проведені пошукові експерименти. Основна вимога – сукупність факторів в передбачених планом експерименту діапазонах мають бути чітко реалізовані та не приводити до протиріч. Для кожного фактора встановлені такі значення:  $X_{j0}$  – основний рівень фактора;  $X_{jmax}$ ,  $X_{jmin}$  – верхній та нижній рівні фактора;  $\alpha X_{jmax}$ ,  $\alpha X_{jmin}$  – зіркові верхній та нижній рівні фактора;  $\alpha$  – зіркові плечі;  $I_j$  – інтервал варіювання.

Фактори, що впливають на дисперсність бітумної емульсії розрізняються як за розмірністю, так і за порядками значення цих факторів. Для отримання поверхні відгуку цих функцій було проведено операцію кодування факторів, що являє собою лінійне перетворення факторного простору

$$x_j = \frac{(\tilde{X}_j - \tilde{X}_{j0})}{I_j} \quad (4.2)$$



Встановлено такі значення рівнів факторів в умовному масштабі: мінімальний  $-1$ , середній  $0$ , максимальний  $+1$  та зіркові значення  $-1,682$ ,  $+1,682$ .

Основні рівні, інтервали варіювання та межі області експериментальних досліджень наведені в таблиці 4.11.

Таблиця 4.11 – Рівні факторів та інтервали варіювання

Фактори	Рівні факторів					Інтервал варіювання
	$-1,682$	$-1$	$0$	$+1$	$+1,682$	
$x_1$ – площа прохідного отвору диспергатора, $\text{мм}^2$	34,5	54,125	73,75	93,375	113	19,625
$x_2$ – частка бітуму в емульсії, %	30	40	50	60	70	10
$x_3$ – тиск на вході в кавітатор, МПа	0,8	0,9	1	1,1	1,2	0,1

Для проведення повнофакторного експерименту виду  $2^3$  було складено матрицю планування експериментів, яка наведена в табл. 4.12.

Планувалось отримати такі регресійні моделі 2-го порядку:

$$y = b_0 + b_1x_1 + b_2x_2 + b_3x_3 + b_{12}x_1x_2 + b_{13}x_1x_3 + b_{23}x_2x_3 + b_{11}x_1^2 + b_{22}x_2^2 + b_{33}x_3^2, \quad (4.3)$$

де  $y$  – дисперсність емульсії;  $b_0, b_1, \dots, b_3, b_{12}, \dots, b_{13}, b_{11}, \dots, b_{33}$  – коефіцієнти регресії.

Для визначення токових оцінок  $b_0, b_1, \dots, b_3, b_{12}, \dots, b_{13}, b_{11}, \dots, b_{33}$  використовувався метод найменших квадратів [1, 16]:

$$B = Y \Phi^{-1}, \quad (4.4)$$

де  $B = \begin{bmatrix} b_0 \\ b_1 \\ \dots \\ b_k \end{bmatrix}$  – матриця, що містить коефіцієнти регресії;  $\Phi = F^T F$  – ін-

формаційна матриця Фішера;  $Y = \begin{bmatrix} y_1 \\ y_2 \\ \dots \\ y_N \end{bmatrix}$  – матриця, що містить результати експериментів за матрицею планування (табл. 4.12);

$$F = \begin{bmatrix} 1 & x_{1,1} & \dots & x_{1,k} \\ 1 & x_{2,1} & \dots & x_{2,k} \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ 1 & x_{N,1} & \dots & x_{N,k} \end{bmatrix} - \text{матриця, що містить значення факторів } x_{i,j}$$

(де  $i$  – номер дослідів за матрицею планування,  $j$  – номер фактора);  $k$  – кількість факторів;  $N$  – кількість дослідів за матрицею планування (табл. 4.12).

Таблиця 4.12 – Матриця планування експерименту для функції відгуку – дисперсність емульсії  $D$

№ дослідів	$X_0$	$X_1$	$X_2$	$X_3$	$X_1X_2$	$X_1X_3$	$X_2X_3$	$X_1^2$	$X_2^2$	$X_3^2$	$Y$
1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	7
2	1	-1	1	1	-1	-1	1	1	1	1	4
3	1	1	-1	1	-1	1	-1	1	1	1	5
4	1	-1	-1	1	1	-1	-1	1	1	1	2
5	1	1	1	-1	1	-1	-1	1	1	1	10
6	1	-1	1	-1	-1	1	-1	1	1	1	8
7	1	1	-1	-1	-1	-1	1	1	1	1	8
8	1	-1	-1	-1	1	1	1	1	1	1	5
9	1	-1,682	0	0	0	0	0	2,83	0	0	1
10	1	1,682	0	0	0	0	0	2,83	0	0	5
11	1	0	-1,682	0	0	0	0	0	2,83	0	5
12	1	0	1,682	0	0	0	0	0	2,83	0	8
13	1	0	0	-1,682	0	0	0	0	0	2,83	10
14	1	0	0	1,682	0	0	0	0	0	2,83	7
15	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	5
16	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	5
17	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	5
18	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	4
19	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	4
20	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	6
$b_i$	4,8236	1,1276	1,0081	-1,320	-0,12	0,12	-0,12	-0,30	1,803	1,310	
$b_{ei}$	8,0	0,26	0,12	-18,0	-0,001	0,166	-0,12	-0,0012	0,0001	-2,0	
t	15,711	6,3710	5,0477	-6,485	-0,46	0,469	-0,46	-3,20	3,040	6,606	$[t]=2,571$

Адекватність регресійних моделей перевірялася за критерієм Фішера [1]:

$$F = \frac{S_{ad}^2}{S_{eio\delta m}^2} \leq [F(f_1, f_2)], \quad (4.3)$$

де  $S_{ad}$  – дисперсія адекватності;  $S_{відм}$  – дисперсія відтворюваності;  $[F(f_1, f_2)]$  – критичне значення критерію Фішера, яке рівне значенню розподілу Фішера;  $f_1 = N - d$  – кількість ступенів вільності дисперсії адекватності;  $f_2 = n - 1$  – кількість ступенів вільності дисперсії відтворюваності;  $d$  – кількість значимих коефіцієнтів регресії (4.3);  $n$  – кількість попередніх повторних дослідів, які проведено для середнього (нульового) рівня факторів.

Розрахункове значення критерію  $F$  порівнювалося з критичним і при  $F > [F(f_1, f_2)]$  регресійна модель вважалася неадекватною.

Дисперсія відтворюваності визначалася за формулою [1, 16]

$$S_{відм}^2 = \frac{1}{f_2} \sum_{i=1}^n (y_i - \bar{y})^2, \quad (4.6)$$

де  $y_i$  – результат  $i$ -го повторного дослідів;  $\bar{y}$  – середнє арифметичне значення результатів  $n$  повторних дослідів.

Кількість дослідів для дрібнофакторного експерименту при квадратичній регресії визначалась за формулою [15]

$$N = 2^{k-1} + 2k + N_0, \quad (4.7)$$

де  $k$  – кількість факторів;  $2$  – кількість рівнів;  $N_0$  – кількість дослідів в центрі плану, приймаємо  $N_0 = f(k) = f(3) = 10$  згідно [15].

Для цього випадку  $N = 2^{3-1} + 2 \cdot 3 + 10 = 20$  дослідів.

Для забезпечення достатньої достовірності отриманих результатів необхідно для кожного виду експерименту (для кожної комбінації факторів) провести кількість дослідів не меншу ніж визначена за формулою [59]

$$n = \frac{V^2 t^2}{P^2}, \quad (4.8)$$

де  $t$  – показник достовірності;  $V$  – коефіцієнт мінливості досліджуваної величини;  $P$  – показник точності.

Згідно з рекомендаціями авторів роботи [59] довірча ймовірність  $P_p$  при нормуванні оцінки результуючої та випадкової похибок виміральної техніки вибирається в межах (0,8...0,9).

Для отримання довірчої ймовірності правильності отриманих результатів  $P_p = 0,9$ , показник достовірності має дорівнювати  $t = 1,96$  [57].

Для загального машинобудування показник точності не повинен перевищувати 5 %, тобто  $P = 0,05$  [50].

Коефіцієнт мінливості при вимірюванні температури і тиску рідини в заданому діапазоні не перевищує 6 %, тобто  $V = 0,06$  [50].

Тоді необхідна кількість дослідів при однакових умовах їх проведення

$$n = \frac{0,06^2 \cdot 1,96^2}{0,05^2} = 5,53.$$

Остаточно приймаємо  $n = 6$ . Тобто для кожних нових умов при зміні будь-якого параметра системи необхідно було провести не менше шести вимірювань.

Дисперсія адекватності визначалася за формулою [16]

$$S_{ad}^2 = \frac{1}{f_1} \sum_{i=1}^N (y_i - \tilde{y}_i)^2, \quad (4.9)$$

де  $y_i$  – результат  $i$ -го дослідів, проведеною за матрицею планування;  $\tilde{y}_i$  – результат  $i$ -го значення дослідів, передбаченого за допомогою регресійної моделі (3.3).

Значимість коефіцієнтів регресії проводилася за  $t$ -критерієм Стьюдента [1, 17]:

$$t_i = \frac{b_i}{S_{\text{вiдм}} \sqrt{c_{i,i}}} > [t(f_2)], \quad (4.9)$$

де  $[t(f_2)]$  – критичне значення  $t$ -критерію Стьюдента, яке рівне значенню розподілу Стьюдента;  $c_{i,i}$  – відповідний елемент матриці  $\Phi^{-1}$ .

Розрахункове значення критерію  $t_i$  порівнювалося з критичним і при  $t \leq [t(f_2)]$   $i$ -й коефіцієнт регресії вважався незначним.

Для функції відгуку  $D$  рівняння регресії згідно з проведенням багатofакторним експериментом для кодованих значень має вигляд:

$$d_y = 4,826 + 1,127x_1 + 1,0081x_2 - 1,32x_3 - 0,125x_1x_2 + 0,125x_1x_3 - 0,125x_2x_3 - 0,3x_1^2 + 1,803x_2^2 + 1,31x_3^2. \quad (4.10)$$

При цьому  $S_{\text{вiдм}}^2 = 0,57$ ;  $S_{ad}^2 = 0,68$ ;  $F = 1,2 < [F] = 1,7$ , отже регресійна модель (4.10) адекватна [1, 17]. Коефіцієнт кореляції  $R^2 = 0,95$ .

Як видно із табл. 3.4 всі коефіцієнти рівняння регресії (4.10) виявились значимими.

Для дійсних значень факторів рівняння регресії для функції відгуку  $D$  має вигляд:

$$d_y = 8 + 0,26S + 0,12n - 18p - 0,0012S^2 + 0,0001n^2 - 2p^2. \quad (4.11)$$

## 4.5 Результати експериментальних досліджень

За результатами проведених експериментальних досліджень було побудовано низку типових графічних залежностей між основними регульованими параметрами процесу й обладнання для кавітаційного диспергування компонентів бітумної емульсії та дисперсністю отриманої бітумної емульсії (рис. 4.5 – рис. 4.10).

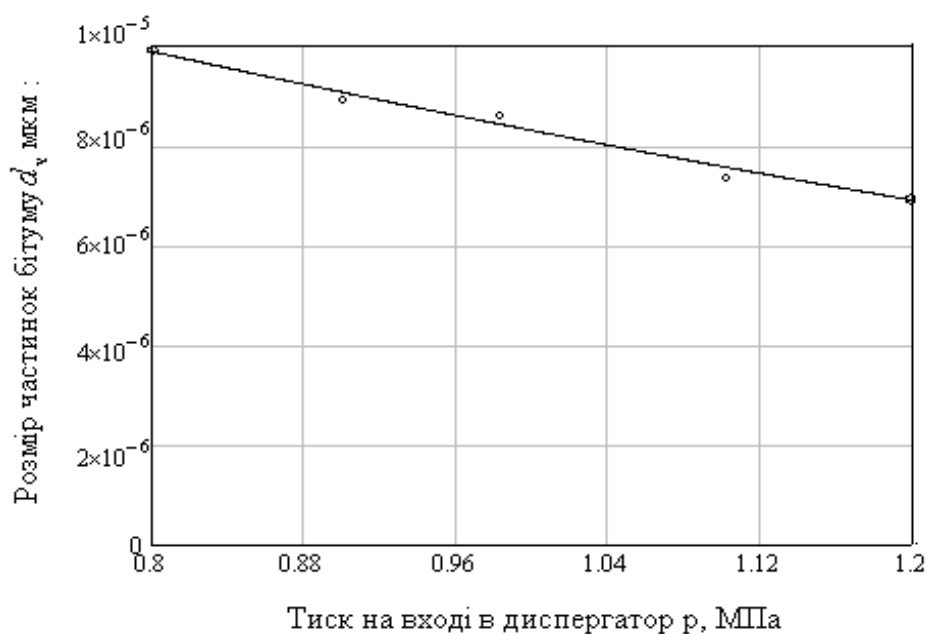


Рисунок 4.5 – Графічна залежність дисперсності отриманої бітумної емульсії від тиску на вході в диспергатор при  $S_2 = 73,5 \text{ мм}^2$ ,  $n = 50 \%$

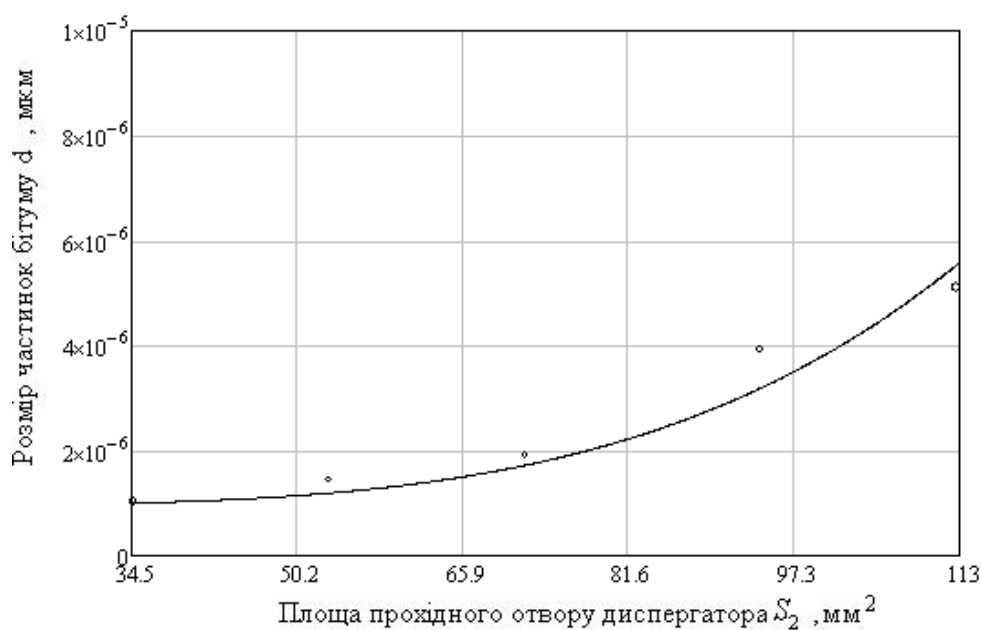


Рисунок 4.6 – Графічна залежність дисперсності отриманої бітумної емульсії від площі прохідного отвору диспергатора при  $p = 1,0 \text{ МПа}$ ,  $n = 50 \%$

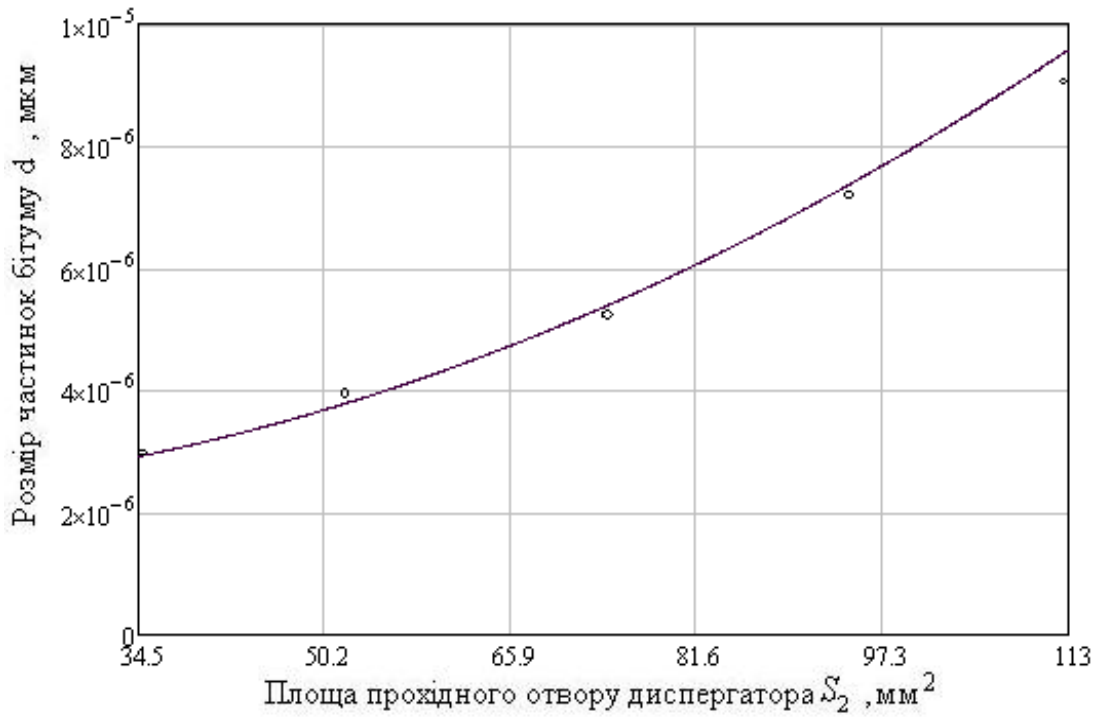


Рисунок 4.7 – Графічна залежність дисперсності отриманої бітумної емульсії від площі прохідного отвору диспергатора при  $p = 1,1 \text{ МПа}$ ,  $n = 60\%$

