

## РЕФЕРАТ

Магістерська робота за темою «Дослідження перемішування газорідинної суміші з розробкою самоусмоктуючої мішалки з кутом скосу вхідної кромки  $45^\circ$ »: 76 с., 15 табл., 19 рис., 1 дод., 108 джерел.

### САМОУСМОКТУЮЧА МІШАЛКА, РЕАКТОР, ГІДРОДИНАМІКА, ОБ'ЄМНИЙ АПАРАТ, КОЕФІЦІЄНТ ВИТРАТИ, ВХІДНА КРОМКА

Об'єкт дослідження – самоусмоктуюча мішалка з кутом скосу вхідної кромки  $45^\circ$ .

Ціль роботи – Теоретичне та експериментальне дослідженню гідродинаміки процесу перемішування газорідинного середовища в апараті об'ємного типу з самоусмоктуючими мішалками з кутом скосу вхідної кромки  $90^\circ$  і розробка методу розрахунку таких апаратів, дослідження гідродинаміки транзитного потоку по каналах мішалки та вдосконалення самоусмоктуючих перемішувачів пристроїв.

У процесі експериментальних досліджень використовували інструментальні вимірювання для визначення об'ємної продуктивності газової фази та рідини і потужності та візуальні спостереження при визначенні початкової частоти обертання мішалки та середнього і локального газовмісту.

Результати досліджень показали, що конфігурація вхідного отвору впливає на пропускну спроможність лабораторних пристроїв; виявлено, що кут скосу вхідної вертикальної кромки впливає на пропускну спроможність випробовуваного лабораторного пристрою. Проведені експериментальні випробування залежності насосної продуктивності по газу і рідині та середнього і локального газовмісту перемішувачого середовища та витрат потужності самоусмоктуючих ежекційних мішалок від геометричних розмірів для визначення оптимальних параметрів самоусмоктуючих перемішувачів пристроїв.

## ЗМІСТ

СКОРОЧЕННЯ ТА УМОВНІ ПОЗНАКИ.....	4
ВСТУП .....	6
Розділ 1. Аналітичний огляд газорідинних апаратів з мішалками .....	10
1.1 Загальні положення та визначення .....	10
1.2 Сучасний стан газорідинних апаратів .....	13
1.3 Газовміст перемішуючого середовища в апараті з мішалками .....	18
1.4 Потужність, споживана при перемішуванні. Ефективність перемішування .....	22
1.5 Теорія роботи самоусмоктуючої мішалки .....	25
Розділ 2. Методика розрахунку апаратів з самоусмоктуючими перемішуючими пристроями .....	28
2.1 Алгоритм розрахунку апаратів з самоусмоктуючими перемішуючими пристроями .....	28
2.2 Висновки та рекомендації щодо розрахунку апаратів об'ємного типу з самоусмоктуючими перемішуючими пристроями .....	32
Розділ 3. Експериментальна частина .....	34
3.1 Опис експериментального стенду та об'ємного апарату з самоусмоктуючими мішалками .....	34
3.1.1 Опис самоусмоктуючої мішалки .....	38
3.2 Методика дослідження продуктивності самоусмоктуючої мішалки з кутом скосу вхідної кромки 60° .....	39
3.2.1 Методика визначення середнього газовмісту в апараті з самоусмоктуючими мішалками .....	46
3.3 Опис експериментальної установки для вивчення гідродинаміки витікання рідини та дослідних лабораторних пристроїв .....	49
3.4 Випробування витратних характеристик при витіканні рідини із вертикального прямокутного насадка .....	52

3.5 Обговорення результатів дослідження. Гідродинамічні характеристики процесу витікання рідини з циліндричного отвору або циліндричного насадка .....	57
Розділ 4. Застосування запропонованих конструкцій самоусмоктуючих перемішуючих пристроїв .....	60
Розділ 5. Безпека експлуатації апаратів, що працюють під тиском .....	62
Висновки .....	64
Перелік джерел посилання .....	65
Додаток .....	74

## СКОРОЧЕННЯ ТА УМОВНІ ПОЗНАКИ

$D$  – діаметр апарату, м;

$d$  – діаметр самоусмоктуючої мішалки, м;

$d_c$  – діаметр маточини мішалки, м;

$d_o$  – середній діаметр пухирця газу, м;

$z$  – число лопатей мішалки;

$b, b_o$  – висота лопати мішалки, ширина каналу лопати, м;

$n_o, n_{гс}, n$  – початкова частота обертання мішалки, гідростатична і робоча частота обертання мішалки, 1/с;

$H, H_{ж}, \Delta H, H_{г-ж}$  – висота апарату, глибина заповнення апарату, приріст висоти шару рідини за рахунок газозбереження, висота газорідинного шару, м;

$h, h_b, h_{гс}$  – глибина занурення мішалки, середня висота газорідинного шару над мішалкою, відстань від рівня рідини до нижньої крапки каналу лопати, м;

$\omega$  – кутова швидкість обертання мішалки, рад/с;

$\omega'$  – приведена швидкість газу, м/с;

$R, r$  – радіус мішалки, довільний, м;

$\zeta$  – коефіцієнт опору мішалки;

$\bar{\Phi}$  – середнє газозбереження в апараті, од.;

$\bar{\Phi}_o$  – середнє газозбереження в кільцевому обсязі, ометаємом лопатью мішалки, од.;

$\bar{\Phi}_л$  – середнє газозбереження в каналі лопаті од.;

$\bar{\Phi}_п$  – середнє газозбереження в площині вихідного отвору лопаті од.;

$F_{уд}$  – питома поверхня контакту фаз, 1/м;

$f_{г}$  – площа перетину апарату, зайнята газом, м<sup>2</sup>;

$f_{\text{см}}$  – площа вільного перетину апарата, зайнята газорідинною сумішшю,  $\text{м}^2$ ;

$f, f_0$  – площа вихідного отвору лопаті, сумарна площа перетину газових каналів,  $\text{м}^2$ ;

$c_{\text{равн}}$  – рівноважна концентрація компонента, що поглинається, і його середня концентрація в розчині,  $\text{кг}/\text{м}^3$ ;

$\rho, \rho_{\text{п}}, \rho_{\text{г}}$  – щільність води; суміші в каналі лопаті; газу;  $\text{кг}/\text{м}^3$

$\mu, \mu_{\text{п}}, \mu_{\text{г}}$  – в'язкість води; суміші в каналі лопати; газу;  $\text{Па} \cdot \text{с}$ ;

$\nu_{\text{г}}, \nu$  – кінематичний коефіцієнт в'язкості повітря, води,  $\text{м}^2/\text{с}$ ;

$\sigma$  – поверхневий натяг,  $\text{Н}/\text{м}$ ;

$g$  – прискорення вільного падіння,  $\text{м}/\text{с}^2$ ;

$V_{\text{г}}$  – обсяг повітря усмоктуваного мішалкою,  $\text{м}^3$ ;

$V_{\text{ж}}$  – обсяг рідини в апараті,  $\text{м}^3$ ;

$\beta_{\text{об}}$  – об'ємний коефіцієнт масовіддачі;

$N$  – потужність,  $\text{Вт}$ ;

$Re$  – число Рейнольдса.