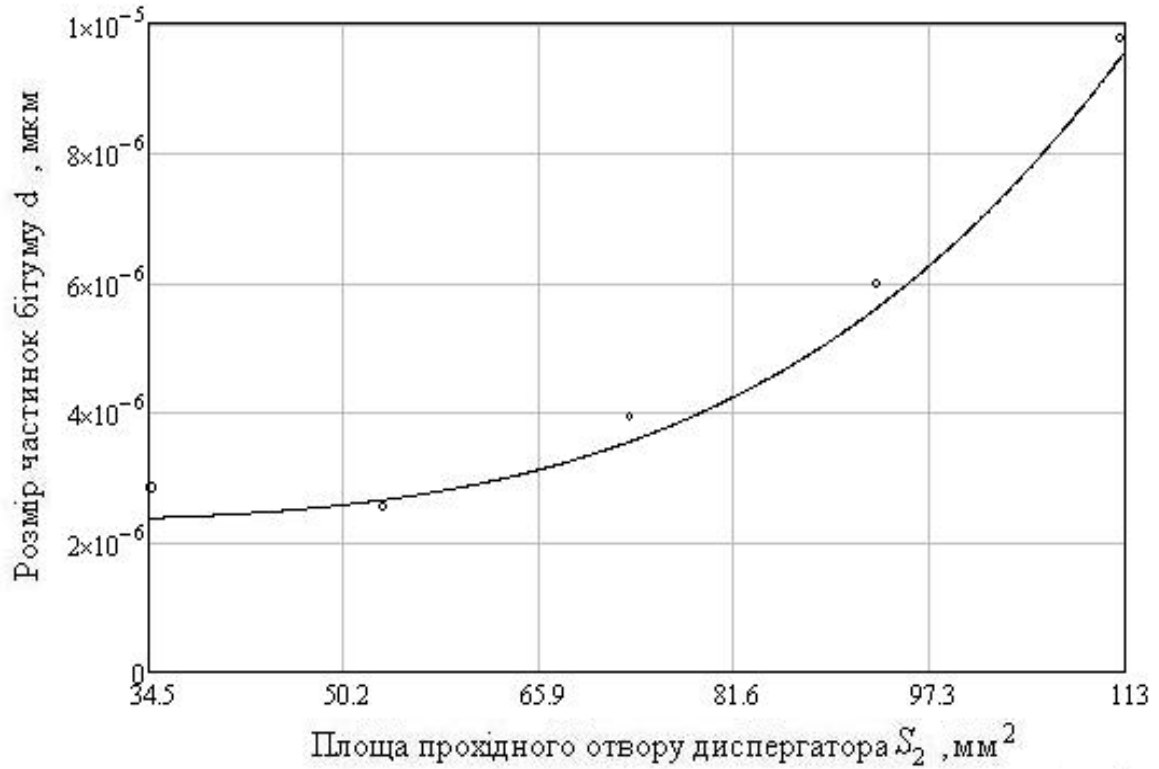


Рисунок 4.8 – Графічна залежність дисперсності отриманої бітумної емульсії від площі прохідного отвору диспергатора при  $p = 1,1 \text{ МПа}$ ,  $n = 40\%$

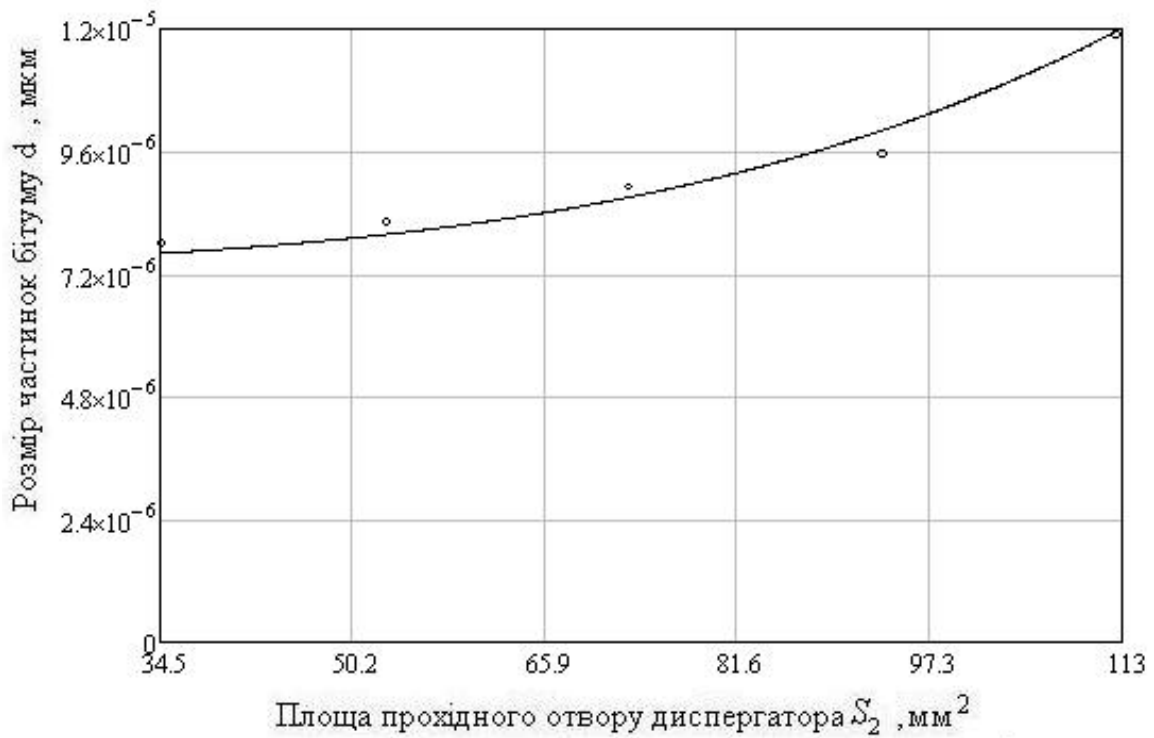


Рисунок 4.9 – Графічна залежність дисперсності отриманої бітумної емульсії від площі прохідного отвору диспергатора при  $p = 0,9 \text{ МПа}$ ,  $n = 60 \%$

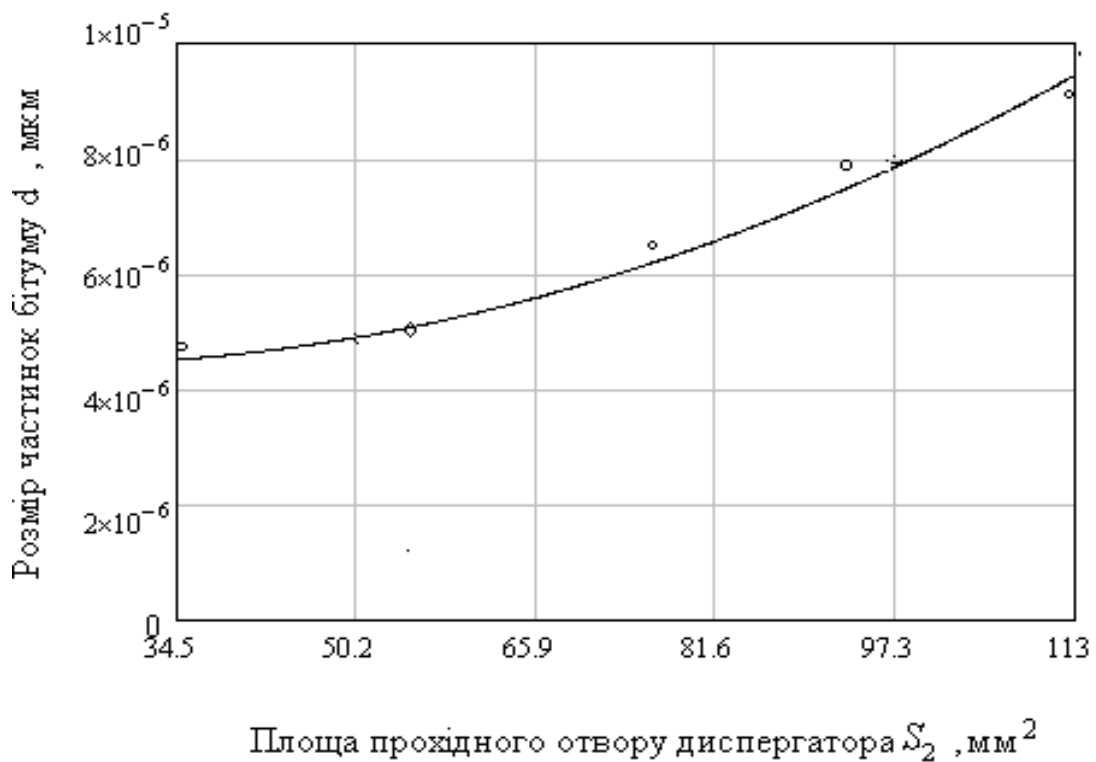


Рисунок 4.10 – Графічна залежність дисперсності отриманої бітумної емульсії від площі прохідного отвору диспергатора при  $p = 0,9 \text{ МПа}$ ,  $n = 40\%$

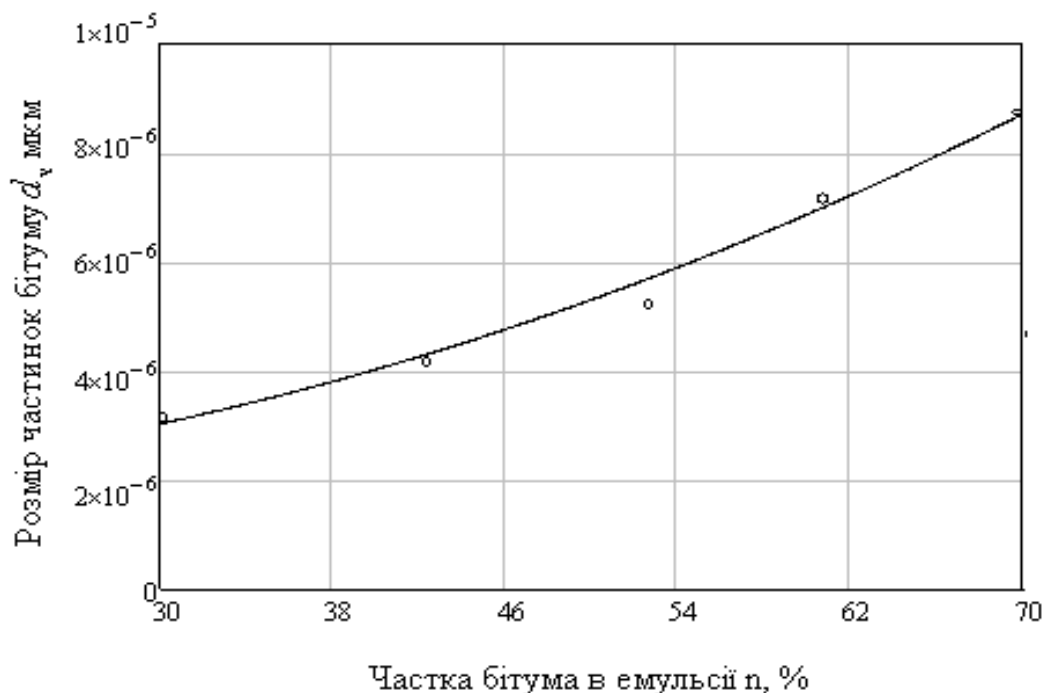


Рисунок 4.11 – Графічна залежність дисперсності отриманої бітумної емульсії від частки бітуму в емульсії при  $p = 1,2 \text{ МПа}$ ,  $S_2 = 70 \text{ мм}^2$

Аналіз отриманих графічних залежностей показав, що зменшення розміру частинок бітуму у отриманій бітумній емульсії можна досягти зменшенням площі прохідного отвору диспергатора, а також збільшенням тиску на вході в кавітаційний диспергатор, або зменшенням частки бітуму в емульсії.

Отримане рівняння регресії (4.11) дозволяє провести параметричну оптимізацію дисперсності бітумної емульсії  $D$  з мінімальним її значеннями.

Експерименти показали, що значення величини дисперсності  $D$  залежить від таких параметрів: площі прохідного отвору кавітатора  $S$ , частки бітуму в емульсії  $n$  та тиску до кавітатора  $p$  і носять квадратичний характер. Ефекти взаємодій факторів є несуттєвими і мають бути вилучені із загального рівняння регресії.

За допомогою пакета прикладних програм MathCAD 14 було проведено оптимізацію значень дисперсності  $D$  шляхом їх мінімізації. В результаті отримані такі оптимальні значення параметрів процесу виготовлення бітумної емульсії для мінімального значення величини дисперсності емульсії  $D = 2 \text{ мкм}$ ;  $S = 34,5 \text{ мм}^2$ ;  $n = 30 \%$ ;  $p = 1,2 \text{ МПа}$ .



На рис. 4.12 показані поверхні відгуків критеріїв оптимізації та їх двовимірні перерізи залежності значень величин дисперсності  $D$  від окремих параметрів оптимізації.

Поверхні відгуків дозволяють наочно проілюструвати залежність значень величин дисперсності від параметрів: площі поперечно-го перерізу, частки бітуму в емульсії та тиску до диспергатора.

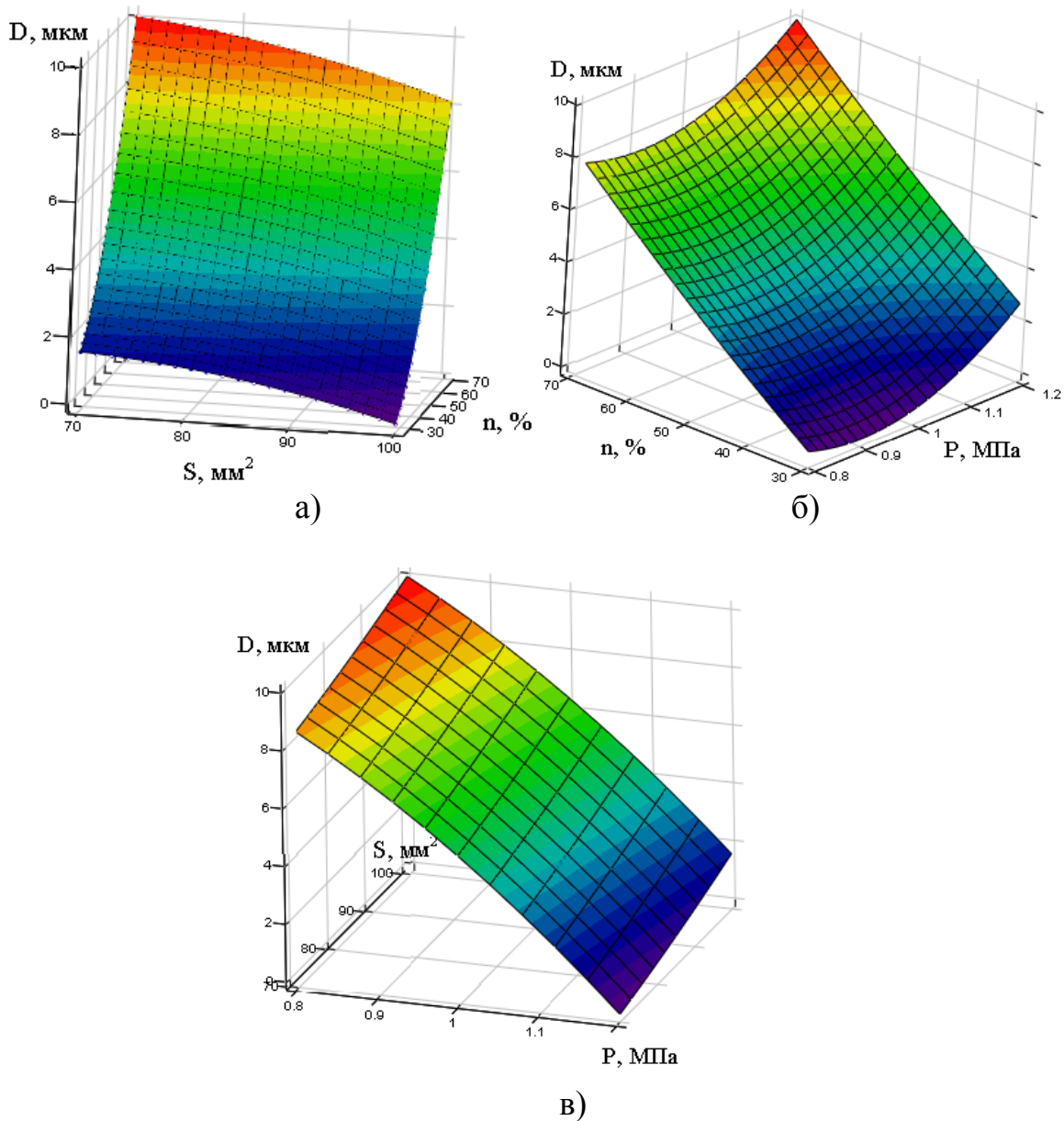


Рисунок 4.12 – Поверхні відгуків та їх двовимірні перерізи залежності значень величини дисперсності в площинах параметрів оптимізації:

а)  $S - n$ ; б)  $S - p$ ; в)  $n - p$

#### 4.6 Випробування отриманої продукції – бітумної емульсії на відповідність вимогам

Отримані зразки готової бітумної дорожньої емульсії повинні відповідати вимогам, що ставляться до катіонних бітумних емульсій. Після стадії підготовки: ретельного перемішування та проціджування крізь сито 0,63 мм, що змочене розчином кислоти, емульсія випробувалася згідно з рекомендаціями ДСТУ Б В.2.7-129:2006 [30].

Зовнішній вигляд визначався візуальним обстеженням поверхні скляної палички після її занурення в емульсію. Поверхня скляної палички була вкрита блискучою однорідною темно-коричневою плівкою, без частинок непроемуюльгованого бітуму.

Водневий показник (рН) визначався шляхом нанесення на індикаторний папірець (ТУ 6-09-1181-71) краплі емульсії і порівнянням кольору водної витяжки навколо краплі зі стандартною шкалою кольорів рН згідно з ГОСТ 8.120 (рис. 4.13). Показник рН бітумної емульсії складає 2, що відповідає вимогам ДСТУ Б В.2.7-129:2006.



Рисунок 4.13 – Визначення рН отриманої бітумної емульсії

Для визначення однорідності використовували сито № 0,14 мм. Перед випробуванням сито зважили ( $m_c=120$  г) та обробили розчином соляної кислоти. Через сито проціджували емульсію одночасно з додаванням водного розчину. Далі сито з залишками висушували у сушильній шафі при температурі 100 °С, охолоджували та зважували.

Ступінь однорідності визначається за формулою [55]

$$H = \frac{m_z - m_c}{m_e} \cdot 100, \quad (4.12)$$

де  $m_3$  – маса сита разом із залишками, г;  $m_c$  – маса сита, г;  $m_2$  – маса емульсії, г (200 г).

За результат прийняте середнє арифметичне двох паралельних випробувань. Однорідність бітумної емульсії 47 %.

Зчеплення плівки емульсованого в'язучого з поверхнею мінерального матеріалу визначалося шляхом візуального обстеження поверхні щебеню після кип'ятіння у дистильованій воді попередньо занурених у бітумну емульсію зерен щебеню.

Для проведення цього випробування використовували щебінь гранітний фракції 40 мм 3 шт. Щебінь обв'язували ниткою та занурювали на 2 с у дистильовану воду, а потім 2–3 рази у емульсію. Через добу зерна вкриті в'язучим занурювали у киплячу воду і кип'ятили протягом 30 хв. Далі зерна щебеню охолоджували у склянці холодної води. Поверхня була вкрита в'язучим і лише в деяких місцях пошкодилася, що відповідає стандарту, тобто було вкрито в'язучим > 95 % поверхні.

Умовна в'язкість характеризувалася тривалістю в секундах протягом якої 50 мл емульсії витече із віскозиметра через отвір 3 мм (згідно з ГОСТ 11503) при температурі емульсії 20 °С. Для випробувань використовували віскозиметр типу ВУ ГОСТ 1532-81 №769 1986 (рис. 4.14.).

Умовна в'язкість отриманої бітумної емульсії склала 56 с. Згідно з ДСТУ Б В.2.7-129:2006 цей показник відповідає нормі для такої марки бітумної емульсії.

Стійкість при зберіганні характеризують масою часток емульсії розміром більше 0,14 мм після її зберігання за температури (20 ± 5) °С протягом 7 та 14 діб. Порядок випробування та обладнання таке саме як і при визначенні однорідності емульсії.

Стійкість емульсії при транспортуванні оцінювалася здатністю її розпадатися після струшування в спеціальному приладі протягом 2 год., згідно з ГОСТ 18659. Випробування проводилися у такій послідовності: ретельно перемішану бітумну емульсію дозують по 200 мл у скляні колби, які потім щільно закривають пробками та встановлюють на площину приладу та затискають затискачами. Прилад вмикають у мережу та фіксують час початку струшування. Після 2 годин струшування, дочекавшись аби осіла піна проводять візуальне обстеження. Оскільки розшарування не спостерігалось, тобто виготовлена емульсія за цим показником відповідає вимогам стандарту [30].



Рисунок 4.14 – Віскозиметр типу ВУ ГОСТ 1532-81 №769 1986 для випробування бітумної емульсії

Індекс розпаду визначався шляхом введення в  $(100 \pm 1)$  г емульсії цементу (ПЦ-400 згідно з ДСТУ Б В.2.7.-46-96), який рівномірно засипається в чашку з емульсією при постійному перемішуванні до повного руйнування емульсії і утворення тістоподібної маси, що не прилипає до стінок чашки. Випробування вважалося закінченим коли на дні або стінках чашки з'явиться вода. За індексом penetрації визначають тип емульсії: при індексі penetрації  $\leq 20$  % – швидкокорозпадна, від 20 – 80 % – середньорозпадна, та при  $\geq 80$  % – повільнорозпадна.

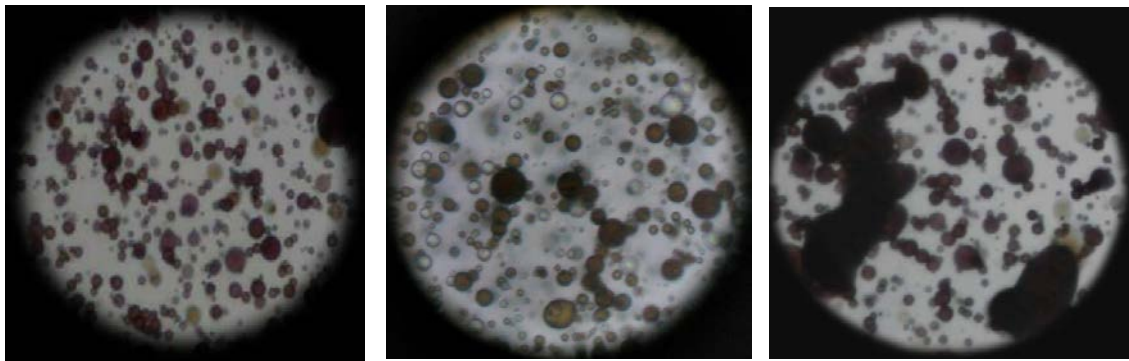
Індекс розпаду емульсії у відсотках (з точністю до 0,1 %) розраховують за формулою [30]

$$I_p = \frac{m_3 - m_2}{m_2 - m_1} \cdot 100, \quad (4.13)$$

де  $m_1$  – маса чашки зі шпателем, г;  $m_2$  – маса чашки зі шпателем та емульсією, г;  $m_3$  – маса чашки зі шпателем, емульсією та цементом, г.

Індекс penetрації досліджуваної бітумної емульсії 95 %, що відповідає повільнорозпадній емульсії.

Дисперсний склад проб на кожному етапі експерименту визначався мікроскопом «МИКМЕД-1» ТУ 9443-077-07502348-97. На рис. 4.15 наведені мікрофотографії досліджуваної бітумної емульсії при збільшенні мікроскопом «МИКМЕД-1» в 600 разів.



а)

б)

в)

Рисунок 4.15 – Фотографії досліджуваної бітумної емульсії:  
 а) наступної доби після приготування, б) через 7 днів після приготування,  
 в) через 14 днів після приготування

За результатами підрахунку побудовано експериментальну криву розподілу краплинок бітуму за розмірами (рис. 4.16).

Основні результати випробування зведені в таблиці 4.14.

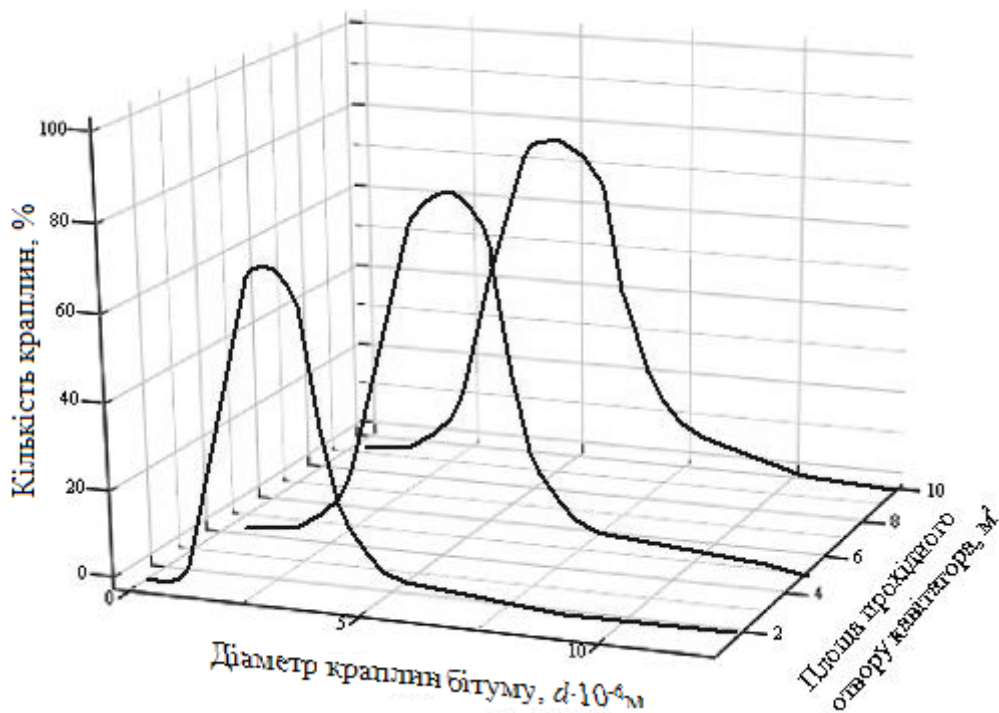


Рисунок 4.16 – Криві розподілу крапель бітуму за розмірами

Таблиця 4.14 – Випробування отриманої емульсії

№ з/п	Найменування показника	Згідно ДСТУ Б В.2.7-129:2006			Досліджува-на бітумна емульсія
		ЕБК-1	ЕБК-2	ЕБК-3	
1	Зовнішній вигляд	Однорідна темно-коричнева рідина			Однорідна темно-коричнева рідина
2	Показник концентрації водневих іонів, рН	1,5-6,5			2
3	Однорідність за залишком на ситі №014, % не більший	0,5	0,5	0,5	0,47
4	Умовна в'язкість, с, не більша: - при 20°С на апараті з діаметром отвору 3мм	65	65	65	56
5	Стійкість при зберіганні: залишок на ситі №014%, не більше: - після 7 діб - після 14 діб	0,6	0,6	0,6	0,5
		0,8	0,8	0,8	0,76
6	Зчеплення в'язучого, виділеного з емульсії з поверхнею мінерального матеріалу, %, не менший	90	90	90	95
7	Індекс розпаду, %	80–220	221–260	більше 260	274

#### 4.7 Експериментальне дослідження процесу попереднього змішування компонентів емульсії

Експериментальні дослідження процесу попереднього багатостадійного приготування механічної суміші складових компонентів бітумної емульсії проводилися на експериментальній установці розміщеної на базі ДП НВЦ Композит м. Київ (рис. 4.17).

Експериментальна установка складається (рис. 4.18) із збірною трубопроводу 1, напірних гідроліній 2, 3, вихідного патрубка 4, бітумного насоса 5, що оснащений пристроєм регулювання подачі бітуму із бітумного котла. До напірної гідролінії 2 під'єднана байпасна лінія 6. По напірній гідролінії 3 за допомогою насосів 7, 8, 9, із ємностей для води, емульгатора та кислоти підводяться відповідні компоненти бітумної емульсії. Статичний змішувач представлений серією дискових міжфланцевих кранів 10 із ручним регулюванням ступеня перекриття потоку сировини (рис. 4.19 та рис. 4.20).

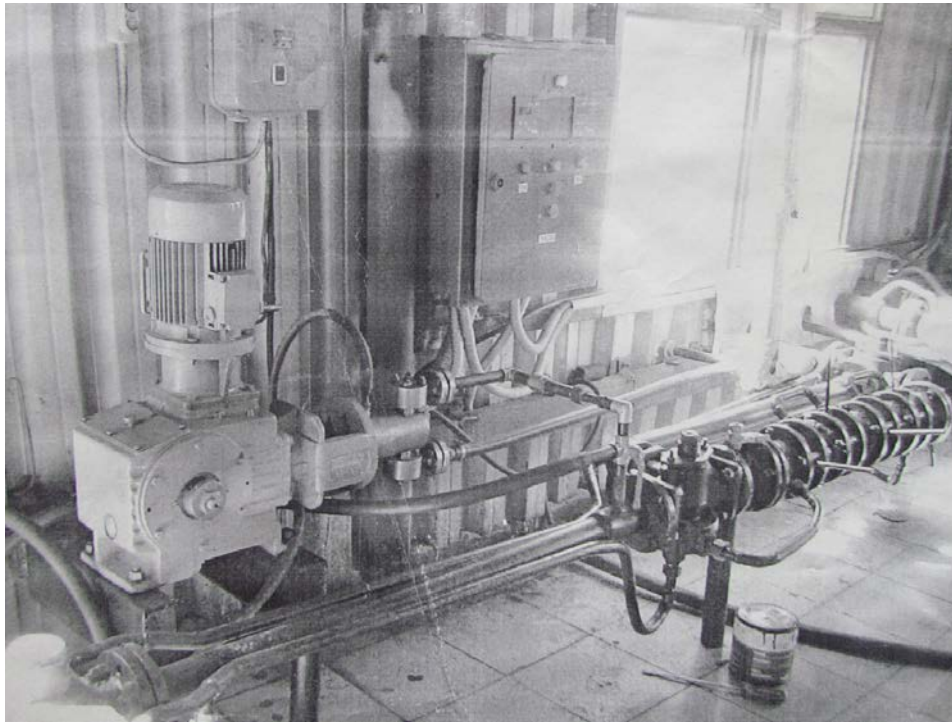


Рисунок 4.17 – Експериментальна установка для дослідження багатостадійного процесу приготування механічної суміші компонентів емульсії

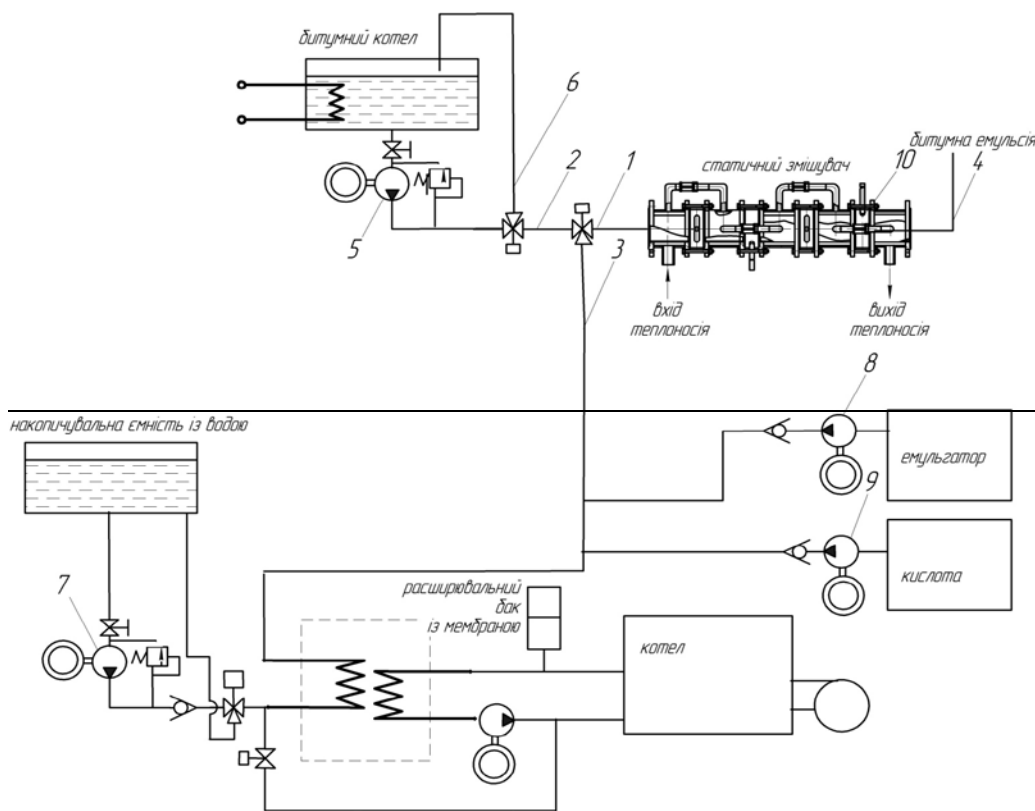


Рисунок 4.18 – Принципова схема експериментальної установки для дослідження багатостадійного процесу приготування механічної суміші компонентів емульсії

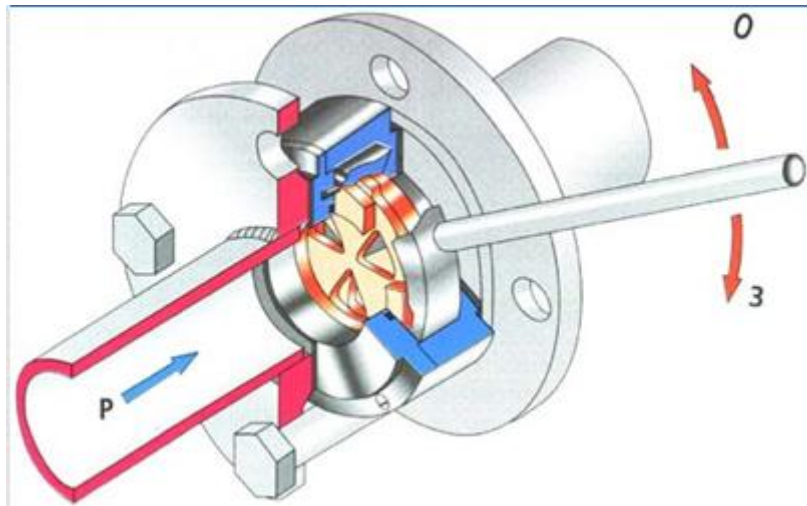


Рисунок 4.19 – Конструктивне виконання дискового міжфланцевого крану

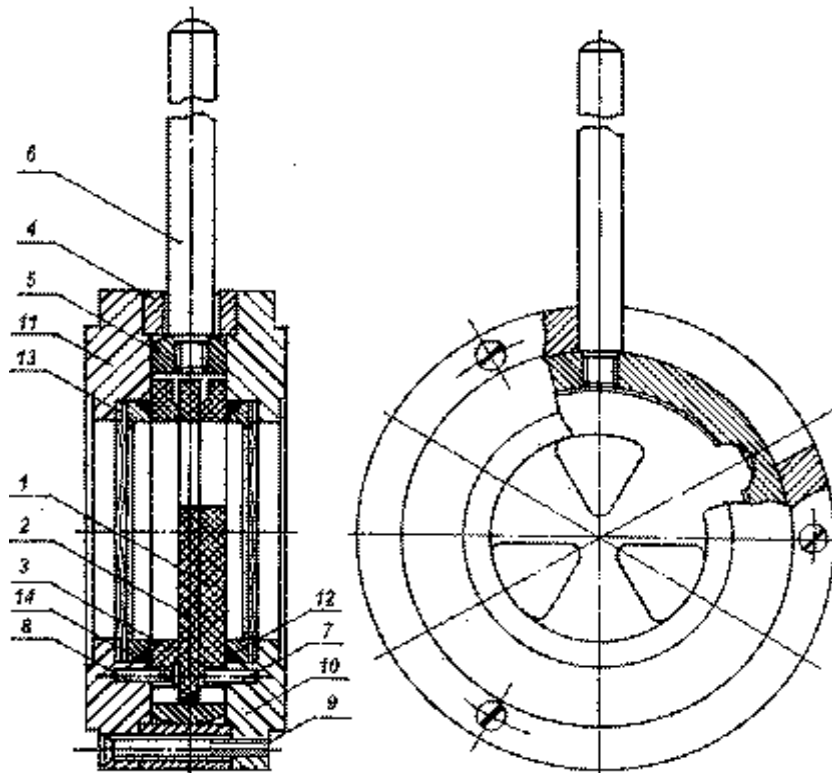


Рисунок 4.20 – Збірне креслення дискового міжфланцевого крану:  
 1 – диск нерухомий; 8 – штифт; 2 – диск рухомий; 9 - гвинт; 3 – кільце нерухоме;  
 10 – кришка-фланець; 4 – корпус; 11 – кришка-фланець; 5 – обойма;  
 12 – ущільнювальне кільце; 6 – ручка; 13 – пружина хвиляста; 7 – штифт;  
 14 – кільце нажимне.



При підключенні приводу гідронасосів 5, 7, 8, 9 компоненти із накопичувальних резервуарів подаються напірними гідролініями 2, 3 до збирного трубопроводу 1. Багатокомпонентний потік проходить через ряд послідовно встановлених дискових міжфланцевих кранів 10. В результаті такого багатократного проходження двокомпонентного потоку відбувається інтенсивне перемішування рідин різного виду, що приводить до отримання грубої механічної суміші із рівномірним розподіленням складових компонентів емульсії.

Для подачі бітуму у статичний змішувач використовувався насос бітумний СО-194, технічні характеристики якого наведені в таблиці 4.15.