## ВСТУП

Одними з основних процесів хімічної технології є масообмінні процеси, серед яких значна частина проводиться в газорідних системах. До таких процесів відносяться абсорбція, десорбція, ректифікація, дистиляція і ін. В основному вони застосовуються для розділення рідких сумішей або виділення окремих компонентів з газових або пароподібні викидів. Устаткування, призначене для проведення таких процесів, в більшості випадків залишається металомісткою і малопродуктивною. Причому постійно збільшуються вимоги, що пред'являються до якості кінцевих продуктів, обумовлені як жорсткою конкуренцією різних виробників, так і все більш зростаючою роллю екологічного контролю.

Тому, завданням апаратурного оформлення сучасних масообмінних процесів є пошук найбільш ефективних апаратів, що дозволяють поліпшити якісні і кількісні показники.

У сучасний період задача розділення газів і газових сумішей на окремі компоненти залишається вельми актуальною. Успішне її рішення тільки на основі використання продуктів розділення повітря дозволяє забезпечити хімічну промисловість сировиною для виробництва мінеральних добрив, інтенсифікувати металургійне виробництво чорних і кольорових металів, а також одержувати з повітря інертні гази, використовувані в багатьох галузях промисловості.

Масообмінні процеси широко використовуються в промисловості для вирішення завдань розділення рідких і газових гомогенних сумішей, їх концентрування, а також для захисту навколишнього природного середовища (перш за все для очищення стічних вод і газів, що відходять). Наприклад, практично в кожному хімічному виробництві взаємодія оброблюваних речовин здійснюється в реакторі, в якому зазвичай відбувається тільки часткове перетворення цих речовин в продукти реакції. Тому що виходить з реактора суміш продуктів реакції і не прореагував сировини необхідно

піддати поділу, для чого цю суміш направляють в масообмінних апаратуру, з якої не прореагували сировину повертається в реактор, а продукти реакції направляються на подальшу переробку або використання.

Перенесення речовини усередині фази - з фази до межі розділу фаз або навпаки - від межі розділу в фазу - називають массоотдачі (за аналогією з процесом перенесення теплоти всередині фази - тепловіддачею).

Масообмінні процеси поділяють на: масопередачі в системах з вільною межею розділу фаз (газ-рідина, пара-рідина, рідина-рідина); масопередачі в системах з нерухою поверхнею контакту фаз (системи газ - тверде тіло, пар - тверде тіло, рідина - тверде тіло); масопередачі через напівпроникні перегородки (мембрани).

Найпоширенішим в хімічній промисловості є механічне перемішування, яке здійснюється за допомогою мішалок, яким надається обертовий рух безпосередньо від електродвигуна або через редуктор, чи клиноремінну передачу. Існують також мішалки зі зворотно-поступальним рухом, які мають привод від механічного або електромагнітного вібратора.

Найбільш ефективними перемішувачами пристроями стандартного типу вважаються турбінні відкриті мішалки. Основною перевагою їх є створення розвинутої міжфазної поверхні за рахунок інтенсивного дроблення бульбашок газу або повітря та їх рівномірного розподілу в перемішуємому об'ємі. Окремі конструкції перемішувачів пристроїв в апаратах виконують функцію відцентрового насоса, який перекачує газову фазу в перемішуєме середовище. Для цієї мети часто використовуються турбінні самоусмоктуючі мішалки, які дозволяють спростити технологічні схеми виробництва, пов'язані з підтримкою надмірного тиску на лініях подачі газового реагенту.

Ефективними пристроями для усмоктування та диспергування газу є турбінні мішалки відкритого та закритого типу, які обертаються в коаксіально розташованій трубі, що переходить в конусне кільце з радіально закріпленими статорними пластинами.

У апаратах такого типу газовий реагент подається під перемішувачий пристрій через барботер або через газорозподільник, виконаний у вигляді кільцевого відкритого знизу жолоба з рівномірно розміщеною по його верхній кромці перфорацією.

Мета роботи - узагальнення теоретичних і експериментальних даних, що відносяться до гідродинаміки газорідинних апаратів і розробка методу розрахунку гідродинаміки транзитного потоку по каналах самоусмоктуючої мішалки з кутом скосу вхідної кромки  $45^\circ$ .

Методи дослідження. При експериментальних дослідженнях використовувалися методи візуального спостереження та фотографування початку диспергування повітря в перемішуємий об'єм рідини, середнього газовмісту в апараті, визначення продуктивності самоусмоктуючої мішалки по газовій фазі і рідині за рахунок самоусмоктування та потужності мішалок. Обробка результатів експериментів, порівняння з теоретичними розрахунками та визначення похибок проведені за допомогою методів математичної статистики.

Випробовано модель самоусмоктуючої мішалки з кутом скосу вхідної кромки  $45^\circ$  в об'ємному апараті на експериментальному стенді використовувалися методи фізичного та математичного моделювання.

Експерименти з гідродинаміки, газовмісту та потужності самоусмоктуючих мішалок проведені на експериментальному стенді з лабораторною моделлю апарату об'ємного типу з досліджуваними самоусмоктуючими мішалками.

Наукова новизна роботи. Розроблений лабораторний стенд і засіб експериментального визначення коефіцієнта втрат при витіканні транзитного потоку через прямокутну щілину залежно від конфігурації вхідної частини отвору. Проведені дослідження по гідродинаміці при витіканні транзитного потоку через насадок, який є копією полої лопаті самоусмоктуючої мішалки.



Практична цінність роботи. Дослідження процесу перетікання рідини із ротора мішалки в порожнину лопаті та одержані результати випробувань можуть бути використані під час вирішення прикладних та фундаментальних проблем при конструюванні самоусмоктуючих мішалок.

## РОЗДІЛ 1. АНАЛІТИЧНИЙ ОГЛЯД ГАЗОРІДИННИХ АПАРАТІВ З МІШАЛКАМИ

### 1.1 Загальні положення та визначення

При вивченні процесів переносу в чистій рідині використовуються два різних підходи: феноменологічний і статистичний (молекулярно-кінетичний). Феноменологічний підхід базується на використанні рівнянь Ейлера, Нав'є-Стокса або Рейнольдса для турбулентних течій. Виділяють три основних наукових підходи для математичного опису гідродинаміки двофазних систем: динамічний, феноменологічний та статистичний. Динамічний метод (детермінований) заснований на законах механіки і пропонує математичний опис процесу у вигляді диференціальних рівнянь руху окремої ізольованої частинки. За отриманими закономірностями оцінюється поведінка сукупності рухомих частинок в потоці газу.

В основі феноменологічного підходу використовується схема суцільного середовища, тобто двофазний потік розглядається як суцільне, безперервно розподілене по простору середовище (континуум), яке характеризується фізичними властивостями реальної рідини.