Вода у статичний змішувач подавалася за допомогою насоса АЦНС 3-75 (табл. 4.16)

Таблиця 4.15 – Технічні характеристики бітумного насоса СО-194

Продуктивність	м <sup>3</sup> /год	6,0
Робочий тиск	МПа	15
Дальність подачі по вертикалі	м	не менша 50
Потужність	кВт	7,4
Тип насоса	шестеренчастий	
Напруга живлення - силової мережі; - мережі керування; - нагрівника		380 В, 50 Гц 220 В, 50 Гц 220 В, 50 Гц
Габаритні розміри	мм (довжина/ширина/висота)	940/450/470
Маса	кг	165

Таблиця 4.16 – Технічні характеристики бітумного насоса АЦНС 3-75

Продуктивність	м <sup>3</sup> /год	3,0
Напір	м	72
Допустимий кавітаційний запас	м	4
Частота обертання	об/хв.	3000
Потужність електродвигуна	кВт	3
Маса агрегату	кг	33,3

Емульгатор та кислота дозувалися за допомогою насосів НД10-100. Технічні характеристики насосів представлені в таблиці 4.17.

Таблиця 4.17 – Технічні характеристики бітумного насоса НД10-100

Продуктивність	л /год	10
Напір	кгс/см <sup>2</sup>	100
Частота обертання	об/хв.	1500
Потужність	кВт	0,25
Габаритні розміри	мм	445 / 190 / 445
Маса агрегату	кг	33,3

На підставі теоретичних досліджень (див. п.3.2) було виконано експериментальне дослідження, в результаті якого була оптимізована кількість дискових міжфланцевих кранів у статичному змішувачі. При проведенні досліджень варіювалася кількість кранів від 1 до 5. Ефективність перемішування оцінювалася за розподіленням у пробі суміші компонента, який дозується у суміш у найменшій кількості – кислоти. Ступінь перемішування ми оцінювали за рН проби, яке визначали за допомогою рН-метра НІ 83140, технічні характеристики якого наведені в табл. 4.18. Згідно з рекомендаціями [19, 68] для приготування катіонної бітумної емульсії рН суміші компонентів повинна бути 2,5.

Таблиця 4.18 – Технічні характеристики рН-метра НІ 83140

Діапазон вимірювання концентрація іонів водню, рН температура, °С окиснювально-відновлюваний потенціал, мВ	0,00...14,0 0,0...+100 ±1999
Точність концентрація іонів водню, рН температура, °С окиснювально-відновлюваний потенціал, мВ	0,01 1 0,04
Похибка концентрація іонів водню, рН температура, °С окиснювально-відновлюваний потенціал, мВ	±0,01 ±1 ±0,4
Габаритні розміри, мм	185×82×45
Маса, кг	0,570
Умови роботи температура навколишнього середовища, °С вологість, %	0...70 95

Склад та співвідношення компонентів наведено в п.4.2.

Результати проведених досліджень представлені у вигляді графічної залежності між кількістю встановлених дискових міжфланцевих кранів  $n$  та усередненим значенням експериментальних даних вимірювання рН у пробах суміші (рис. 4.21).

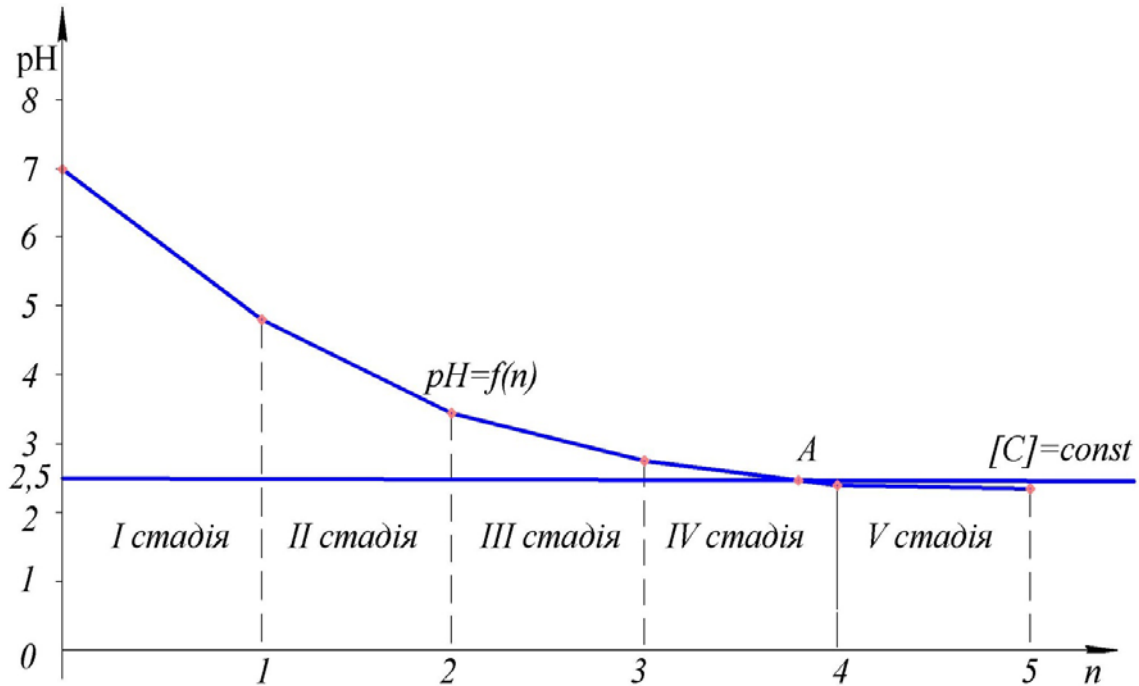


Рисунок 4.21 – Графічне визначення числа стадій перемішування

Згідно з [50] було проведено 6 повторних вимірювань на кожному досліді. На першій стадії спостерігається різке падіння рН до 5,75, далі зниження рН відбувається більш поступово, після четвертої стадії (при встановленні чотирьох дискових міжфланцевих кранів) ми досягли заданої концентрації водневих іонів (т. А), що свідчить про рівномірне розподілення складових компонентів у потоці сировини, крива  $pH = f(n)$  стає помітно паралельною до осі абсцис. Це пояснює недоцільність встановлення більш ніж чотирьох дискових кранів.

Як показали експериментальні дослідження, для досягнення рівномірного розподілення складових компонентів емульсії у суміші сировини достатньо чотирьох послідовно встановлених дискових міжфланцевих кранів.

#### **4.8 Математична модель оцінки технологічного процесу приготування бітумних емульсій при використанні кавітаційної технології емульгування дорожнього бітуму**

Технологічний процес приготування бітумних емульсій – полягає у подрібненні (диспергуванні) бітуму на окремі частинки та рівномірному розподіленні й стабілізації їх у водному розчині емульгатора.

Найважливішим критерієм досконалості технологічного процесу приготування бітумних емульсій є якість отриманої бітумної емульсії, а тому для її прогнозування, в залежності від спектра факторів впливу, необхідно встановити певні закономірності проектування технологічного обладнання та обґрунтування технологічних регламентів.

Традиційним методом моделювання багатофакторного технологічного процесу є планування експерименту. Планування експерименту передбачає наявність експериментальної установки та побудову регресійних залежностей на основі дійсних вхідних та вихідних факторів, отриманих експериментально. На стадії розробки експериментальної установки одним із особливо важливих джерел інформації для встановлення аналітичних взаємозалежностей між вхідними та вихідними змінними, які суттєво впливають на якість вихідної продукції, можуть бути експертні оцінки [31].

Технологічний процес приготування бітумних емульсій і установок, за допомогою яких він реалізується, представляють собою досить складні системи, в яких якість вихідної продукції – готової емульсії залежить від багатьох різноманітних за природою факторів. Ці фактори визначаються, зокрема, властивостями використовуваної сировини, хімічними та гідродинамічними параметрами і характеристиками технологічного процесу, особливостями конструктивного виконання установок тощо. Класифікація факторів, що впливають на якість бітумної емульсії в технологічному процесі її приготування, показана на рис. 4.22.

До основних сировинних факторів відносяться: якість емульгатора, жорсткість води, водневий показник водного розчину емульгатора.

Якість емульгатора визначається числом гідрофільно-ліпофільного балансу (ГЛБ). Як відомо з [23, 84] для стійкої емульсії типу В/М ГЛБ – 3–6, для М/В – 8–13. ГЛБ емульгатора має відповідати типу емульсії, яку необхідно приготувати.

Жорсткість води, характеризується присутністю в ній гідрокарбонатів, хлоридів і сульфатів кальцію та магнію, які впливають на хімічні процеси, що відбуваються на стадії приготування емульсії. Вода, яка використовується для приготування бітумних емульсій має бути пом'якшена, тобто жорсткість води повинна бути не більшою 6 мг екв/л [19, 68].

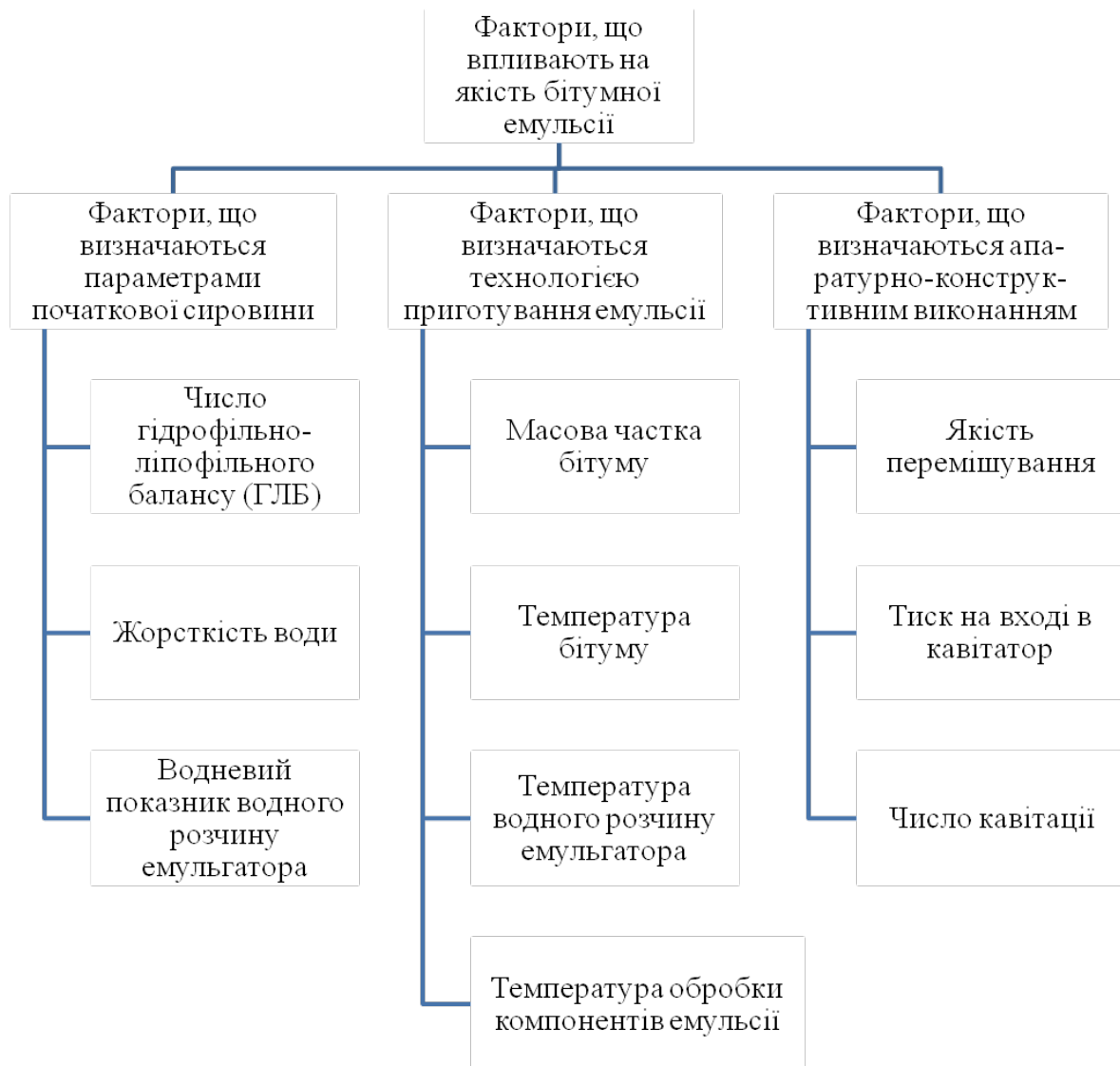


Рисунок 4.22 – Класифікація факторів, що впливають на якість бітумної емульсії

Водневий показник водного розчину емульгатора, який характеризує нестачу або надлишок кислоти (лугу) в емульсії, що істотно впливає на стабілізацію готової емульсії на виході з вузла емульгування. Водні розчини аніонних емульгаторів мають бути лужними, тобто мати водневий показник  $pH$  в межах 9–12. Готовий розчин катіонного

емульгатора також повинен мати водневий показник рН в межах 1,8–2,2 [68].

Серед основних технологічних факторів: масова частка бітуму, температури бітуму і водного розчину емульгатора, температура обробки компонентів.

Масова частка бітуму, яка визначається згідно з рецептурою бітумної емульсії, має суттєвий вплив на в'язкість, а також і на дисперсність готової емульсії. Для отримання прямої бітумної емульсії частка бітуму має бути в межах 30–70% [19].

Температура, до якої необхідно нагрівати бітум перед диспергуванням, залежить від температури розм'якшення бітуму, оскільки при якісному перемішуванні в'язкість бітуму повинна наближатися до в'язкості водного розчину емульгатора. Так температура бітуму марки БНД 90/130, що надходить у вузол диспергування має бути 120–130 °С [68].

Температура водного розчину емульгатора, має бути такою, щоб сума температур бітуму і водного розчину емульгатора не перевищували 200 °С, тому що інакше відбуватиметься спінювання та викид складових компонентів ще до вузла емульгування [19, 68].

Температура обробки компонентів емульсії – досить вагомий фактор, оскільки, для інтенсивної кавітаційної обробки на виході з кавітатора у розчині має досягатися тиск насиченої пари, який суттєво залежить від величини температури суміші.

До апаратних факторів відносяться: якість перемішування, тиск у суміші компонентів на вході в кавітаційний диспергатор, число кавітації.

Якість перемішування компонентів визначається інтенсивністю перемішування компонентів емульсії за допомогою статичного змішувача, що встановлюється перед кавітаційним диспергатором.

Тиск суміші на вході в кавітатор забезпечують дозувальні бітумний та водяний насоси. Від його величини залежить перепад тиску у кавітаційному диспергаторі, що впливає на інтенсивність кавітаційної обробки.

Число кавітації – один з найважливіших факторів, що характеризує режим кавітації у диспергаторі. Згідно з відомими та проведеними нами експериментальними дослідженнями [38, 70, 74], встановлено, що найбільш раціональним режимом для якісного диспергування бітуму є суперкавітаційний режим.

Для покращення прогнозування технологічного процесу приготування бітумної емульсії в систему, за необхідністю, можливо вводити і нові змінні, які суттєво впливають на цей процес.

Оскільки технологічний процес приготування бітумних емульсій є складним технологічним процесом, то взаємозв'язок факторів, що впливають на якість емульсії, розглянемо ієрархічно. Структура моделі дерева логічного висновку відповідає співвідношенням [76]:

$$Q = f_Q(X, Y, Z); \quad (4.14)$$

$$X = f_X(x_1, x_2, x_3); \quad (4.15)$$

$$Y = f_Y(y_1, y_2, y_3, y_4); \quad (4.16)$$

$$Z = f_Z(z_1, z_2, z_3). \quad (4.17)$$

Ієрархічна сукупність співвідношень відповідає дереву висновку, представленому на рис. 4.23. У вузлах дерева позначені номери формул, що відповідають різним рівням опису.

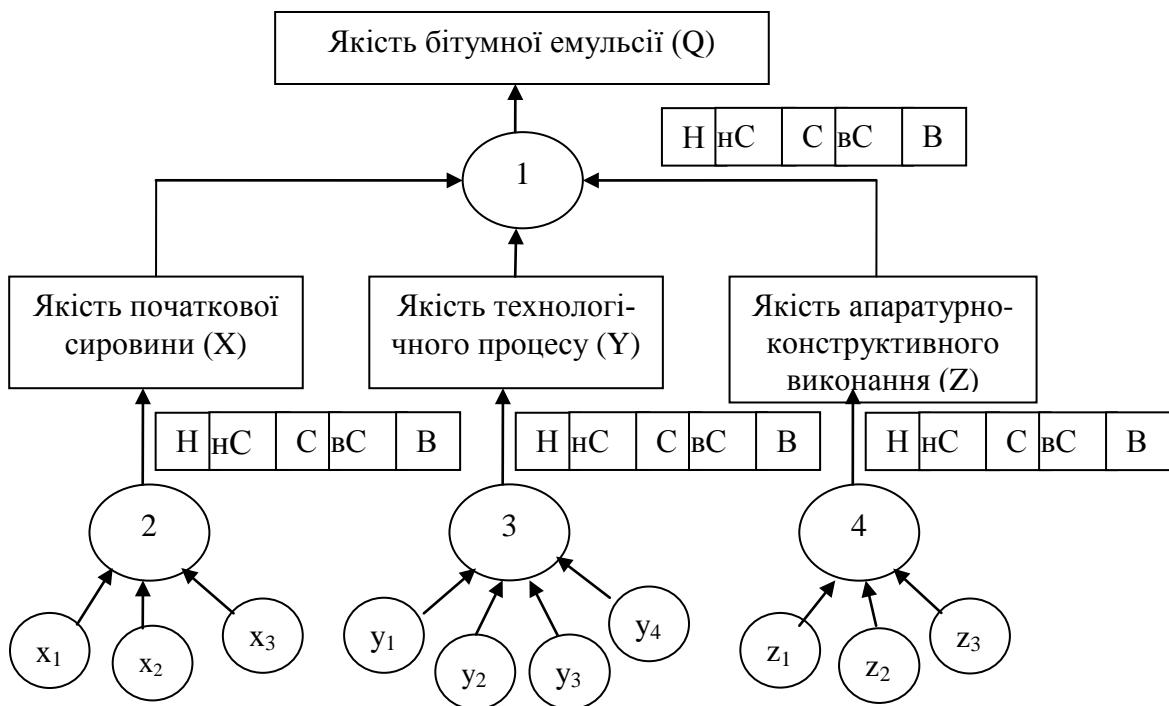


Рисунок 4.23 – Дерево логічного висновку

Термінальні вершини дерева висновку являють собою лінгвістичні змінні, для яких універсальні множини й оціночні терми представлені в табл. 4.19.

Укрупнені параметри стану лінгвістичних змінних наведені в табл. 4.20.

Для оцінки лінгвістичних змінних використовували знання технологічних вимог приготування бітумних емульсій, дані експериментальних досліджень та експертні оцінки. База знань про співвідношення (4.14) – (4.17) наведена в таблиці 4.21.