Значний відсоток у випуску основного технологічного обладнання для нових технологічних процесів хімічної, нафтохімічної та інших галузей промисловості займають апарати з перемішувачами.

Більш ефективними пристроями для усмоктування та диспергування газу є турбінні мішалки відкритого та закритого типу, які обертаються в коаксіально розташованій трубі, що переходить в конусне кільце з радіально закріпленими статорними пластинами [12].

Турбінні мішалки [1-5] працюють за принципом відцентрового насоса, тобто всмоктують рідину в середину і за рахунок відцентрової сили викидають її до периферії. Напрямок потоку рідини в безпосередній близькості від мішалки чисто радіальне, але на деякій відстані від мішалки під впливом вихрового руху всього вмісту апарату змінюється, і рух стає складним, при

якому змішуються радіальні і тангенціальні потоки. Частота обертання турбінних мішалок змінюється від 400 до 2000 об/хв. Турбінні мішалки забезпечені лопатями і мають чітко обкреслений ротор. Вони розділяються на мішалки відкритого і закритого типів з нерухомим направляючим пристроєм (статором) або без нього. Діаметр турбінної мішалки приймають зазвичай рівним 0,25-0,33 діаметру апарату. Турбінні мішалки встановлюють на вертикальних валах, по центру апарату.

Турбінна мішалка розташовується біля дна апарату на відстані 0,25-0,35 її діаметру. При значній висоті об'ємного апарату на валу встановлюють дві або три мішалки. Відстань між ними приймається 0,5-2,0 діаметру мішалки, залежно від в'язкості рідини. Турбінні мішалки використовують також для проведення масообмінних процесів в системі газ-рідина, при цьому газовий реагент в зону реакції вводиться за допомогою барботерів різних конструкцій [6-8] або інших пристроїв [9]. Ці пристрої досить добре працюють в масообмінних процесах де проводиться насичення рідини повітрям, а у випадках проведення хімічних реакцій, у тому числі швидких екзотермічних - використання таких пристроїв недоцільне. Тому що перфорація барботерів може заростати продуктами реакції, що приводить до зменшення подачі газового реагенту, а потім до повної зупинки подачі газового реагенту в зону реакції. Для таких процесів використовують інші пристрої [10], до їх числа входять і турбінні мішалки, як правило закритого типу, які використовуються в якості самоусмоктуючих пристроїв [11-19] для проведення масообмінних процесів в системі газ-рідина.

А газорідинних процесах набули апарати з самоусмоктуючими мішалками, які дозволяють проводити багаторазову циркуляцію важкорозчинних газів із газової фази апарату шляхом забезпечення сильно розвинутої міжфазної поверхні. В цих апаратах рератор вииконує декілька функцій: усмоктує газ в реакційний об'єм, забезпечує його диспергування та забезпечує перемішування робочого середовища.

Крім закритих турбінних самоусмоктуючих мішалок заслуговують на увагу перемішуючі пристрої роторно-струменевого типу [23-25], які представляють собою ротор у вигляді перевернутого стакану, на утворюючій його поверхні розміщені порожнисті лопаті. Мішалка працює таким чином: під час обертання валу в порожнині мішалки та лопатей виникає відцентрова сила, за допомогою якої рідина, що знаходиться в середині мішалки витікає з порожнистих лопатей в перемішувемий об'єм. На її місце усмоктується рідина з нижньої частини апарату через отвір ротору мішалки, відтворюючи циркуляцію рідини, що перемішується. Ефект усмоктування відбувається за допомогою введення енергії перемішуючим пристроєм, а оцінку ефективності газорідинних апаратів призначених для проведення хімічних процесів автори [22-23] пропонують визначати по газовмісту, умовній витраті газу та питомій потужності.

Для процесів пов'язаних з проведенням екзо- та ендотермічних реакцій в промисловості використовуються спеціальні мішалки [13-19, 97-100], які поєднують основні властивості турбінних або пропелерних мішалок зі специфікою їх призначення. Вони виконують роль змішувачів різних хімічних реагентів та диспергують газовий реагент в реакційний об'єм. Ці мішалки досить часто називають спеціальними механічними пристроями. Вони використовуються лише для проведення певних технологічних процесів, але мають усі передумови для широкого розповсюдження.

Під час обертання мішалки створюється потік рідини, що має три складових швидкості. Дані по вимірюванню швидкостей показують, що середнє значення окружної (тангенціальної) швидкості приблизно на порядок перевищує середні значення радіальної та осьової (аксіальної) складових.

Велика конструктивна різноманітність перемішуючих пристроїв, в тому числі й самоусмоктуючих мішалок, що використовуються в апаратах об'ємного типу для проведення процесів ферментації, абсорбції та хемосорбції, окислення під час культивування мікроорганізмів на вибухонебезпечних газових сумішах свідчить про сучасний попит на подібне

технологічне обладнання для промисловості. Ефективність використання цих мішалок залежить в основному від продуктивності їх по газовій фазі, яка в свою чергу залежить від геометричних параметрів та частоти обертання. Вона є основним параметром при розрахунках та конструюванні газорідних апаратів. Підвищення продуктивності за рахунок збільшення цих показників приводить до збільшення витрат на перемішування. Насосна продуктивність по газовій фазі, яка усмоктується через порожнину мішалки, властива тільки для самоусмоктуючих мішалок.

Для процесів пов'язаних з проведенням ендотермічних реакцій в промисловості використовуються спеціальні мішалки [97-100], які поєднують основні властивості турбінних або пропелерних мішалок зі специфікою їх призначення. Ці мішалки досить часто називають спеціальними механічними пристроями. Вони використовуються лише для проведення певних технологічних процесів, але мають усі передумови для широкого розповсюдження. Вони виконують роль змішувачів різних хімічних реагентів та диспергують газовий реагент в реакційний об'єм.

Основною метою перемішувачих пристроїв є створення розвинутої міжфазної поверхні за рахунок інтенсивного дроблення бульбашок газового реагенту та рівномірного розподілу його по всьому перемішуваному об'єму.

## **1.2 Сучасний стан газорідних апаратів**

Інтенсивність перемішування в апаратах значною мірою залежить від наявності всередині апарату внутрішніх нерухомих устроїв та типу перемішувачих мішалок. Введення газового реагенту в зону реакції здійснюється за допомогою барботерів, встановлених під мішалкою [6-9]. Для запобігання забиванню перфорації барботерів отвори розташовуються на стороні труби, зверненої до центру і вниз. Як правило, сумарна площа отворів більша ніж площа поперечного перетину труби, що підводить

газовий реагент. Проте для багатьох хімічних процесів наявність барботерів приводить до забивання перфорації, а отже, до частих зупинок.

Недолік можуть усунути самоусмоктуючі мішалки. З літератури відомі мішалки, які при обертанні самостійно усмоктують газовий реагент або повітря, що знаходиться над рідиною і розподіляють його в перемішуючому середовищі, імітуючи рухомий барботер. У таких апаратах використовують порожнистий вал, сполучений з трубопроводами по яких підводиться газовий реагент.

Розділяють самоусмоктуючі мішалки залежно від форми поверхні і кутів конструктивних елементів мішалок, що створюють розрідження на чотири класи: циліндрові, виконані у вигляді циліндра з перфорованого листа різного профілю або з дротяної сітки; турбогазатори, виконані як робочі колеса турбін; призматичні, виконані у вигляді багатобічної плоскої призми, зігнуті або ламані; трубчасті, в яких лопаті мішалок виконані з труб.

Така класифікація не враховує усі особливості і складнощі відомих конструкцій самоусмоктуючих мішалок [22-48], форму усмоктуючих пристроїв, які часто не вписуються ні в одну із описаних груп тому що одночасно поєднують ознаки декілька таких груп.

Радіальний перебіг середовища утворює зону розрідження у торцевій частині лопаті, а тангенціальна течія утворює подібну зону за кормою лопаті.

Приведені літературні дані про продуктивність мішалок в основному приводять залежність продуктивності по газу від збільшення діаметру мішалки або до збільшення частоти обертання. Але підвищення продуктивності таким чином приводить до значного збільшення витрат на перемішування.

Точка переходу визначається градієнтом швидкості по нормалі до поверхні, який на межі дорівнює нулю, а швидкість рідини шару переходить в місцеву швидкість не обуреного потоку. У точці переходу прикордонного шару швидкість досягає максимуму, а градієнт тиску - нульового значення

або розрідження. У цій же точці (фактично області) прикордонний шар рідини переходить в турбулентний стан. Це приводить до того, що далі в потоці вже не існує прикордонного шару, а утворюється турбулентний слід із зонами зниженого тиску, де градієнт швидкості у ряді зон обертання навіть міняє свій знак. Ефективність усмоктування газу самоусмоктуючою мішалкою [50] пов'язують в основному з ежектуючою здатністю радіального потоку, який протікає уздовж лобової частини конструктивних елементів мішалки. При цьому ефективність конструкції самоусмоктуючої мішалки оцінюється, як і у попередньому випадку.

Висловлено також припущення про те, що переважаючою причиною усмоктуючого ефекту самоусмоктуючих мішалок є відцентровий перебіг газу в порожнистих каналах мішалки. Запропоновано додатково ежектувати рідину в порожністі канали лопатей самоусмоктуючої мішалки і, таким чином збільшуючи масу газо-рідинної суміші в цих каналах, підсилювати відцентровий перебіг газу.

Утворення зони розрідження за кормовою частиною тіла, яке обтікається рідиною, повітрям або газом, або, навпаки, рухомого тіла в такому ж середовищі є однотипним.

При обтіканні тіла на його поверхні утворюється прикордонний шар, який тягнеться від передньої кромки лобової частини тіла до деякої лінії відриву. Товщина прикордонного шару є величина достатньо умовна. Вона визначається градієнтом швидкості по нормалі до поверхні, який на межі дорівнює нулю, а швидкість рідини шару переходить в місцеву швидкість не обуреного потоку. Від передньої кромки тіла до точки переходу розташовується ламінарний шар рідини, уподовж якого відбувається збільшення швидкості і градієнт тиску уподовж цього потоку зменшується до нуля.

У точці переходу прикордонного шару швидкість досягає максимуму, а градієнт тиску - нульового значення або розрідження. У цій же точці прикордонний шар рідини переходить в турбулентний стан. Турбулентний

стан рідини розташовується від точки переходу до точки відриву. В області турбулентного шару швидкість також направлена уздовж потоку, але поступово сповільнюється, тому градієнт тиску міняє свій знак на протилежний. У точці відриву градієнт швидкості біля стінки стає рівним нулю, тут же і починається відрив прикордонного шару, який викликаний виникненням зворотних течій. Це приводить до того, що далі в потоці вже не існує прикордонного шару, а утворюється турбулентний слід із зонами зниженого тиску, де градієнт швидкості у ряді зон обертання навіть міняє свій знак.

У той же час при обертанні деяких типів мішалок під дією відцентрових сил, які діють на рідину, що знаходиться перед лобовою поверхнею лопатей, уподовж цієї поверхні розвивається радіальний перебіг перемішуючого середовища [65]. Режим обтікання лопаті мішалки в тангенціальному і радіальному напрямках не відрізняються. Радіальний перебіг середовища утворює зону розрідження у торцевій частині лопаті, а тангенціальна течія утворює подібну зону за кормою лопаті.

Структура зони розрідження, що утворюється при обтіканні тіла рідинним потоком, безумовно, складна і, ймовірно, є зоною з турбулентним рухом рідини, заповнену вихорами з зонами пониженого тиску [68]. Теоретична інтерпретація цього процесу, заснована на припущенні, що каверни утворюються тільки при падінні зовнішнього тиску до рівня тиску насиченої пари рідини, не зовсім вірна.

При обтіканні лопатей мішалки за її кормовою частиною утворюється зона розрідження, яку можливо розглядати, як сукупність каверн (порожнин), в які може входити усмоктуваний через порожнисті канали газ або повітря. При чималих швидкостях потоку із-за пониження тиску за тілом, яке обтікає рідина, виникає велика кількість бульбашок (каверн) кавітацій, які заповнюються після переміщення в область високого тиску. Вплив відцентрового поля в порожнистих каналах мішалки на рух газу в них представляється все ж таки незначним унаслідок малої щільності газу. При



введенні рідини в порожнистий канал, потенційна енергія відцентрового поля витрачається на приріст кінетичної енергії рідини.

Недостатньо ясне визначення механізму, що викликає усмоктування газу самоусмоктуючою мішалкою, накладає помітний відбиток і на підходи до розробки методів розрахунку їх насосної газової продуктивності.

Досліджуючи витрату газу через порожнисті лопаті трубних мішалок і витрати потужності на перемішування, автори встановили залежності критерію потужності від числа Рейнольдса і насосної газової продуктивності мішалки від числа Рейнольдса і питомої потужності перемішування. Узагальнюючи експериментальні результати досліджень самоусмоктуючих мішалок, виконаних у великому діапазоні геометричних розмірів і їх відносин при різній в'язкості рідини. В області турбулентного режиму, в якій і відбувається усмоктування газу самоусмоктуючою мішалкою (автомодельний режим), критерій Ейлера залежить від геометричних розмірів і деяких інших характеристик системи, але не залежить від числа Рейнольдса і критерію Фруда.

Методи розрахунку насосної газової продуктивності самоусмоктуючих мішалок полягають в тому, що на лабораторній моделі заздалегідь отримують експериментальні величини по газовій продуктивності, а потім параметри системи масштабують до необхідної величини насосної газової продуктивності промислового апарату.

Апарат з мішалкою забезпечений відбивними перегородками або іншими пристроями, що запобігають утворенню вирви рідини.