Таблиця 4.19 – Фактори впливу як лінгвістичні змінні

Позначення та назва змінної	Універсальна множина	Лінгвістичні змінні
$x_1$ – число гідрофільно-ліпофільного балансу	[1, 40]	низьке (н), достатнє (д), високе (в)
$x_2$ – жорсткість води	[1,5,10] мг.екв/л	м'яка (м), середня (с), жорстка (ж)
$x_3$ – водневий показник	[0,14] рН	кисле (к), нейтральне (н), лужне (л)
$y_1$ – масова частка бітуму	[30, 80] %	низька (н), достатня (д), висока (в)
$y_2$ – температура бітуму	[90, 140] °С	низька (н), середня (с), висока (в)
$y_3$ – температура водного розчину емульгатора	[60, 90] °С	низька (н), середня (с), висока (в)
$y_4$ – температура обробки компонентів емульсії	[60, 90] °С	низька (н), середня (с), висока (в)
$z_1$ – якість перемішування	[0, 3] у.о.	без перемішування (бпр), мінімальне (мін), нормальне (норм), інтенсивне (інт)
$z_2$ – тиск на вході в кавітатор	[0,5 , 1,5] МПа	низький (н), достатній (д), високий (в)
$z_3$ – число кавітації	[0, 2]	докавітаційний (д), кавітаційний (к), плівкова кавітація (пл), суперкавітаційний (ск)

Таблиця 4.20 – Формалізація укрупнених параметрів стану лінгвістичними змінними

Укрупнений параметр стану	Терми для лінгвістичної оцінки
Q – якість бітумної емульсії	низька (Н), нижче середнього (нС), середня (С), вище середнього (вС), висока (В)
X – якість сировини для приготування бітумних емульсій	низька (Н), нижче середнього (нС), середня (С), вище середнього (вС), висока (В)
Y – якість технологічного процесу	низька (Н), нижче середнього (нС), середня (С), вище середнього (вС), висока (В)
Z – якість апаратурно-конструктивного виконання	низька (Н), нижче середнього (нС), середня (С), вище середнього (вС), висока (В)



Таблиця 4.21 – База знань про співвідношення (4.14)–(4.17)

<b>X</b>	<b>Y</b>	<b>Z</b>	<b>Q</b>
B	B	H	H
B	BC	H	
B	C	H	
B	HC	H	
H	H	H	
H	H	B	
H	BC	H	
H	B	H	
HC	H	C	
HC	B	H	
C	HC	H	
C	B	H	
BC	HC	H	
H	H	HC	
H	HC	H	
H	BC	HC	
H	B	HC	
HC	HC	H	
C	H	H	
C	C	H	
BC	H	H	
BC	HC	HC	
BC	B	H	
H	H	C	
H	C	H	
H	BC	C	
HC	H	H	
HC	BC	HC	
C	H	HC	
C	C	HC	
BC	H	H	
BC	BC	H	
B	H	BC	
B	H	H	
B	H	HC	
B	BC	BC	
B	H	HC	
B	BC	H	
B	H	C	
B	BC	H	
B	BC	H	
B	H	HC	

Продовження табл. 4.21

<b>X</b>	<b>Y</b>	<b>Z</b>	<b>Q</b>
Н	НС	С	НС
Н	В	ВС	
НС	НС	ВС	
С	Н	ВС	
С	В	НС	
ВС	ВС	НС	
Н	НС	ВС	
Н	В	В	
НС	С	НС	
С	Н	В	
ВС	Н	ВС	
ВС	В	НС	
Н	НС	В	
НС	Н	ВС	
НС	ВС	НС	
С	НС	НС	
ВС	Н	В	
В	Н	С	
Н	С	С	
НС	Н	В	
НС	В	НС	
С	НС	С	
ВС	НС	С	
В	Н	ВС	
Н	С	ВС	
НС	НС	НС	
НС	В	С	
С	С	С	
ВС	НС	ВС	
В	НС	НС	
Н	ВС	В	
НС	НС	С	
НС	В	ВС	
С	ВС	НС	
ВС	С	НС	
Н	С	В	С
С	НС	ВС	
ВС	В	С	
НС	НС	В	
С	НС	В	
В	Н	В	
НС	С	С	
С	С	ВС	
В	НС	С	
НС	С	ВС	
С	ВС	С	
В	НС	ВС	

Продовження табл. 4.21

X	Y	Z	Q
нС	С	В	
С	В	С	
В	С	нС	
нС	вС	С	
вС	нС	В	
В	С	С	
нС	вС	В	
вС	С	С	
В	нС	вС	
нС	В	В	
вС	вС	С	
В	В	нС	
нС	вС	В	вС
вС	С	вС	
В	С	вС	
С	С	В	
вС	С	В	
В	вС	С	
С	вС	вС	
вС	вС	вС	
В	В	С	
С	вС	В	
вС	вС	В	
С	В	вС	
вС	В	вС	
С	В	В	
В	нС	В	
В	В	В	В
В	В	вС	
вС	В	В	
В	С	В	
В	вС	В	

Математичною моделлю технологічного процесу приготування бітумної емульсії є система нечітких логічних рівнянь:

$$\begin{aligned} \mu^H(Q) = & [\mu^B(X) \cdot \mu^B(Y) \cdot \mu^H(Z)] \vee [\mu^B(X) \cdot \mu^{вС}(Y) \cdot \mu^H(Z)] \vee \\ & \vee [\mu^B(X) \cdot \mu^C(Y) \cdot \mu^H(Z)] \vee [\mu^B(X) \cdot \mu^{нС}(Y) \cdot \mu^H(Z)] \vee \\ & \vee [\mu^H(X) \cdot \mu^H(Y) \cdot \mu^H(Z)] \vee [\mu^H(X) \cdot \mu^H(Y) \cdot \mu^B(Z)] \vee \\ & \vee [\mu^H(X) \cdot \mu^{вС}(Y) \cdot \mu^H(Z)] \vee [\mu^H(X) \cdot \mu^B(Y) \cdot \mu^H(Z)] \vee \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
& \vee [\mu^{HC}(X) \cdot \mu^H(Y) \cdot \mu^C(Z)] \vee [\mu^{HC}(X) \cdot \mu^B(Y) \cdot \mu^H(Z)] \vee \\
& \vee [\mu^C(X) \cdot \mu^{HC}(Y) \cdot \mu^H(Z)] \vee [\mu^C(X) \cdot \mu^B(Y) \cdot \mu^H(Z)] \vee \\
& \vee [\mu^{BC}(X) \cdot \mu^{HC}(Y) \cdot \mu^H(Z)] \vee [\mu^H(X) \cdot \mu^H(Y) \cdot \mu^{HC}(Z)] \vee \\
& \vee [\mu^H(X) \cdot \mu^{HC}(Y) \cdot \mu^H(Z)] \vee [\mu^H(X) \cdot \mu^{BC}(Y) \cdot \mu^{HC}(Z)] \vee \\
& \vee [\mu^H(X) \cdot \mu^B(Y) \cdot \mu^{HC}(Z)] \vee [\mu^{HC}(X) \cdot \mu^{HC}(Y) \cdot \mu^H(Z)] \vee \\
& \vee [\mu^C(X) \cdot \mu^H(Y) \cdot \mu^H(Z)] \vee [\mu^C(X) \cdot \mu^C(Y) \cdot \mu^H(Z)] \vee \\
& \vee [\mu^{BC}(X) \cdot \mu^H(Y) \cdot \mu^H(Z)] \vee [\mu^{BC}(X) \cdot \mu^{HC}(Y) \cdot \mu^{HC}(Z)] \vee \\
& \vee [\mu^{BC}(X) \cdot \mu^B(Y) \cdot \mu^H(Z)] \vee [\mu^H(X) \cdot \mu^H(Y) \cdot \mu^C(Z)] \vee \\
& \vee [\mu^H(X) \cdot \mu^C(Y) \cdot \mu^H(Z)] \vee [\mu^H(X) \cdot \mu^{BC}(Y) \cdot \mu^C(Z)] \vee \\
& \vee [\mu^{HC}(X) \cdot \mu^H(Y) \cdot \mu^H(Z)] \vee [\mu^{HC}(X) \cdot \mu^C(Y) \cdot \mu^H(Z)] \vee \\
& \vee [\mu^C(X) \cdot \mu^H(Y) \cdot \mu^{HC}(Z)] \vee [\mu^C(X) \cdot \mu^C(Y) \cdot \mu^{HC}(Z)] \vee \\
& \vee [\mu^{BC}(X) \cdot \mu^H(Y) \cdot \mu^{HC}(Z)] \vee [\mu^{BC}(X) \cdot \mu^C(Y) \cdot \mu^H(Z)] \vee \\
& \vee [\mu^B(X) \cdot \mu^H(Y) \cdot \mu^H(Z)] \vee [\mu^H(X) \cdot \mu^H(Y) \cdot \mu^{BC}(Z)] \vee \\
& \vee [\mu^H(X) \cdot \mu^C(Y) \cdot \mu^{HC}(Z)] \vee [\mu^H(X) \cdot \mu^{BC}(Y) \cdot \mu^{BC}(Z)] \vee \\
& \vee [\mu^{HC}(X) \cdot \mu^H(Y) \cdot \mu^{HC}(Z)] \vee [\mu^{HC}(X) \cdot \mu^{BC}(Y) \cdot \mu^H(Z)] \vee \\
& \vee [\mu^C(X) \cdot \mu^H(Y) \cdot \mu^C(Z)] \vee [\mu^C(X) \cdot \mu^{BC}(Y) \cdot \mu^H(Z)] \vee \\
& \vee [\mu^{BC}(X) \cdot \mu^H(Y) \cdot \mu^C(Z)] \vee [\mu^{BC}(X) \cdot \mu^{BC}(Y) \cdot \mu^H(Z)] \vee \\
& \vee [\mu^B(X) \cdot \mu^H(Y) \cdot \mu^{HC}(Z)].
\end{aligned}$$

Математичну оцінку процесу проводили з використанням програмного забезпечення Matlab 7.7.0.471 (R2008b) надбудова Fuzzy logic [27, 47, 60], результатом якої є графічні поверхні вихідних змінних від укрупнених параметрів стану (рис. 4.24–4.26).

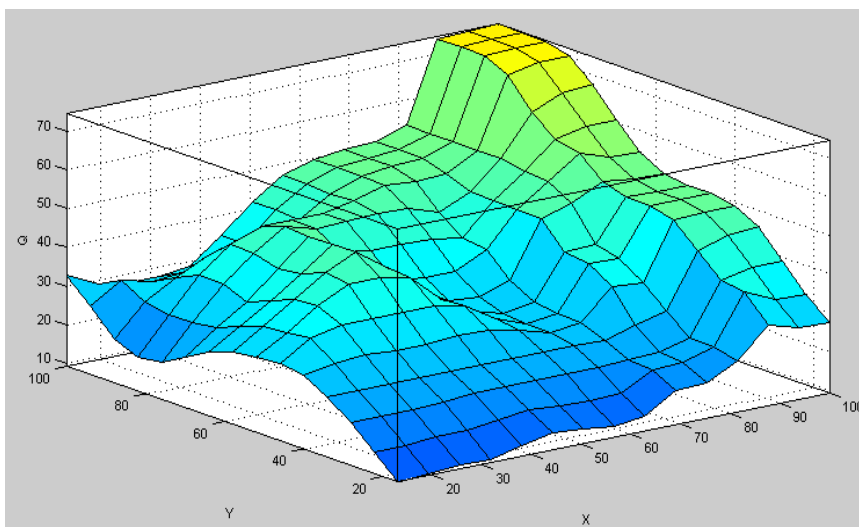


Рисунок 4.24 – Залежність якості бітумної емульсії від якості вхідної сировини та якості технологічного процесу

Для тонкого налаштування моделі в подальшому необхідно використовувати апарат генетичних алгоритмів, який забезпечує результат в залежності від вибірки.

Прогнозування процесу приготування бітумних емульсій є необхідним елементом його організації. З формальної точки зору ця задача відноситься до широкого класу задач прогнозування дискретних послідовностей (сукупності значень при фіксованих показниках), які можливі у сировині та при налаштуванні параметрів її обробки.

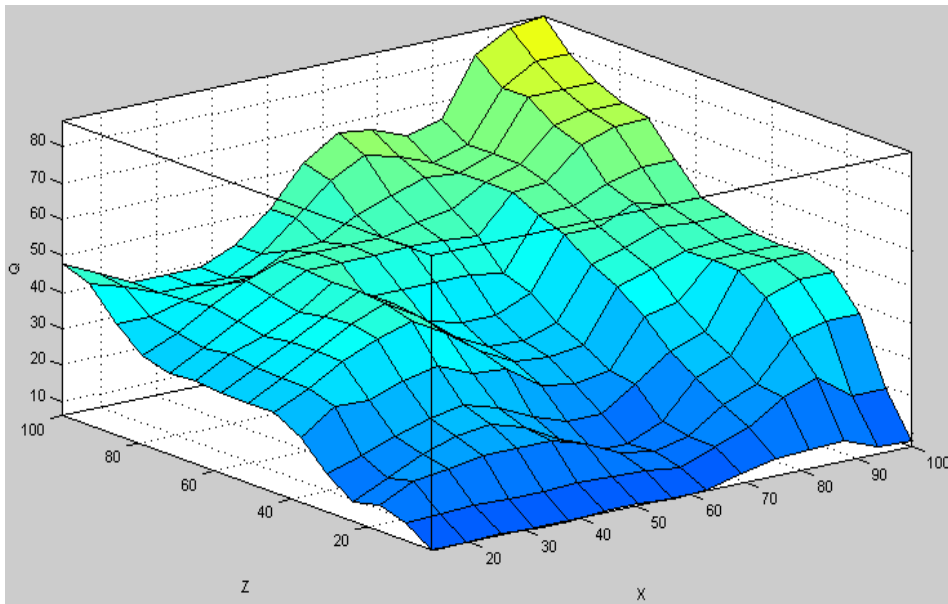


Рисунок 4.25 – Залежність якості бітумної емульсії від якості технологічного процесу та апаратурно-конструктивного виконання обладнання

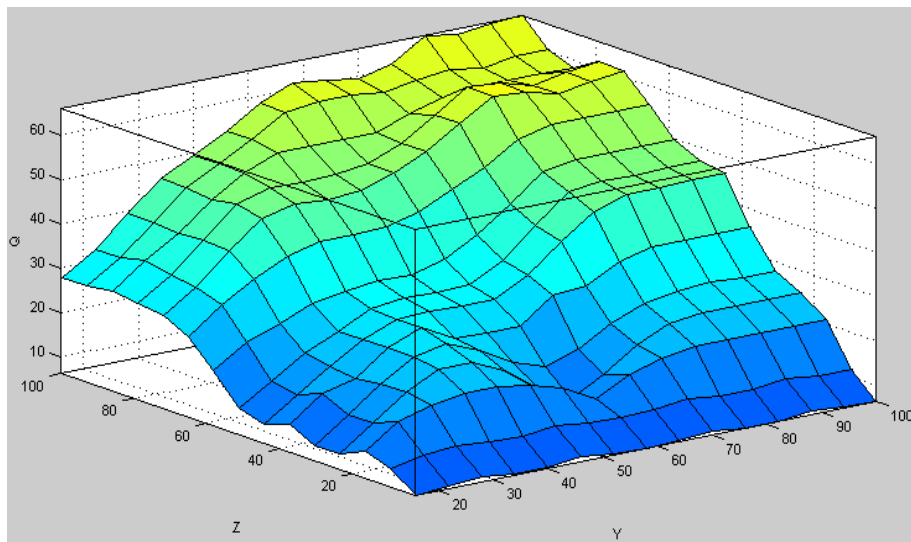


Рисунок 4.26 – Залежність якості бітумної емульсії від якості сировини та апаратурно-конструктивного виконання обладнання

## **5 ПРАКТИЧНА РЕАЛІЗАЦІЯ РЕЗУЛЬТАТІВ ДОСЛІДЖЕННЯ. ТЕХНІКО-ЕКОНОМІЧНА ЕФЕКТИВНІСТЬ ВПРОВАДЖЕННЯ КАВІТАЦІЙНОЇ ТЕХНОЛОГІЇ ПРИГОТУВАННЯ БІТУМНИХ ДОРОЖНІХ ЕМУЛЬСІЙ У ВИРОБНИЦТВО**

### **5.1 Методика інженерного розрахунку раціональних конструктивних та технологічних параметрів устаткування для приготування бітумних емульсій**

Результати виконаних теоретичних і експериментальних досліджень покладені в основу інженерної методики розрахунку параметрів вибраного об'єкта дослідження – устаткування для приготування бітумних емульсій запропонованої конструкції. У зв'язку із особливостями та специфікою застосування запропонованого кавітаційного устаткування для приготування бітумних емульсій в основу методики покладено розрахунок всіх складових технологічного процесу і відповідного обладнання для його реалізації: теплові, а також гідравлічні розрахунки із врахуванням конструктивного виконання устаткування.

#### **5.1.1 Тепловий розрахунок кавітаційного устаткування для приготування бітумних дорожніх емульсій**

##### **5.1.1.1 Тепловий розрахунок ємностей для розігріву бітуму**

Необхідну кількість теплоти для розігріву бітуму визначаємо за формулою

$$Q = (q_1 + q_2 + q_3 + q_4) \cdot G \cdot 10^{-3}, \quad (5.1)$$

де  $q_1$  – витрата теплоти на нагрів і плавлення бітуму в бітумоплавильному агрегаті, МДж/т;  $q_2$  – витрата теплоти на випаровування вологи, яка міститься в 1 т бітуму в бітумоплавильному агрегаті, МДж/т;  $q_3$  – тепловтрати, МДж/т;  $q_4$  – втрати теплоти на обігрів бітумного насоса, МДж/т;  $G$  – об'єм ємності, що вміщує необхідну кількість бітуму, м<sup>3</sup>.

Витрату теплоти на нагрів і плавлення бітуму в бітумоплавильному агрегаті розраховуємо за формулою, МДж/т

$$q_1 = q_1' + q_1'' \quad (5.2)$$

де  $q_1'$  – витрата теплоти на нагрів 1 т бітуму в бітумоплавильному агрегаті, МДж/т;  $q_1''$  – витрата теплоти на плавлення тони бітуму.

$$q_1' = C_o(t_k - t_n). \quad (5.3)$$

де  $C_b$  – теплоємність бітуму,  $\text{МДж}/(\text{т}\cdot\text{К})$ ;  $t_k$  – робоча температура бітуму, що встановлюється в залежності від марки бітуму;  $t_n$  – початкова температура бітуму.

Витрата теплоти на випаровування вологи (МДж/т), яка міститься в 1 т бітуму в бітумоплавильному агрегаті

$$q_2 = \frac{\omega}{100}(r + 1,97 \cdot t_{\text{с.п.}}), \quad (5.4)$$

де  $\omega$  – вологість бітуму,  $\omega = 5\%$ ;  $r$  – прихована теплота пароутворення при  $t_{\text{с.п.}}$ ,  $\text{кДж}/\text{кг}$ ;  $t_{\text{с.п.}}$  – середня температура водяної пари,  $^{\circ}\text{C}$ .