Під початковою частотою обертання мішалки розуміють ту частоту, при якій вирва газу досягає кромки середнього диска турбінної мішалки [78]. Ця характеристика, за їх даними, залежить від глибини занурення мішалки. Для розрахунку початкової частоти і насосної газової продуктивності самоусмоктуючої мішалки автори використовують в приведених залежностях емпіричні коефіцієнти. Усмоктування газу щільною самоусмоктуючою мішалкою знайшли графічні залежності насосної газової

продуктивності мішалки від її діаметру, частоти обертання і рівня рідини над мішалкою. Але підвищення продуктивності таким чином приводить до значного збільшення витрат на перемішування.

Визначення залежності початкової або мінімальної частоти обертання самоусмоктуючої мішалки [32,54-56] можна розглядати як перші спроби складання енергетичного балансу в площині вихідного отвору порожнистої лопаті.

Усмоктування газового реагенту через порожнисті лопаті самоусмоктуючої мішалки ґрунтується на механізмі утворення зони розрідження за лопаттю мішалки при обтіканні її перемішуючою рідиною. Запропонований простий метод здатний визначати коефіцієнт опору мішалки. Дослідження по визначенню локального газовмісту в кільцевому об'ємі, що знаходиться поблизу мішалки та визначена залежність локального газовмісту в кільцевому об'ємі, який ометається лопатями самоусмоктуючої мішалки і середній газовміст в апараті.

Використовуючи рівняння балансу енергії для режиму обтікання перемішуючою рідиною лопатей автор запроваджує рівняння для визначення величини розрідження за тильною поверхнею лопаті. Представлене рівняння по визначенню продуктивності самоусмоктуючої мішалки у безрозмірному вигляді.

З літературного огляду виходить, що розроблені і впроваджені в виробництво в хімічній, гідрометалургійній, біохімічній і інших технологіях самоусмоктуючі мішалки представляють собою різноманітні по конструкції пристрої.

### **1.3 Газовміст перемішуючого середовища в апараті з мішалками**

Інтенсивність процесів масообміну при перемішуванні мішалками в системах газ-рідина є характеристика поверхні контакту фаз, яка пропорційна кількості газових бульбашок в середовищі, що перемішується, і

середньому діаметру цих бульбашок. У загальному випадку, для апаратів з примусовим введенням газу, що диспергується у барботажному шарі звичайними мішалками. Основною характеристикою цієї двофазної системи є середній газовміст перемішуємого середовища, величина якого необхідна для розрахунків робочого об'єму апарату і витрат енергії на перемішування та розрахунків з визначення коефіцієнту масообміну.

Ця величина не являється постійною, вона залежить від засобу введення газової фази в перемішуваче середовище, інтенсивності перемішування, геометричних розмірів апарату, фізичних властивостей системи та витрати газового компоненту.

Інтенсифікація масообміну особливо необхідна в умовах, коли по технології необхідно поглинання важко розчинних газів, зазвичай з подальшою реакцією між розчиненим газом і речовинами, що знаходяться в рідині. Початок диспергування газу і збільшення газозмісту відповідає деякому мінімальному рівню інтенсивності перемішування, який залежить від витрати газу, розмірів апарату і властивостей фаз.

Інтенсивність перемішування в апараті трохи перевищує поріг диспергування, основна маса газу, що подається в апарат, диспергується у вигляді дрібних бульбашок і практично розподіляється у верхній частині перемішуємого об'єму апарату.

Самоусмоктуюча мішалка з циліндричними лопатями в об'ємному апараті відмічається умовний поділ перемішуємого об'єму на три зони. В зоні, що знаходиться під мішалкою газовміст практично відсутній, тому розрахунок реактора проводився по двухсекційній моделі. Введення газу через барботёр, розташований під мішалкою, при низькій інтенсивності перемішування диспергування газу практично не відбувається і спостерігається його підйом в центральній частині апарату у вигляді великих бульбашок. початок диспергирования газу та збільшення газу відповідає деякому мінімальному рівню інтенсивності перемішування, який залежить від витрати газу, розмірів апарату і властивостей фаз. Газовміст в об'ємі

апарата за умови механічного перемішування залежить від фізико-хімічних властивостей компонентів, гідродинаміки і геометричних параметрів.

Значення частоти обертання збільшується зі зростанням споживання газу та висоти розташування мішалки над днищем апарату. В умовах, коли інтенсивність перемішування в апараті незначно перевищує поріг диспергування, основна маса подається в апарат газу диспергується у вигляді дрібних бульбашок і розподіляється в частині обсягу апарату, розташованої вище площині розміщення мішалки, а область нижче мішалки не дисперується [12]. Оформлення процесів перемішування газорідних систем є установка в апаратах відбивних перегородок.

У апаратах [80] з відбивними перегородками в тих випадках, коли верхній край перегородок виступає над поверхнею перемішуваного середовища, відбувається мимовільне захоплення газу на поверхні середовища. При відносно невеликій інтенсивності перемішування перемішуваний об'єм аерується (газується) у верхній частині апарату, але при більшій інтенсивності перемішування розподілений на зони об'єм руйнується. Для апаратів характерно явище, яке має значний вплив на інтенсивність масообміну в системі газ-рідина: при частоті обертання вище деякого значення  $n$  відбувається мимовільний захват газу на поверхні переміни рідини.

У загальному випадку, для апаратів з примусовим введенням газу, що диспергується у барботажному шарі звичайними мішалками, дані параметри досліджувалися достатньо детально авторами [38,39].

Розрахункові залежності, які, при прийнятих розмірах діаметрів мішалки і апарату, відстані заглиблення мішалки від рівня рідини і дна апарату, і відомих в'язкості і поверхневому натягненні рідини, можна визначити частоту обертання мішалки, при якій починається диспергування газу.

При диспергуванні газу в перемішуваче середовище в апараті утворюється суміш газу з рідиною з середнім питомим газовмістом. Для

розрахунку середнього газовмісту запропоновані емпіричні кореляції, що ґрунтуються в основному на результатах лабораторних досліджень. Газовміст найчастіше представляють у вигляді функції середнього значення дисипації енергії при даній частоті обертання і діаметрі мішалки або питомої потужності і приведеної швидкості газу, а також враховується вплив фізико-хімічних властивостей фаз. Обчисленню впливу в'язкості рідини приділено місце в дослідженні.

Енергія на перемішування, багато в чому визначає величину поверхні контакту фаз, але вона не може бути єдиним критерієм при масштабуванні, оскільки зміна абсолютних і відносних розмірів мішалки і апарату надає істотний вплив на міжфазну поверхню, що досягається, при постійних витратах питомої потужності.

Зміна вмісту газу в перемішуваному середовищі істотно впливає на її щільність і в'язкість, що приводить до дещо складної залежності витрати газу від цих властивостей рідини [20].

Зміна вмісту газу в перемішуваному середовищі істотно впливає на її щільність і в'язкість, що приводить до дещо складної залежності витрати газу від цих властивостей рідини. Ці роботи практично вичерпують літературні дані, що стосуються поверхні контакту фаз, питомого газовмісту барботажного шару і розмірів бульбашок газу для апаратів з самоусмоктуючими мішалками.

Витрата газу жорстко пов'язана з характеристиками мішалки, апарату і перемішуваного середовища, слід чекати більш простого зв'язку питомого газовмісту, середнього діаметру бульбашок, питомій поверхні контакту фаз від витрати газу, чим для звичайних мішалок з подачею газу в апарат через нерухомий барботер. З порівняння різних даних для апаратів з самоусмоктуючими мішалками, враховуючи також загальні дані для інших газорідних апаратів з перемішуючими пристроями, витікає, що середній питомий газовміст є функцією швидкості усмоктуємого газу, діаметру мішалки, діаметру апарату та фізико-хімічних властивостей рідини.

При початку виходу газу з каналів мішалки умови його диспергування в барботажному шарі вже забезпечені, тим самим режим роботи самоусмоктуючих мішалок захлинання відсутній.

#### **1.4 Потужність, споживана при перемішуванні. Ефективність перемішування**

Ефективність пристроями, характеризує якість проведення процесу перемішування і може бути виражена по-різному в залежності від мети перемішування.

Інтенсивність перемішування - час, за яке досягається заданий результат (ступінь однорідності, вирівнювання температур по всьому об'єму і т. П.), Тобто чим вище інтенсивність перемішування, тим менше часу потрібно для досягнення заданого ефекту.

При високих швидкостях обертання мішалок перемішувана рідина втягується в круговий рух і навколо вала утворюється воронка, глибина якої збільшується зі зростанням числа оборотів і зменшенням щільності і в'язкості середовища. Для запобігання утворенню воронки в апараті поміщають відбивні перегородки, які, крім того, сприяють виникненню вихорів і збільшенню турбулентності системи.

Процес перемішування механічними мішалками зводиться до зовнішньої задачі гідродинаміки - обтіканню тел потоком рідини.

При повільному русі у в'язкому середовищі тіла будь-якої форми в тонкому шарі рідини, що примикає до його поверхні, утворюється ламінарний прикордонний шар, форма і товщина якого залежать від форми і розмірів тіла, швидкості і фізичних властивостей рідини.

При збільшенні швидкості руху відбувається відрив прикордонного шару від поверхні тіла в точках, де швидкість рідини є найбільшою, наприклад у крайок вертикальної пластини, і освіту турбулентного

кормового сліду за тілом, що рухається. Початок відриву прикордонного шару характеризується різким зростанням опору середовища руху тіла.

Окружна швидкість має найбільше значення на периферії мішалки, так як ця величина пропорційна діаметру мішалки. У периферії мішалки утворюється зона зниженого тиску, куди спрямовується рідина, що знаходиться в апараті. Ця течія, а також радіальні потоки, що виникають під дією відцентрових сил при обертальному русі мішалки, призводять до інтенсивного перемішування вмісту апарату.

Завдання зовнішнього обтікання тіл в умовах перемішування може бути вирішена за допомогою рівнянь Нав'є-Стокса і нерозривності потоку. Точне аналітичне рішення зазначеного завдання вельми складно і можливо лише для окремих випадків. Тому для вирішення цього завдання використовують теорію подібності.

Потужність, споживана мішалками при перемішуванні, залежить від розмірів мішалки і апарату, розміру і числа відбивних перегородок, фізичних властивостей перемілю середовища, швидкості мішалки.

Зв'язок між потужністю (енергією, що витрачається в одиницю часу) і умовами перемішування виражають [1,3,72,85,86] у формі залежностей

$$N = k_N \rho n^3 d^5 \quad (1.1)$$

де:  $k_N$  - критерій потужності;

$\rho$  - щільність перемішуемого середовища,

$n$  - частота обертання мішалки, об/с;

$d_M$  - діаметр мішалки, м.

Коефіцієнт  $k_N$  є змінною величиною. На критерій потужності впливають також розташовані на внутрішній стороні обичайки апарату відбійні перегородки, призначені для призупинення частоти обертання перемішуемого середовища.

Введення газу в апарат і отримання у ньому газорідинної суміші призводить до зниження потужності, споживаної на перемішування, унаслідок зменшення щільності перемішуючого середовища в зоні лопатей мішалки [91].

$$\frac{N_G}{N} = f\left(\frac{V_G}{nd^3}\right), \quad (1.2)$$

де  $N_G, N$  - потужність перемішувального газорідинного середовища і чистої рідини, відповідно, кВт.

Для радіально-лопатевих мішалок, використовуваних в перемішуванні рідких середовищ в якості критерію ефективності перемішування [96].

$$\Theta = \frac{N V_{ж}}{Q Q}, \quad (1.3)$$

де  $N$  – потужність, кВт;

$Q$  – об'ємна витрата відкиданої лопатями мішалки рідини, м<sup>3</sup>/с;

$V_{ж}$  – перемішуваний об'єм рідини, м<sup>3</sup>.

Експериментальні дані рекомендуються для процесів перемішування малов'язких рідин, які дозволяють використовувати найпростіші конструкції мішалок. Проте, цей критерій ефективності мало придатний для оцінки ефективності механічних пристроїв при перемішуванні в системі рідина-газ.

Під час визначення конструкції апарату об'ємного типу для проведення газорідинних реакцій виникає необхідність оцінки ефективності або оптимальності перемішуючих пристроїв за допомогою критерію ефективності або оптимальності..



## 1.5 Теорія роботи самоусмоктуючої мішалки

Найбільш ефективними пристроями для диспергування газу в рідині є відкриті турбінні мішалки з прямими і зігнутими лопатями з подачею газу безпосередньо під мішалку з одиночного сопла або барботера. Пропускна спроможність апаратів по газу обмежується режимом захлинання.

Структура перебігу перемішуваного середовища в апараті - це результат тангенціальною, радіальною і аксіальною складових трьох векторів швидкостей частинок рідини. У ряді випадків, в яких істотну роль грає особливість конструкції апарату і перемішуючого пристрою, перевага однієї складової швидкості дає підставу не враховувати інші дві складові швидкості або навпаки. Реактори зі швидкохідними перемішуючими пристроями широко застосовуються в хімічній, нафтохімічній і суміжних галузях промисловості для проведення газорідних реакцій. Обтікання рідиною лопатей швидкохідних мішалок супроводжується утворенням за їх тильною стороною вихрової зони, яка ініціює циркуляційний рух перемішуваного середовища в апараті.

Схема руху рідини в апаратах зі швидкохідними перемішуючими пристроями є несталою тривимірною турбулентною течією з вихровою структурою.

Барботери, які використовують для подачі в реакційний об'єм деяких газових реагентів, схильні до заростання продуктами реакції, що приводить до повної подачі газового реагенту в зону реакції. Коли в реакторі відбувається взаємодія між газом і рідиною використовують пристрої для подачі газу у вигляді барботерів різної конструкції.

Дослідження гідродинаміки в апаратах пов'язані в основному з питаннями передачі механічної енергії від мішалок до рідини, а також гідродинаміки і газомісту. Самоусмоктуючі мішалки дозволяють проводити попередні інженерні розрахунки перемішуючих пристроїв для систем газ-рідина.