В залежності від температури навколишнього середовища тепловтрати можуть бути прийняті 10...20 % від теплоти, яка витрачається корисно, тобто

$$q_3 = (0,1 \dots 0,2)(q_1 + q_2), \quad (5.5)$$

або розрахована з залежності

$$q_3 = q'_3 + q''_3, \quad (5.6)$$

де  $q'_3$  – втрата теплоти через бокову поверхню стінок і дно ємності, МДж/т бітуму;  $q''_3$  – втрата теплоти від дзеркала бітуму до навколишнього повітря конвекцією і випромінюванням, МДж/т бітуму.

Втрата теплоти через бокову поверхню стінок і дно ємності розраховується за формулою

$$q'_3 = \frac{F \cdot K \cdot (t_2 - t_n)}{G \cdot 1000} \quad (5.7)$$

де  $t_2$  – температура грійної газової суміші,  $^{\circ}\text{C}$ ;  $K$  – коефіцієнт теплопередачі через стінки, ізоляцією ємності,  $\text{Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{К})$ ;  $F$  – сумарна площа поверхні ємності для приготування бітуму,  $\text{м}^2$ .

Втрата теплоти від дзеркала бітуму до навколишнього повітря конвекцією і випромінюванням, МДж/т бітуму:

$$q''_3 = \frac{F_{\text{дз}} (\alpha_k + \alpha_g) (t_{\text{дз}} - t_n) \cdot 2 \cdot 3600}{G \cdot 1000}, \quad (5.8)$$

де  $F_{\text{дз}}$  – площа дзеркала бітуму,  $\text{м}^2$ ;  $\alpha_k$  – коефіцієнт тепловіддачі конвекцією від горизонтальної поверхні дзеркала бітуму,  $\text{ккал}/(\text{м}^2 \cdot \text{год} \cdot ^{\circ}\text{C})$  або  $\text{Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{К})$ ;  $\alpha_g$  – коефіцієнт тепловіддачі від дзеркала бітуму випро-

мінюванням, ккал/(м<sup>2</sup>·год·°С) або Вт/(м<sup>2</sup>·К);  $t_{\text{дз}}$ ,  $t_n$  – відповідно температура на поверхні дзеркала бітуму і повітря над дзеркалом бітуму.

Коефіцієнт тепловіддачі конвекцією від горизонтальної поверхні дзеркала бітуму, орієнтовно приймається рівним 6,4 ккал/(м<sup>2</sup>·год·°С)  $\approx 7,4$  Вт/(м<sup>2</sup>·К) або визначається за формулою:

$$\alpha_k = 2,15(t_{\text{дз}} - t_n)^{0,25} . \quad (5.9)$$

Коефіцієнт тепловіддачі від дзеркала бітуму випромінюванням, ккал/(м<sup>2</sup>·год·°С)

$$\alpha_e = \frac{C}{t_{\text{дз}} - t_n} \left[ \left( \frac{t_{\text{дз}} + 273}{100} \right)^4 - \left( \frac{t_n + 273}{100} \right)^4 \right] , \quad (5.10)$$

де  $C$  – коефіцієнт випромінювання поверхні, ккал/(м<sup>2</sup>·год·°С).

Втрати теплоти на обігрів бітумного насоса

$$q_4 = \frac{\sum F \cdot K (t_2 - t_{3.n}) \cdot 2 \cdot 3600}{G \cdot 1000} , \quad (5.11)$$

де  $\sum F$  – сумарна поверхня бітумного насоса (при укрупнених розрахунках може умовно прийматись як сума шарових поверхонь), м<sup>2</sup>;  $t_2$  – температура теплоносія, °С;  $t_{3.n}$  – температура зовнішнього повітря, °С.

Теплова потужність теплогенератора розраховується за формулою, кВт:

$$N_Q^{TG} = \frac{Q}{\tau_{\text{роз}}} . \quad (5.12)$$

### 5.1.1.2 Розрахунок поверхні теплообміну для розігріву бітуму

Площа поверхні теплообміну для розігріву бітуму

$$F = \frac{N_Q^{TG}}{K \cdot \Delta t} , \quad (5.13)$$

де  $K$  – коефіцієнт теплопередачі від теплоносія до бітуму, Вт/(м<sup>2</sup>·К)

$$K = \frac{1}{\frac{1}{\alpha_1} + \frac{\delta_{cm}}{\lambda_{cm}} + \frac{1}{\alpha_2}} . \quad (5.14)$$



Задаємося діаметром трубопроводу  $d_b$  (внутрішній діаметр), що створює поверхню теплообміну, та уточнюємо необхідну довжину трубопроводу

$$L = \frac{F}{\pi \cdot d_b}. \quad (5.15)$$

Об'єм труб, які утворюють поверхню нагріву,

$$V_{mp} = \frac{\pi \cdot D^2}{4} \cdot L, \quad (5.16)$$

де  $D$  – зовнішній діаметр трубопроводу, що створює поверхню нагріву, мм.

Із врахуванням об'єму грійних труб, уточнюємо об'єм та висоту ємності для розігріву бітуму:

Об'єм ємності для бітуму,  $m^3$

$$V = V_{\sigma} + V_{mp}, \quad (5.17)$$

де  $V_{\sigma}$  – об'єм ємності, що вміщує розрахункову кількість бітуму,  $m^3$ .

Висота ємності, м

$$H = \frac{V}{B \cdot L}, \quad (5.18)$$

де  $B$  – ширина ємності із бітумом, м.

#### 5.1.1.2 Підбір котлоагрегату для нагріву води

Необхідна кількість теплової енергії для розігріву технологічної води, Дж

$$Q = c m (t_2 - t_1), \quad (5.19)$$

де  $c$  – теплоємність води, Дж/(кг °C);  $m$  – продуктивність нагріву, т/год.;  $t_1, t_2$  – відповідно, початкова та кінцева температура води, °C.

Теплова потужність котла, МВт

$$N = Q / T. \quad (5.20)$$

За отриманими характеристиками підбираємо котлоагрегат.

#### 5.1.2 Гідравлічний розрахунок кавітаційного устаткування для приготування бітумних емульсій

Для того аби підібрати насос для подачі бітуму у вузол емульгування необхідно розрахувати тиск, який він повинен забезпечити при подачі бітуму у кавітаційний диспергатор,

$$p_n = \Delta p + p_k, \quad (5.21)$$

де  $\Delta p$  – втрати тиску на ділянці від насоса до кавітаційного диспергатора, Па;  $p_k$  – необхідний тиск на вході в кавітаційний диспергатор, Па.

Оскільки втрати тиску на ділянці від насоса до кавітаційного диспергатора суттєві, то сумарну втрату тиску розраховуємо за формулою [3]

$$\Delta p = \Delta p_o + \Delta p_m = (\lambda \cdot l/d + \Sigma \zeta) \frac{\rho \cdot v^2}{2}, \quad (5.21)$$

де  $\Delta p_o$  – втрати тиску по довжині, які спричинені шорсткістю стінок та в'язкістю потоку сировини,  $\Delta p_o = \lambda \cdot l/d \frac{\rho \cdot v^2}{2}$ , Па;  $\Delta p_m$  – втрати тиску на місцевих опорах,  $\Delta p_m = \Sigma \zeta \frac{\rho \cdot v^2}{2}$ , Па;  $v$  – швидкість руху потоку сировини, м/с;  $\rho$  – густина суміші компонентів, кг/м<sup>3</sup>;  $l, d$  – відповідно довжина та діаметр розрахункової ділянки трубопроводу, м;  $\Sigma \zeta$  – сума коефіцієнтів місцевих опорів на ділянці трубопроводу;  $\lambda$  – коефіцієнт гідравлічного тертя.

Коефіцієнт гідравлічного тертя розраховуємо за універсальною формулою Альтшуля [3]

$$\lambda = 0,11 \left( \frac{k_e}{d} + \frac{68}{Re} \right)^{0,25}; \quad (5.22)$$

де  $k_e$  – абсолютна шорсткість труб, мм;  $Re$  – число Рейнольдса.

Число Рейнольдса розраховуємо за формулою [3]:

$$Re = \frac{v \cdot d}{g}; \quad (5.23)$$

де  $g$  – кінематична в'язкість рідини, м<sup>2</sup>/с.

На основі проведених експериментальних досліджень (див. формулу (4.11)), необхідний тиск на вході в кавітаційний диспергатор, який сприяє виготовленню емульсії заданої дисперсності, визначається за формулою, МПа

$$p = \frac{\sqrt{340 - 8d_q + 2,08S + 0,96n - 0,0096S^2 + 0,0008n^2}}{4} - 4,5, \quad (5.24)$$

де  $d_q$  – задана дисперсність бітумної емульсії, мкн;  $S$  – площа прохідного отвору кавітаційного диспергатора (задається із врахуванням положення робочого органу кавітатора, від 34,5 мм<sup>2</sup> до 113 мм<sup>2</sup>), мм<sup>2</sup>;  $n$  – частка бітуму в емульсії згідно з заданою рецептурою приготування, %.

Продуктивність насосів визначається згідно загальної продуктивності установки та відсоткового співвідношення складових компонентів бітумної емульсії.

## **5.2 Технологічна схема приготування бітумних емульсій за допомогою кавітаційного диспергатора**

Одним з результатів роботи є розробка технологічного процесу приготування бітумних емульсій за допомогою ефектів, що виникають внаслідок виникнення в потоці оброблюваної сировини кавітації, його схема показана на рис 5.1.

Технологічний процес складається з таких операцій:

### **1. Підготовка бітуму:**

– нагрів бітуму до технологічної температури ( $t = 90\text{--}140$  °С в залежності від марки бітуму).

### **2. Підготовка водного розчину:**

– пом'якшену воду нагрівають до температури 60–90 °С, враховуючи температуру бітуму (сума температур бітуму та водного розчину емульгатора не повинна перевищувати 200 °С);

– за допомогою дозувальних насосів дозують необхідну кількість соляної кислоти та емульгатора.

### **3. Приготування емульсії:**

– дозування попередньо підготовленого бітуму та водного розчину згідно з рецептурою;

– подача складових компонентів в кавітаційний диспергатор.

### **4. Отримання готової продукції:**

– на виході з кавітаційного диспергатора отримуємо готову бітумну емульсію.

### **5. Складування продукції:**

– отримана бітумна емульсія подається на склад готової продукції, де зберігається в герметичних ємностях.

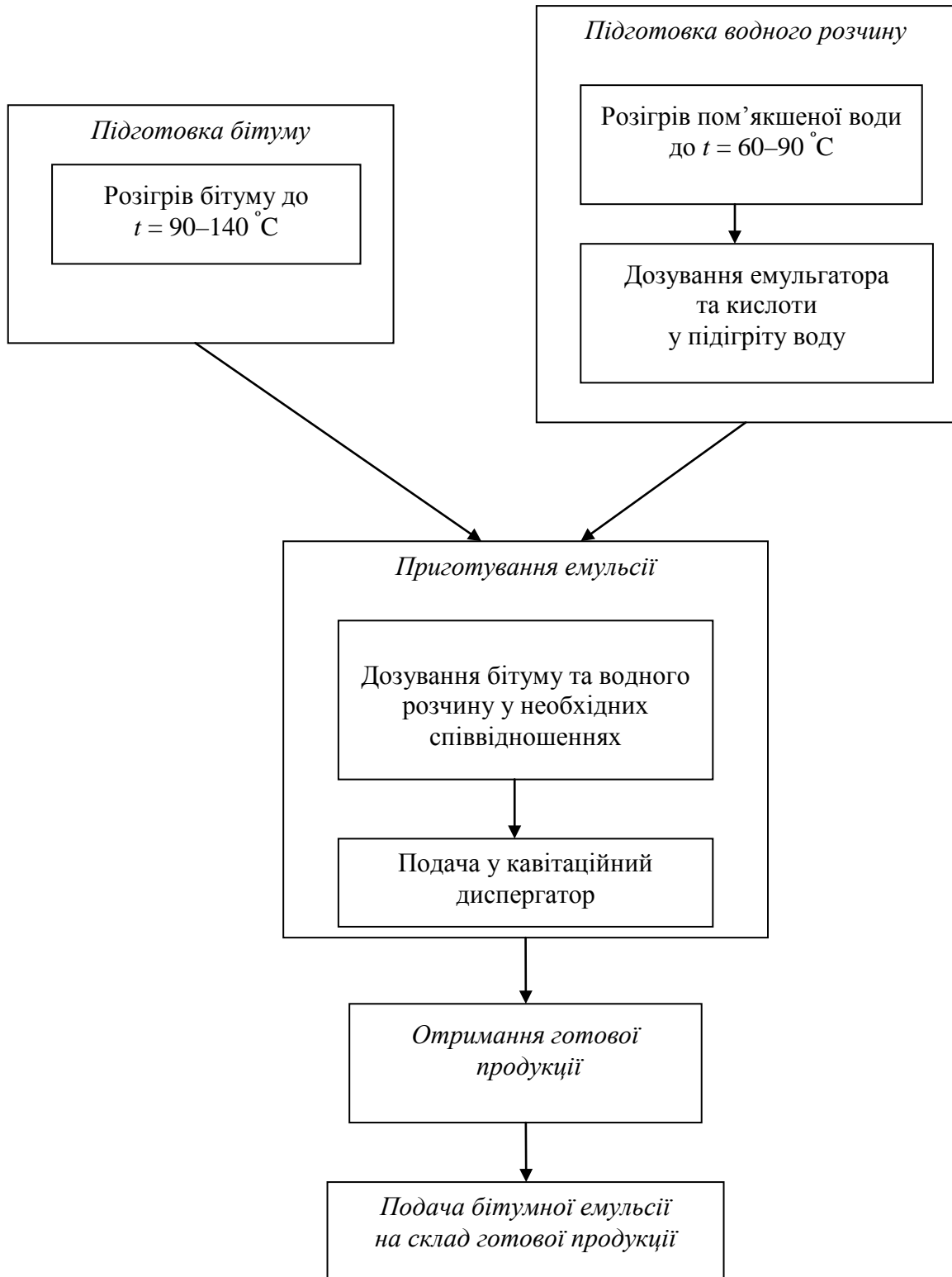


Рисунок 5.1 – Технологічна схема приготування бітумних емульсій

### 5.3 Промислове впровадження розробленої технології та устаткування для виготовлення емульсій

Кавітаційна технологія виготовлення бітумної емульсії була застосована на ряді будівельних організацій України. На рис. 5.1 зображений дослідно-виробничий комплекс з виготовлення бітумної емульсії, що впроваджений на одному із асфальтобетонних заводів у м. Львів. Технічні характеристики дослідно-виробничого комплексу наведені в таблиці 5.2.



а)



б)

Рисунок 5.2 – Дослідно-виробничий комплекс з виготовлення бітумної емульсії:  
а – дослідно-виробничий комплекс зовні; б – кавітаційна установка

Таблиця 5.1 – Технічні характеристики дослідно-виробничого комплексу

№ п/п	Найменування параметра	Розмірність	Значення
1.	Продуктивність	т/год.	10
2.	Витрата бітуму, не менша	м <sup>3</sup> /год.	6*
3.	Витрата води	м <sup>3</sup> /год.	0,6...3*
4.	Витрата стабілізатора	м <sup>3</sup> /год.	0...0,3*
5.	Витрата кислоти (лугу)	м <sup>3</sup> /год.	0,01...0,3*
6.	Витрата емульгатора	м <sup>3</sup> /год.	0,01...0,3*
7.	Тиск бітуму на вході у вузол емульгування (мах)	МПа	1,5
8.	Тиск водного розчину на вході у вузол емульгування	МПа	1,5

Продовження табл. 5.1

№ п/п	Найменування параметра	Розмірність	Значення
9.	Температура бітуму на вході у вузол емульгування	°С	90–140
10.	Температура водного розчину на вході у вузол емульгування	°С	60–90
11.	Встановлена потужність (не більша)	кВт	19
12.	Габаритні розміри (не більші):	мм	
	- довжина		1290
	- ширина		1420
	- висота		1370
13.	Маса (не більша)	кг	980

Примітка.\* В залежності від заданої рецептури

Дослідно-виробничий комплекс з виготовлення бітумної емульсії призначений як для безперервної, так і для циклічної роботи у технологічній лінії приготування бітумних емульсій.

Дослідно-виробничий комплекс приготування бітумних емульсій включає:

- кавітаційну установку;
- комплекс приготування водного розчину;
- ємності для зберігання складових компонентів емульсії;
- резервуар для накопичення бітумної емульсії.

Суть технологічного процесу приготування бітумної емульсії полягає в тому, що спочатку водопровідну (при необхідності пом'якшену) воду нагрівають до 60–90 °С і змішують з емульгуючими добавками, бітум нагрівають до температури 90–140 °С. Потім за допомогою насосів-дозаторів водний розчин емульгатора і бітум у встановленому співвідношенні безперервно подають в кавітаційний диспергатор, в якому відбувається диспергування бітуму і утворення бітумної емульсії. Далі бітумна емульсія поступає в накопичувальний резервуар.

Кавітаційна технологія виготовлення емульсій була також впроваджена згідно з договором про творчу співдружність між Вінницьким національним технічним університетом та приватним підприємством-фірмою «Кастор» (рис. 5.3).



а)



б)



в)

Рисунок 5.3 – Установка для виготовлення емульсій:  
а – загальний вигляд установки; б, в – система автоматизованого керування  
робочими процесами установки

Установка продуктивністю до 1 т/год. влаштована на зварній рамі, відрізняється мобільністю та зручністю в експлуатації. Встановлена потужність до 10 кВт. Габаритні розміри установки: 500×1800×750 мм.

#### **5.4 Техніко-економічне обґрунтування доцільності впровадження кавітаційної технології у виробництво**

Для порівняльного аналізу традиційної технології приготування бітумних емульсій із запропонованою кавітаційною наведемо в таблиці 5.2. основні технічні характеристики установок, що реалізують наведені технології.

Таблиця 5.2 – Технічні характеристики бітумно-емульсійних установок

№ п/п	Показники	Установа виробництва заводу «УКРБУДМАШ» УВБ-14	Установа «Планета -М» ЗАО «ИНЖЕНЕРНЫЙ ЦЕНТР ПЛАНЕТА»	Запропонована установка, що здійснює кавітаційну технологію емульгування бітуму
1.	Продуктивність, т/год.	8	5	7
2.	Встановлена потужність, кВт	38	40	19
3.	Маса (не більше), кг	1990	-	980
4.	Вартість, тис. грн.	1279	494	400
5.	Енерговитрати на одиницю продукції, кВт/т	4,75	8	2,71

Згідно з даним , що представлені в таблиці 5.2 установка, що здійснює запропоновану технологію приготування бітумних емульсій порівняно із наведеними аналогами є менш металомісткою, енергоощадною та має значно нижчу вартість.

### 5.5 Розрахунок собівартості бітумної емульсії, виготовленої на установці, що реалізує кавітаційну технологію емульгування бітуму

Собівартість виготовлення бітумної емульсії передбачає врахування таких витрат: витрати на матеріали, витрати на силову електроенергію, витрати на основну заробітну плату робітників, нарахування на заробітну плату та загальновиробничі статті витрат [44].