Гідродинаміка в апаратах з самоусмоктуючими перемішувачами різних конструкцій мішалок дозволить збільшити продуктивність самоусмоктуючих мішалок за рахунок зменшення гідродинамічних витрат транзитного потоку під час руху усередині мішалки. Гідродинаміка транзитного потоку усередині самоусмоктуючих мішалок має на своїй меті визначення коефіцієнта витрати при закінченні транзитного потоку через самоусмоктуючий перемішувач, визначення залежності коефіцієнта витрати від конструктивних особливостей вхідного отвору, визначення насосної продуктивності мішалок і розробка нових конструкцій самоусмоктуючих мішалок, розробка гідродинамічного розрахунку таких мішалок.

Перепад тиску, розглядаючи обертання мішалки в апараті, як рух лопаті із швидкістю  $v_r$  в рідині, яка має швидкість  $v_{ж}$ .

$$\Delta p = \psi \frac{\rho(\Delta v)^2}{2}, \quad (1.5)$$

де  $\Delta v = v_r - v_{ж}$ ,  $\psi$  – коефіцієнт опору мішалки.

Швидкість рідини біля мішалки, яка обертається буде мати вид [75]:

$$\Delta p = 0,5\xi\pi^2 d^2 n^2 \rho \geq \rho gh. \quad (1.6)$$

При обертанні валу самоусмоктуючої мішалки в апараті виникає перепад тиску [88]:

$$\Delta p = 0,5\pi^2 n^2 d^2 \rho(1 - \varphi_0)\xi, \quad (1.7)$$

де  $n$  - частота обертання валу мішалки;

$d$  - діаметр самоусмоктуючої мішалки;

$\rho$  - щільність рідини;

$\varphi_0$  - газоміст в зоні лопаті мішалки;

$\xi$  - коефіцієнт опору лопатей мішалки.

Швидкість витікання транзитного потоку [103]

$$v = \frac{1}{\sqrt{\alpha + \xi}} \sqrt{\frac{2\Delta p}{\rho}}. \quad (1.8)$$

Продуктивність самоусмоктуючої мішалки по газу в режимі самоусмоктування з урахуванням формули (1.7)

$$V_p = \mu S_o \sqrt{\frac{2\Delta p}{\rho}} = \mu S_o \sqrt{\pi^2 n^2 d^2 \xi (1 - \varphi_0)}. \quad (1.9)$$

Продуктивність самоусмоктуючої мішалки залежить від її діаметру, частоти обертання мішалки, коефіцієнта опору лопатей мішалки, площі перетину порожнистих лопатей і коефіцієнта витрати  $\mu$ .

Розрідження, що виникає в порожнині ротора і лопаті мішалки забезпечує підсос повітря самоусмоктуючою мішалкою, якщо воно перевищує суму гідростатичного тиску стовпа рідини над мішалкою  $\Delta p_{rc} = \rho g h$  і опір, який долає усмоктуваний потік (транзитний потік)

рухаючись усередині мішалки  $\Delta p_1 = \zeta \frac{v^2}{2g}$ .

## РОЗДІЛ 2. МЕТОДИКА РОЗРАХУНКУ АПАРАТІВ З САМОУСМОКТУЮЧИМИ ПЕРЕМІШУЮЧИМИ ПРИСТРОЯМИ

### 2.1 Алгоритм розрахунку апаратів з самоусмоктуючими перемішуючими пристроями

Механічне перемішування відзначається ефективністю та різноманітністю технологічного використання. Барботування характеризується простотою реалізації та порівняно невисокою енергоємністю процесу. При імпульсних способах перемішування, хоча і дещо підвищується енергоємність процесу, але значно скорочується його тривалість.

Тип технологічного обладнання визначається не тільки способом реалізації процесу, але і фізико-механічними властивостями продукції, що перемішується.

Рух рідини в апараті з мішалкою можна розглядати як нестационарний рух рідини по каналу, що має складну геометричну форму.

Нестационарний рух рідини по каналах в умовах, коли впливом сили тяжіння можна нехтувати, характеризується залежністю:

$$Eu = f(Re, Ho), \quad (2.1)$$

де  $Re = \frac{\omega_{сер} d \cdot \rho}{\mu}$  - критерій Рейнольдса;

$Ho = \frac{\omega_{сер}}{n \cdot d}$  - критерій гомохромності;

$Eu = \frac{\Delta P}{\rho \cdot \omega_{сер}}$  - критерій Ейлера.

Різницю тисків  $\Delta P$  в критерії Еи можна замінити на підставі наступних міркувань. Якщо рідина під дією мішалки циркулює по якомусь контуру, то потужність мішалки визначається як потужність насоса з співвідношень:

$$N = V_{сек} \cdot \Delta P \quad (2.2)$$

де  $V_{сек}$  – насосна продуктивність мішалки в м<sup>3</sup> /с;  $\Delta P$  - напір, що розвивається мішалкою, в Па.

Звідси

$$\Delta P = \frac{N}{V_{сек}} \quad (2.3)$$

Якщо кутова швидкість перемішуваного середовища висока, глибина лійки стає зіставною з глибиною установки мішалки або навіть перевищує її. За великого радіусу поверхні лійки на рівні розташування мішалки в рідину занурені тільки кінці лопатей. Це рівноцінно зменшенню площ лопатей і призводить до зменшення крутного моменту, прикладеного до рідини. Одночасно спостерігається захоплення повітря в рідину, його диспергування і утворення газорідинної суміші в зоні, безпосередньо ометуваної лопатями. Отже, локальна густина середовища, що оточує лопаті, опиняється нижчою за середню її густину в апараті, що також викликає зменшення крутного моменту.

Найбільш популярним видом апаратів є вертикальні циліндричні апарати.

Діаметр апарату з відношення висоти апарату до його діаметру можна визначити за формулою:

$$D = H = \sqrt[3]{\frac{V}{\pi}} \cdot \quad (2.4)$$

Якщо, відношення висоти апарату до діаметру не дорівнює 1, тобто  $H/D=m$  тоді

$$D = H = \sqrt[3]{\frac{V}{\pi \cdot m}} \quad (2.5)$$

Діаметр самоусмоктуючої мішалки  $d_M$  дорівнює:

$$d_M = 1/3 \div 1/4 D_a. \quad (2.5)$$

Ширина лопаті

$$B = 1/5 \div 1/8 d_M, \quad (2.6)$$

розташування мішалки від днища

$$h = d_M \quad (2.7)$$

Енергетичний стан процесу усмоктування записують:

$$\Delta P_L \approx \Delta P_{ГС} + \Delta P_G. \quad (2.8)$$

де  $\Delta P_L$  - перепад тиску за рахунок обтікання лопаті потоком рідини, Па;

$\Delta P_{ГС}$  - гідростатичний тиск на рівні лопаті, Па;

$\Delta P_G$  - гідравлічний опір валу і мішалки, Па.