Витрати на матеріали розраховуємо за формулою, грн

$$M = \sum_1^n H_i \cdot C_i \cdot K_i, \quad (5.1)$$

де  $n$  – кількість видів матеріалів;  $H_i$  – витрати матеріалу  $i$ -го найменування, кг;  $C_i$  – вартість матеріалу  $i$ -го найменування, грн./кг;  $K_i$  – коефіцієнт транспортних витрат,  $K_i = 1,1 \dots 1,15$  [49].



Для виготовлення 1 т бітумної емульсії класу ЕБК-1 складові компоненти бралися у співвідношенні: бітум БНД 90/130 ВАТ «Лукойл-Одеський НПЗ» – 65 %, вода пом'якшена – 35 %, емульгатор катіонний REDICOTE RM007 виробник Шведська фірма Akzo Nobel – 0,25%, соляна кислота HCl – 1,5 %.

Отже, витрати на матеріали складають:

$$M = 650 \cdot 3,25 \cdot 1,1 + 332,5 \cdot 2,67 + 2,5 \cdot 37,31 \cdot 1,1 + 15 \cdot 8,22 \cdot 1,1 = 3449,76 \text{ (грн.)}$$

Витрати на силову електроенергію  $B_c$  розраховуються за формулою, грн:

$$B_c = B \cdot P \cdot \Phi \cdot K_{II}, \quad (5.2)$$

де  $B$  – вартість 1 кВт-години електроенергії з урахуванням ПДВ, яка з 1 січня 2013 року складає  $B = 0,9013$  грн/кВт;  $P$  – встановлена потужність обладнання, кВт;  $\Phi$  – фактична кількість годин роботи обладнання, яке задіяне на виготовлення одиниці продукції, год.;  $K_{II}$  – коефіцієнт використання потужності,  $K_{II} \leq 1$ .

Отже, витрати на силову електроенергію при виготовленні 1 т бітумної емульсії:

$$B_c = 0,9013 \cdot 0,1 \cdot 0,98(10 + 60) = 6,19 \text{ (грн.)}$$

Витрати на основну заробітну плату робітників  $Z_p$  розраховуються за формулою, грн:

$$Z_p = \sum_1^n t_i \cdot C_i \cdot K_c, \quad (5.3)$$

де  $n$  – число робіт по видах та розрядах;  $t_i$  – норма часу на виконання конкретної операції, год;  $K_c$  – коефіцієнт співвідношення, встановлений Генеральною тарифною угодою між урядом і профспілками,  $K_c = 1 \dots 5$ ;  $C_i$  – погодинна тарифна ставка робітника відповідного розряду, який виконує певну роботу, грн./год:

$$C_i = \frac{M_m \cdot K_i}{T_p \cdot T_{зм}} \quad (5.3)$$

де  $M_m$  – мінімальна місячна оплата праці робітників, грн;  $M_m = 880$  грн;  $K_i$  – тарифний коефіцієнт робітника даного розряду;  $T_p$  – число робочих днів в місяці;  $T_{зм}$  – тривалість зміни, год.

При приготуванні емульсії передбачається присутність 2 працівників, а тому витрати на заробітну плату будуть складати:

$$Z_p = 2 \cdot 0,1 \cdot \frac{880 \cdot 1}{23 \cdot 8} = 0,96 \text{ (грн)}.$$

Окрім того, нарахування в Пенсійний фонд України, в Фонд соціального страхування на випадок безробіття, в зв'язку із тимчасовою втратою працездатності, в Фонд соціального страхування від нещасних випадків на виробництві і професійних захворювань передбачає відрахування у розмірі 37,2 % від зарплати – 0,36 грн.

Загальновиробничі статті витрат складають в межах 250% від  $Z_p$ , тобто 2,4 грн.

Отже, собівартість виготовлення 1 т катіонної бітумної емульсії класу ЕБК – 3:

$$S_e = 3449,76 + 6,19 + 0,96 + 0,36 + 2,4 = 3459,67 \text{ грн}.$$

Ринкова вартість катіонної бітумної емульсії за станом на травень 2012 року знаходилась в межах 4300 – 5700 грн/т.

## **5.6 Розрахунок економічної ефективності створення кавітаційної технології виготовлення бітумних дорожніх емульсій**

Згідно [34, 54, 88] вигоду від впровадження науково-технічної розробки та економічну ефективність проекту оцінюють за допомогою наступних показників: чистий дисконтний дохід (прибуток); індекс дохідності (прибутковості); період окупності інвестицій та внутрішня норма дохідності. Окрім того, основні показники ефективності можуть бути доповнені іншими, залежно від інтересів учасників науково-технічних розробок та їх реалізації у виробництві (фондо- або капіталовіддача, зростання продуктивності праці, організація нових робочих місць тощо).

Показники економічної ефективності інноваційних проектів враховують витрати та результати, пов'язані з їх реалізацією як комерційного характеру, так і ті, що виходять за межі прямих фінансових інтересів учасників створення і реалізації проекту, у тому числі ефект галузей національної економіки, елемент соціального ефекту та інші складові ефективності, зумовлені поза ринковою діяльністю суб'єктів впровадження науково-технічних розробок [33, 37, 66, 82, 86].

На рівні фірм, які займаються виробництвом бітумних емульсій та використовують науково-технічні розробки, до складу їх економічних результатів включаються: виробничі результати – виручка від реалізації виготовленої нової продукції або продукції, виготовленої за новою технологією за виключенням коштів, витрачених на власні потреби.

Вихідні дані для розрахунку ефективності розробки кавітаційної технології приготування бітумних емульсій наведені в табл. 5.3.

Таблиця 5.3 – Вихідні дані розрахунку економічної ефективності розробки кавітаційної технології виготовлення бітумних емульсій

Статті витрат	Величина витрат, грн
Загальні капітальні вкладення в технологію та обладнання	307600
Дохід (прибуток від продажу продукції, виготовленої за новою технологією) за весь період реалізації	644000
Ціна одиниці продукції, (кг)	5

Для задоволення комерційних інтересів кожного учасника проекту важливе значення має оцінка фінансових результатів його реалізації або комерційна ефективність.

Оскільки ставки дисконтування, як правило, визначаються відповідно до рівня банківських позичкових ставок, а тому для розрахунків приймаються її значення рівними 0,16.

Таким чином, в першому році реалізації проекту чистий дисконтний дохід (ЧДД) становитиме:

$$\text{ЧДД} = \frac{-178800}{(1 + 0,16)^1} = -154138 \text{ тис. грн}$$

У кожному наступному році збільшується ступінь дисконтування. Обчислення ЧДД у цьому разі приводять до даних кожного року реалізації проекту. Підсумувавши визначені дані, одержимо ЧДД = 66670 грн.

Співвідношення чистого дисконтного доходу та одноразових і капітальних витрат на використання нової технології визначає дисконтну норму прибутку. При сумі ЧДД, рівній 66670 грн, акціонерному капіталі в 307600 тис. грн індекс дохідності становитиме:

$$ID = \frac{ЧДД}{ДВІ} = \frac{66670}{307600} = 0,22 \text{ або } 22 \%,$$

де ДВІ – вартість капітальних витрат.

Таким чином, рентабельність реалізації проекту становитиме 22 відсотки, а проект слід визначити як прибутковий.

Внутрішня норма дохідності, що визначається ітеративним шляхом з формули

$$\sum_{t=0}^T \frac{P_t}{(1+d)^t} = 0, \text{ отримуємо } \sum_{t=1}^{n=5} \frac{66670}{(1+d)^t} = 0, \text{ звідки } d = 0,29.$$

Внутрішня норма дохідності в цьому разі становить 29 відсотків і виявляється більшою за норму рефінансування капіталовкладень, тобто проект можна вважати відносно стійким щодо ефективності його впровадження.

Термін окупності інвестицій в інноваційний проект визначається як період, що необхідний для повернення їх первісної суми за рахунок накопичених з потоків реальних грошей на основі реалізації проекту. Витрати на проект мають бути окупленими за три роки

$$T = \frac{ДВІ}{ЧД} = \frac{307600}{66670} = 2,3 p,$$

де ДВІ = 307600. грн – сума інвестицій; ЧД = 66670. грн – чистий дохід.

Точка збитковості проекту визначається як відношення умовно постійних поточних витрат виробництва до різниці між ціною на одиницю продукції та умовно – змінними витратами виробництва. У цьому випадку це співвідношення має вигляд:

$$T_0 = \frac{1.3}{5 - 2.5} = 0,52 = 52 \%,$$

де  $T_0$  – точка беззбитковості; 1.3 грн – умовно-постійні витрати; 2.5 грн – умовно змінні витрати; 5 грн – ціна одиниці продукції.

Точка беззбитковості знаходиться в межах 52 відсотків номінального обсягу виробництва, що підтверджує надійність проекту – створення кавітаційної технології емульгування бітуму є доцільним і економічно ефективним.

## ВИСНОВКИ

Основні наукові та практичні результати досліджень є такими:

1. Аналіз існуючих технологій та устаткування для приготування бітумних емульсій надав можливість встановити доцільність використання кавітаційної технології емульгування бітуму і отримання його емульсій із наперед заданими фізико-механічними властивостями, завдяки застосуванню кавітаційних апаратів із дистанційно контрольованими та регульованими параметрами.

2. Запропоновано гіпотезу, щодо використання явища кавітації для деструкції і руйнування молекулярних зв'язків у структурі бітумних композицій. Розроблено та захищено трьома патентами України на корисну модель нову технологію і відповідне устаткування для виготовлення бітумних емульсій за допомогою кавітаційних апаратів, які надають можливість отримання готової продукції необхідної якості без сторонніх приводних механізмів, без додаткових витрат механічної енергії на приведення в рух складових елементів диспергатора. Запропоноване устаткування має спрощену конструкцію порівняно із відомими пристроями. Окрім того, забезпечення цієї установки адаптивною системою керування дає можливість регулювання і дотримання необхідних технологічних режимів технологічного процесу з виготовлення бітумної емульсії.

3. Обґрунтовано доцільність попереднього приготування механічної суміші вхідних компонентів бітумної емульсії за допомогою багатадійного перемішування в потоці сировини (в трубопроводі). Встановлено основні закономірності змішування на попередній стадії та запропоновано метод оптимізації кількості стадій перемішування.

4. Прийняті припущення, розроблено математичну модель і виконано математичне моделювання процесу кавітаційного диспергування складових потоку сировини, яке пов'язує між собою конструктивні та технологічні параметри устаткування для приготування емульсії та характеристику отриманої бітумної емульсії. Виведено експериментальні уточнювальні коефіцієнти математичної моделі процесу емульгування бітуму в запропонованій кавітаційній установці.

5. Проведено математичне планування експериментів і отримано адекватні квадратичні рівняння регресії та поверхні відгуку щодо дисперсності бітумних емульсій, які дали можливість оптимізувати технологічний процес виготовлення бітумної емульсії на запропонованій кавітаційній установці, в залежності від конструктивно-технологічних

параметрів запропонованого кавітаційного устаткування: площі прохідного отвору диспергатора, тиску на вході в диспергатор та частки бітуму в емульсії. Оптимальні значення параметрів процесу приготування бітумних емульсій: площа прохідного отвору диспергатора  $S = 34,5 \text{ мм}^2$ ; частка бітуму в емульсії  $n = 30 \%$ ; тиск на вході в диспергатор  $p = 1,2 \text{ МПа}$  при мінімальному значенні критерію оптимізації  $D = 2 \text{ мкм}$ . Якість готової продукції оцінювалася згідно ДСТУ Б В.2.7-129:2006 «Емульсії бітумні дорожні. Технічні умови» і в основному відповідає вимогам ДСТУ, що підтверджено експериментально в лабораторних та промислових умовах.

6. Оптимізована кількість стадій перемішування у статичному змішувачі: для забезпечення рівномірного розподілення складових компонентів бітумної емульсії у суміші достатньо чотирьох послідовно встановлених спеціальних дискових міжфланцевих кранів, які здійснюють дроселювання суміші складових.

7. Виконано на основі методів нечітких множин прогнозування якості отриманої бітумної емульсії в залежності від характеристик вхідної сировини, параметрів кавітаційного пристрою та технологічних параметрів і режимів процесу приготування бітумних емульсій.

8. Запропоновано методику інженерного розрахунку раціональних конструктивних та технологічних параметрів кавітаційного устаткування для приготування емульсій бітумних, в основу якої покладено розрахунок всіх складових технологічного процесу і відповідного обладнання для його реалізації: теплові розрахунки, гідравлічні розрахунки, а також розрахунки конструктивного виконання устаткування, що дає можливість підібрати відповідне технологічне обладнання, яке забезпечить необхідний режим роботи устаткування при заданій продуктивності виробництва емульсії необхідної дисперсності.

9. Розроблена технологічна схема приготування емульсій бітумних за допомогою кавітаційного диспергатора та устаткування, що здійснює кавітаційну обробку гетерогенних середовищ була реалізована на ряді будівельних організацій України. Собівартість отримання готової продукції на яких суттєво відрізняється від її ринкової вартості. Економічна ефективність та доцільність створення кавітаційної технології виготовлення бітумних емульсій підтверджена такими основними показниками, як: чистий дисконтний дохід на розрахунковий період реалізації проекту, який приймали 5 років, склав 66,6 тис. грн, рентабельність проекту 22 %, внутрішня норма дохідності 29 %, період окупності – 2,3 роки, а точка беззбитковості в межах 52 %.

## ЛІТЕРАТУРА

1. Адлер Ю. П. Планирование эксперимента при поиске оптимальных условий / Ю. П. Адлер, Е. В. Маркова, Ю. В. Грановский. – М. : Наука, 1976. – 280 с.
2. Акопян А. А. Геометрические свойства кривых второго порядка. / А. А. Акопян, А. В. Заславский – М. : МЦНМО, 2007. – 136 с.
3. Альтшуль А. Д. Примеры расчетов по гидравлике : учебное пособие / А. Д. Альтшуль, В. И. Калицун, Ф. Г. Майрановский. – М. : Стройиздат, 1977. – 255 с.
4. Бауман К. В. Експериментальні дослідження нової кавітаційної технології приготування бітумних емульсій / К. В. Бауман, І. В. Коц // Вісник Кременчуцького національного університету ім. М. Остроградського. – Кременчук : КрНУ. – 2012. – № 3 (74). – С. 76–79.
5. Бауман К. В. Математична модель емульгування бітуму в кавітаційній установці / К. В. Бауман, М. Р. Бауман // Матеріали за 8-а міжнародна научна практична конференція, [Найновітє постиження на європейската наука – 2012], (Софія, 17–25-ти юни 2012) – Софія, 2012. – Т. 13. – С.51–54.
6. Бауман К. В. Кавітаційна установка для приготування бітумних емульсій / К. В. Бауман // Вісник національного технічного університету «Харківський політехнічний інститут» : збірник наук. пр. «Хімія, хімічна технологія та екологія». – Харків : НТУ «ХПІ». – 2008. – № 38 – С. 77–81.
7. Бауман Е. В. Кинетика образования эмульсии в кавитационном диспергаторе битумно-эмульсионной установки / Е. В. Бауман, И. В. Коц // Молодой ученый. – 2012. – № 12 (47). – С. 30–34.
8. Бауман К. В. Оптимізація процесу приготування бітумної емульсії на кавітаційній установці / К. В. Бауман, І. В. Коц // Вісник Донбаської національної академії будівництва і архітектури. Сучасні будівельні матеріали. – Макіївка : ДонНАБА. – 2012. – № 1 (93). – С. 191–197.
9. Бауман К. В. Нова технологія виготовлення бітумної емульсії / К. В. Бауман // Хімічна та екологічна освіта: стан і перспектива розвитку : матеріали Української науково - практичної конференції – Вінниця : Едельвейс і К. – 2008. – С. 127.

10. Бауман К. В. Нова технологія та устаткування для виготовлення бітумної емульсії / К. В. Бауман, А. А. Борисенко // Автомобільні дороги і дорожнє будівництво. – 2008. – № 75. – С. 47–50.
11. Бауман К. В. Перспективи використання кавітаційних диспергаторів для емульгування бітуму / К. В. Бауман // Сучасні технології, матеріали і конструкції в будівництві. – 2008. – № 5. – С.45–49.
12. Бауман К. В. Система автоматизованого керування емульсійною установкою на основі математичної моделі її робочого процесу / К. В. Бауман, І. В. Коц // Наукові праці Вінницького національного технічного університету. – 2008. – № 4. – Режим доступу: <http://www.nbu.gov.ua/e-journals/VNTU/index>.
13. Бауман К. В. Установа для приготування бітумних емульсій / К. В. Бауман, І. В. Коц // Механіка і фізика руйнування будівельних матеріалів та конструкцій : Зб. наук. праць. – Львів : Каменяр. – 2009. – Випуск 8. – С. 374–379.
14. Битумы нефтяные дорожные вязкие. Технические условия : ДСТУ 44044-2001 – Чинний від 2002-01-01. – К. : Держстандарт України, 2001. – 14 с. – (Національний стандарт України).
15. Блохин А. В. Теория эксперимента : курс лекций. В 2 ч. Ч. 2. / А. В. Блохин. – Мн. : БГУ, 2002. – 67 с.
16. Бондарь А. Г. Планирование эксперимента в химической технологии / А. Г. Бондарь, Г. А. Статюха. – К. : Вища школа, 1976. – 183 с.
17. Борщевский Ю. Т. Повышение эффективности землесосных снарядов / Ю. Т. Борщевский, И. М. Федоткин, Л. И. Погодаев – К. : Будівельник. – 1974. – 248 с.
18. Будівельне матеріалознавство / [Кривенко П. В, Пушкарьова К. К., Барановський В. Б. та ін.] – К. : ЕксОб, 2004. – 704 с.
19. Будник В. А. Битумные эмульсии. Особенности состава и применения / В. А. Будник, Н. Г. Евдокимова, Б. С. Жирнов // Нефтегазовое дело. – 2006. – Режим доступу: <http://www.ogbus.ru>.
20. Будник В. А. Механический способ эмульгирования битума в воде. Установка. Методика. Результаты апробирования / В. А. Будник, Н. Г. Евдокимова, Б. С. Жирнов // Нефтегазовое дело. – 2006. – Режим доступу: [http://www.ogbus.ru/authors/Budnik/Budnik\\_2.pdf](http://www.ogbus.ru/authors/Budnik/Budnik_2.pdf).
21. Будник В. А. Процессы эмульгирования битума в воде и способы их совершенствования / В. А. Будник, Н. Г. Евдокимова, Т. В. Пушкарёва // Нефтегазовое дело. – 2008. – Режим доступу: <http://www.ogbus.ru>.



22. Веретельник Т. И. Математическое моделирование кавитационного потока жидкости в химико-технологической системе / Т. И. Веретельник, Ю. Н. Дифучин // Вісник ЧДТУ, 2008. – № 3 – С. 82–85.
23. Воюцкий С. С. Курс колоидной химии. / С. С. Воюцкий – 2-е изд., перераб. и доп.– М. : Химия, 1975. – 512 с.
24. Гель П. В. Використання імпульсних кавітаційних технологій при виготовленні біопалива / П. В. Гель, К. В. Бауман, І. В. Коц // Збірник наукових праць Вінницького національного аграрного університету. – Вінниця, 2010. – Випуск 42. – Т. 3. – С. 20–24.
25. Гидроизоляция ограждающих конструкций промышленных и гражданских сооружений : справ. пособие / [Беляев Л. Н., Дмитриева Г. К., Искрин В. С. и др.] ; под ред. В. С. Искрина. – М. : Стройиздат, 1975. – 318 с.
26. Грабова Т. Л. Диспергирование гетерогенных систем в роторно-пульсационных аппаратах дисково-цилиндрического типа : дис. ... канд. техн. Наук : 05.14.06 / Грабова Т. Л. – К., 2007. – 198 с.
27. Дашченко О. Ф. MATLAB в инженерных та наукових розрахунках / О. Ф. Дашченко, В. Х. Кирилов, Л. В. Коломієць, В. Ф. Орбей / Монографія. – Одеса : Астропринт, 2003. – 214 с.
28. Дисперсність емульсії при гідродинамічному проточно-кавітаційному способі її отримання / Б. С. Радовський, В. В. Мозговий, І. П. Гамеляк та ін. // Автомоб. дороги і дор. буд-во.– 1997. – Вип. 54.– С. 115–119.
29. Дослідження та інтенсифікація процесів тепломасообміну в обертових пульсуючих потоках гетерогенних дисперсних середовищ / Б. І. Басок, Б. В. Давиденко, А. І. Накорчевський та ін. // Проект ДФФД: № 04.07/00019 – С. 385–403.
30. Емульсії бітумні дорожні. Технічні умови: ДСТУ Б В.2.7-129:2006. – чинний від 2007-06-01. – К. : Мінбуд України, 2006. – 29 с. – (Національний стандарт України).
31. Заде Л. А. Понятие лингвистической переменной и ее применение к принятию приближенных решений / Л. А. Заде. – М. : Мир, 1976. – 167 с.
32. Зайдель А. Н. Погрешности измерений физических величин. – Л. : Наука, 1985. – 112 с.

33. Закон України Про інвестиційну діяльність // Закони України. 1996. – С. 173–181.
34. Закон України Про наукову і науково-технічну діяльність // Голос України. 1993 – № 245. – С. 6–9.
35. Идельчик И. Е. Справочник по гидравлическим сопротивлениям / под ред. М. О. Штейнберга. – 3-е изд., перераб. и доп.– М. : Машиностроение, 1992. – 672 с.
36. Ивоботенко Б. А. Планирование эксперимента в электромеханике / Б. А. Ивоботенко. – М. : Энергия, 1975. – 185 с.
37. Инновационный менеджмент : справ. пособие. – СПб. : Наука, 1997. – 560 с.
38. Кавитация / М. А. Промтов // Ультразвуковая техника - ИНЛАБ. Статьи – Режим доступа: <http://www.untinlab.ru/pages.html>.
39. Кавитация в переработке нефти / О. М. Яхно, А. Д. Коваль, Л. И. Пищенко, В. П. Паскалов, Н. Н. Яске – К. : Світ, 1999. – 260 с.
40. Калицун В. И. Основы гидравлики и аэродинамики / В. И. Калицун, Е. В. Дроздов – М. : Сройиздат, 1980. – 247 с.
41. Кедринский В. К. Пузырьковый кластер, кумулятивные струи и кавитационная эрозия / В. К. Кедринский // Трение, износ, смазка. – 2008. – Т. 10, № 1 – С. 24–35.
42. Климов Р. А. Особенности теплообмена в технологических эмульсиях : дис. ... канд. техн. наук : 05.14.06 / Р. А. Климов – Днепропетровск, 2007. – 190 с.
43. Книга: Строительные материалы и технологии – Режим доступа: <http://msd.com.ua/str/27.html>.
44. Козловський В. О. Техніко-економічні обґрунтування та економічні розрахунки в дипломних проектах та роботах : навчальний посібник / В. О. Козловський – Вінниця : ВДТУ, 2003. – 75 с.
45. Кулагин В. А. Методы и средства технологической обработки многокомпонентных сред с использованием эффектов кавитации : дис. ... доктора техн. наук : 01.04.11, 01.02.05 / В. А. Кулагин – Красноярск, 2004. – 299 с.
46. Ластовкина Г. А. Справочник нефтепереработчика / Г. А. Ластовкина, Е. Д. Радченко, М. Г. Рудина – Л. : Химия, 1986. – 648 с.
47. Леоненков А. В. Нечеткое моделирование в среде MATLAB и fuzzyTECH / А. В. Леоненков. – СПб., 2005. – 736 с.

48. Луговський О. Ф. Підвищення ефективності апаратних засобів для реалізації ультразвукових кавітаційних технологій : дис. ... доктора техн. наук : 05.05.13 / О. Ф. Луговський – Київ, 2005. – 313 с.
49. Лойцянский Л. Г. Механика жидкости и газа / Л. Г. Лойцянский – 5-е изд., переработанное – М. : ГРФМЛ издательства Наука, 1978. – 736 с.
50. Лызо Б. Г. Новые конструкции сваебойных молотов / Б. Г. Лызо, Ю. В. Дмитриевич. – М. : ЦНИИИТЭСтройдормаш, 1968. – 83 с.
51. Мастики покрівельні та гідроізоляційні. Загальні технічні умови: ДСТУ Б В.2.7-108-2001 (ГОСТ 30693-2000). – Чинний від 2002-01-01. – К. : Мінбуд України, 2001. – 15 с. – (Державний стандарт України).
52. Математическая энциклопедия (в 5-и томах). – М. : Советская Энциклопедия, 1982. – Том 2 : Д'аламбера оператор – Кооперативная игра. – 552 с.
53. Матюшкин М. В. Теплообмен и гидродинамика в пульсационном диспергаторе для приготовления глинистых суспензий : дис. ... канд. техн. наук : 05.14.06 / М. В. Матюшкин – К., 2005. – 122 с.
54. Методика визначення економічної ефективності витрат на наукові дослідження і розробки та їх впровадження у виробництво. Затверджено: Наказ Міністерства економіки та з питань європейської інтеграції та Міністерства фінансів України, 26.09.01 №218/446.
55. Методичні вказівки для лабораторних робіт студентів із вивчення дисциплін «Будівельне матеріалознавство», «Дорожньо-будівельні матеріали», «Органічні в'язучі» призначені для студентів 2 (3) курсу спеціальностей 7.092104, 7.092105, 7.092106 – К. : НТУ, 2006. – 71 с.
56. Методы и устройства для комплексной кавитационной обработки жидкостей / М. А. Промтов // Ультразвуковая техника – ИНЛАБ. Статті – Режим доступу: <http://www.tstu.ru/r.php?r=structure.kafedra&sort=&id=3>.
57. Микульчик А. Ф. Теплоизоляционный материал из местного сырья // Строительные материалы. – 1965. – С. 35.
58. Москвіна С. М. Проблеми оптимізації управління технологічним процесом виготовлення цегли / С. М. Москвіна, Д. О. Ковалюк // Вісник ХНУ. – 2005. – № 5. – С.121–125.

59. Новицкий П. В. Оценка погрешностей результатов измерений / П. В. Новицкий, И. А. Зограф. – Л. : Энергоатомиздат, 1991. – 304 с.
60. Панкевич О. Д. Діагностування тріщин будівельних конструкцій за допомогою нечітких баз знань – Монографія / О. Д. Панкевич, С. Д. Штовба. – Вінниця : УНІВЕРСУМ-Вінниця, 2005. – 108 с.
61. Панькин С. В. Полимерно-битумная эмульсия ЭМС на основе аминов для слоёв износа дорожных покрытий : дис. ... канд. техн. наук : 05.23.05 / С. В. Панькин – Ростов-на-Дону, 2004. – 218 с.
62. Пат. 37338 Україна, МПК8 E01C 19/00 Установка для приготовления битумных эмульсий / А. А. Борисенко, К. В. Бауман, І. В. Коц, заявник і патентовласник ВНТУ. – № u200807653 ; заявл. 04.06.08 ; опубл. 25.11.08, Бюл. № 22.
63. Пат. 40984 Україна, МПК8 B01F 13/00 Узел диспергування / А. А. Борисенко, І. В. Коц, К. В. Бауман, І. П. Гамеляк, , заявник і патентовласник ВНТУ. – № u200815036 ; заявл. 26.12.08 ; опубл. 27.04.09, Бюл. № 8.
64. Пат. 48270 Україна, МПК8 E01C 19/00 Високопродуктивна кавітаційна установка для приготування бітумних емульсій / К. В. Бауман, І. В. Коц, В. В. Швець, О. В. Христич, заявник і патентовласник ВНТУ. – № u200909874 ; заявл. 28.09.09 ; опубл. 10.03.10, Бюл. № 5.
65. Пат. 76925 Україна, МПК B01F 3/10 Спосіб виготовлення бітумних емульсій / Бауман К. В., Коц І. В, заявник і патентовласник ВНТУ. – № u201207182 ; заявл. 13.06.12 ; опубл. 25.01.13, Бюл. № 2.
66. Пересада А. Д. Основы инвестиционной деятельности / А. Д. Пересада – СПб., 1996. – С. 190–195.
67. Погодаев Л. И. Снижение интенсивности кавитации за счет увеличения релаксирующих свойств жидкостей, использования эмульсий и покрытий / Л. И. Погодаев, О. О. Матвеевский, Д. Ф. Доских // Трение, износ, смазка. – Март 2008. – Т. 10, № 1 – Режим доступа: [www.tribo.ru](http://www.tribo.ru).
68. Пособие по приготовлению и применению битумных дорожных эмульсий (к СНиП 3.06.03-85) – [Утверждено приказом Союздорнии от 25.03.87 № 51] – М.: Стройиздат, 1989. – 32 с.
69. Промтов М. А. Машины и аппараты с импульсными энергетическими воздействиями на обрабатываемые вещества : учебное пособие / М. А. Промтов – М. : Машиностроение-1, 2004. – 136 с.

70. Промтов М. А. Перспективы применения кавитационных технологий для интенсификации химико-технологических процессов / М. А. Промтов // Вестник ТГТУ – 2008. – Т. 14, № 4. – С. 861–869. – Режим доступа до журн.: [http://vestnik.tstu.ru/rus/t\\_14/pdf/14\\_4\\_011.pdf](http://vestnik.tstu.ru/rus/t_14/pdf/14_4_011.pdf)
71. Промтов М. А. Пульсационные аппараты роторного типа. Теория и практика. / М. А. Промтов – М. : Машиностроение, 2001. – 130с.
72. Редикот RM007 – Режим доступа: [http://emulbittech.ru/redicote\\_rm007](http://emulbittech.ru/redicote_rm007).
73. Ривкин С. Л. Термодинамические свойства воды и водяного пара : справочник. – 2-е изд., перераб. и доп. / С. Л. Ривкин, А. А. Александров – М. : Энергоатомиздат, 1984. – 80 с.
74. Рождественский В. В. Кавитация / В. В. Рождественский – Ленинград: Судостроение, 1977. – 248 с.
75. Розробка устаткування та технологій виготовлення бітумних емульсій і мастик для гідроізоляційних, покрівельних та інших видів робіт : Звіт про НДР (заключний) 93/4. / Вінницький національний технічний університет. – № держреєстрації 0110U001845. – Вінниця, 2010. – 100 с.
76. Ротштейн А. П. Интеллектуальные технологии идентификации: нечеткие множества, генетические алгоритмы, нейронные сети / А. П. Ротштейн. – Вінниця : УНІВЕРСУМ – Вінниця, 1999. – 320 с.
77. Семириков И. С. Физическая химия строительных материалов / И. С. Семириков – Екатеринбург : ГОУ УГТУ-УПИ, 2002. – 245 с.
78. Сергеева Ю. Н. Влияние параметров кавитации на процесс эмульгирования / Ю. Н. Сергеева, А. Д. Горбунов, В. Е. Черниченко // Наукова конференція «Наука та практика: Інновація 2007» – Режим доступа : <http://www.pdaa.com.ua/np/pdf2/25.pdf>
79. Сердюк В. Р. Нова технологія та устаткування для виготовлення гідроізоляційних матеріалів на основі бітумних емульсій / В. Р. Сердюк, К. В. Бауман // Будівельні матеріали, виробництво та санітарна техніка. – 2009. – №34. – С. 35–42.
80. Троян С. В. Застосування кавітаційних технологій при виготовленні біопального / С. В. Троян, К. В. Бауман, І. В. Коц // Матеріали за 7-а міжнародна научна практична конференція [Найновітє постиження на європейската наука – 2011], (Софія, 17–25-ти юни 2011). – Софія, 2011. – Т. 42, Технологии. – С.9–12.

81. Термины и определения. Способы возбуждения кавитации. Динамика кавитационного пузырька / М. А. Промтов – Режим доступа: <http://esmorodov.narod.ru/G1.pdf>.
82. Фатхутдинов Р. А. Инновационный менеджмент : учебник для вузов / Р. А. Фатхутдинов – М. : ЗАО Бизнес-школа Интел-Синтез, 1998. – 600 с.
83. Федоткин И. М., Немчин А. Ф. Использование кавитации в технологических процессах / И. М. Федоткин, А. Ф. Немчин. – К., Вища школа, 1984. – 68 с.
84. Фізико-хімічна механіка будівельних матеріалів : навчальний посібник / В. І. Братчун, В. О. Золотарьов, М. К. Пактер та ін.; під ред. В. І. Братчуна– Макіївка : ДонНАБА, 2006. – 303 с.
85. Червяков В. М. Использование гидродинамических и кавитационных явлений в роторных аппаратах : монография / В. М. Червяков, В. Г. Однодолько. – М. : Машиностроение, 2008. – 116 с.
86. Чирков В. Г. Обґрунтування фінансування інноваційних проєктів // Фінанси України. – 1996. – № 6. – С. 70–74.
87. Чкалова О. Н Основы научных исследований / О. Н Чкалова – К. : Вища школа, 1987 – 120 с.
88. Шапиро В. Д. Управление проектами / В. Д. Шапиро – СПб., 1996. – 216 с.
89. Штербачек З. Перемешивание в химической промышленности / З. Штербачек, П. Тауск ; пер. с чешского И. С. Павлушенко. – Л. : Ленинградское отделение Госхимиздата, 1963. – 416 с.
90. Amromin E. L. Approximate solution of the three-dimensional inverse problem for nonlifting bodies with optimum cavitation characteristics / Amromin E. L., Bushkovskii V. A. // Fluid Dynamics. – 1994. – Vol. 29, № 3. – P. 373–379.
91. Cavitation technologies for dispergation and homogenization / P. G. Dumitrash, M. K. Bologna, T. V. Kuchuk [та ін.] // Surface engineering and applied electrochemistry. – 2009. – V. 45, № 4 – P. 342–346.
92. Evdokimov I. N. Effect of asphaltenes on the thermal properties of petroleum and bitumen emulsions / I. N. Evdokimov, N. Yu. Eliseev // Chemistry and technology of fuels and oils. – 2002. – V. 38, № 6. – P. 375–380.
93. Gureev A. A. News in asphalt production technology / A. A. Gureev, V. E. Somov, A. I. Lugovskoi, A. I. Ivanov // Chemistry and technology of fuels and oils. – 2000. – V. 36, № 2. – P. 134–137.

94. Isacson U. A compilation of laboratory methods for studying of bitumen emulsions / Isacson U., Ph. D. // *Materiaux et constructions*. – V. 18, № 105. – P. 228–236.
95. Karlikov V. P. Jet-cavitation flow past “Fluid Cylinders” / V. P. Karlikov, S. L. Tolokonnikov // *Fluid Dynamics*. – 2004. – V. 39, – P. 128–135.
96. Khil`ko S. L. Physicochemical principles of preparation of emulsion fuels / S. L. Khil`ko, E. V. Titov // *Chemistry and technology of fuels and oils*. – 2007. – Vol. 43, № 5. – P. 437–447.
97. Lu X. Rheological properties of SEBS, Eva and EBA polymer modified bitumens / Lu X., Isacson U., Ekblad J. // *Materials and structures*. – 1999. – V. 32. – P. 131–139.
98. On the mechanism of the bursting phenomena of propeller tip vortex cavitation / Akihisa Konno, Kazuaki Wakabayashi, Hajime Yamaguchi [та іт.] // *Journal of Marine science and technology*. – 2002. – P. 181–192.
99. Prokumin A. N. Cavitation – induced particle – wall interaction in Newtonian and non – Newtonian fluids / A. N. Prokumin, R. V. Slavin // *Rheol acta* – 2006. – P. 348–356.
100. Smorodov E. A. Cavitation bubble dynamics in a polar liquid / Smorodov E. A. // *Technical physics letters*. – 2006. – V. 32, № 4. – P. 340–342.
101. Stebnovskii S. V. Conditions for development of cavitation in scleronomous media / Stebnovskii S. V. // *Journal of applied mechanics and technical physics*. – 2001. – V. 442, № 1. – P. 77–86.
102. Syroezhko A. M. Modification of paving asphalts with sulfur / A. M. Syroezhko, O. Yu. Begak, V. V. Fedorov, E. N. Gusarova // *Russian journal of applied chemistry*. – 2003. – V. 76, № 3. – P. 491–496.
103. Viten`ko T.N. A Mechanism of the activating effect of hydrodynamic cavitation on water / T. N. Viten`ko, Ya. M. Gumnitskii // *Journal of water chemistry and technology* – 2007. – V. 29, № 5. – P. 231–237.
104. Waterproofing latex-bitumen emulsions / Nuriev M. A., Murafa A. V., Makarov D. B. [та іт.] // *Polymer science, series D. Glues and sealing materials*. – 2008. – V. 1, № 2. – P. 132–134.

*Наукове видання*

**Бауман Катерина Володимирівна**

**Коц Іван Васильович**

## **КАВІТАЦІЙНА ТЕХНОЛОГІЯ ВИГОТОВЛЕННЯ БІТУМНИХ ЕМУЛЬСІЙ**

Редактор С. Малішевська

Оригінал-макет підготовлено К. Бауман

Підписано до друку 4.11.2013 р.  
Формат 29,7×42¼. Папір офсетний.  
Гарнітура Times New Roman.  
Друк різнографічний. Ум. др. Арк. 7,39  
Наклад 300 (1-й запуск 1–75) Зам № 10-05

Вінницький національний технічний університет,  
КІВЦ ВНТУ,  
21021, м. Вінниця, Хмельницьке шосе, 95,  
ВНТУ, ГНК, к. 114.  
Тел. (0432) 59-85-32.

Свідоцтво суб'єкта видавничої справи  
серія ДК № 3516 від 01.07.2009 р.

Віддруковано ФОП Барановська Т. П.  
21021, м. Вінниця, вул. Порики, 7.  
Свідоцтво суб'єкта видавничої справи  
серія ДК № 4377 від 31.07.2012 р.