Перепад тиску в середині мішалки і порожнистої лопаті:

$$\Delta P_L = 0,5 \pi^2 n^2 d_M^2 \rho_B \xi_0. \quad (2.9)$$

Швидкість транзитного потоку, що рухається в порожнистій лопаті під впливом перепаду тиску:

$$w = \sqrt{\frac{2 \Delta P_P}{\rho_{II}}}, \quad (2.10)$$

Теоретична насосна продуктивність по газовій фазі самоусмоктуючої мішалки  $V_G$ , м<sup>3</sup>/с, складає

$$V_G \approx \lambda S_0 \sqrt{\frac{2\Delta P_P}{\rho_{II}}} \approx \lambda S_0 z \pi d_M \sqrt{(n^2 - n_0^2) \xi_0} \quad (2.11)$$

де  $S_0$  - площа отвору порожнистої лопаті мішалки, м<sup>2</sup>;

$z$  - число лопатей мішалки.

Насосна продуктивність самоусмоктуючої мішалки:

по газовій фазі

$$\frac{V_G}{n d_M^3} = 0.03 \cdot \sin \alpha^{1.5} \cdot \left(\frac{a}{b}\right)^{0.5} \cdot \left(\frac{h}{d_M}\right)^{-0.9} \quad (2.12)$$

і рідині

$$\frac{V_P}{n d_M^3} = 0.0033 \cdot \left(\frac{a}{b}\right) \quad (2.13)$$

Середній газовміст перемішуючого середовища в апараті з самоусмоктуючою мішалкою

$$\bar{\varphi} = 0.21(n - n_0)^{1.8} \cdot d^{1.5} \left(\frac{b}{d_M}\right)^{0.1} \cdot \left(\frac{H}{D_A}\right)^{0.6} \quad (2.14)$$

Дана методика дозволяє провести гідродинамічні розрахунки апаратів для проведення екзотермічних газорідинних реакцій.

## **2.2 Висновки та рекомендації щодо розрахунку апаратів об'ємного типу з самоусмоктуючими перемішувачами**

Газорідні апарати з самоусмоктуючими мішалками володіють рядом переваг порівняно зі звичайними барботажними апаратами: забезпечують внутрішню рециркуляцію газу в герметичних апаратах, більший газовміст перемішуваної суміші при рівних умовах перемішування та більший коефіцієнт масовіддачі. Все це свідчить про актуальність досліджень в цій області.

Дослідження методів підвищення продуктивності та ефективності апаратів з самоусмоктуючими мішалками та їх реалізація в багатьох технологічних процесах хімічної технології дають підставу вважати, що вивченню гідродинаміки і фізичної суті процесів, що протікають, приділяється ще недостатньо уваги. Вирішення проблеми технічного вдосконалення апаратів в хімічній промисловості може йти шляхом розробки апаратів великої одиничної потужності або інтенсифікації процесів хімічної технології та створення принципово нового високоефективного устаткування.

Підвищення ефективності технологічних апаратів, по можливості, повинне досягатися за рахунок засобів, які значно підвищують ефективність гідродинаміки цих апаратів. Специфічним гідродинамічним параметром апаратів з самоусмоктуючими мішалками є об'ємна насосна продуктивність по газу в режимі самоусмоктування. Підвищення насосної продуктивності самоусмоктуючих мішалок є метою даної роботи.

Для досягнення поставленої мети необхідно провести експериментальні і теоретичні дослідження, зокрема:

- провести випробування самоусмоктуючих мішалок та виявити і обґрунтувати механізм процесу усмоктування газу або повітря мішалками;
- розробити нові підходи в конструюванні самоусмоктуючих мішалок, які підвищують ефективність роботи мішалок в режимі самоусмоктування;



- провести випробування нових конструкцій самоусмоктуючих мішалок та виявити і знайти детермінований зв'язок між насосною газовою продуктивністю мішалки та гідродинамікою руху газової фази.

Вибір конструкції і принципу дії певного апарата завжди відбувається шляхом аналізу умов і властивостей певного технологічного процесу, що при проектуванні задаються наперед.

Умови і властивості технологічного процесу можна характеризувати системою таких найважливіших факторів:

- агрегатний стан і консистенція середовища;
- температура і тиск;
- тепловий ефект і потужність теплообміну;
- хімічні і фізико-хімічні властивості середовища;
- періодичність чи неперервність технологічного процесу.

## РОЗДІЛ 3. ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНА ЧАСТИНА

### 3.1 Опис експериментального стенду та об'ємного апарату з самоусмоктуючими мішалками

Гідродинаміку в апараті об'ємного типу з самоусмоктуючою мішалкою досліджували на експериментальному стенді, схема і загальний вид апарату зображені на рисунках 3.1 та 3.2. Лабораторна модель об'ємного апарату (рисунок 3.2) представляє собою вертикальний циліндричний посуд 1, виконаний з органічного скла, з плоскими днищем 2 та кришкою 3.

Дослідна модель самоусмоктуючої мішалки 4 (рисунок 3.3) закріплюється на полуму валу 5, який приводиться до обертання за допомогою електродвигуна постійної напруги. Вал 5 представляє собою складну конструкцію, яка складається з однорідної верхньої частини валу, до якої приварена трубка. Швидкість обертання мішалки контролювали за допомогою електронного числового тахометру. Кількість транзитного газу (усмоктуючого повітря мішалкою) вимірювалась газовим годинником типу ГСБ-400. З метою попередження появи вирви під час обертання мішалки, в апараті встановлено три перегородки 7 шириною 0,1 діаметра апарату. На кришці 3 апарату укріплена розподільча камера 13, яка складається з циліндричної оболонки з штуцером для подачі повітря 15. По осі кришки апарату на розподільчому пристрої змонтований підшипниковий вузол 12, в якому обертається вал 5, установлений по осі апарату. Швидкість обертання валу змінювали від 3,0 до 25,0 об/с і контролювали за допомогою електронночислового тахометру типу ТЦ-3М.

Розподільча камера 13 ізолювана від зовнішнього середовища і апарату за допомогою гумових манжетів 6. В зоні розподільчої камери 13 вал 5, його трубна частина має отвори 14 для проникнення повітря. Такий монтаж валу дає можливість проводити перекачування повітря в режимі самоусмоктування та проводити контроль його залежно від числа обертання

валу 5. Дослідну модель самоусмоктуючої мішалки 4 (рисунок 3.3) закріплюють на торці трубки валу 5. Апарат заповнювали водою на певну висоту, яку контролювали за допомогою міліметрової шкали.

Під час обертання самоусмоктуючої мішалки 4 повітря, що знаходиться в приміщенні лабораторії проходить через газовий лічильник 7 (рисунок 3.1), патрубок 15 (рисунок 3.2) і потрапляє в розподільчий пристрій 13 (рисунок 3.2), далі через отвори 14 поступає в трубчасту частину валу 5 і порожнину ротора самоусмоктуючої мішалки 4. Під дією відцентрових сил і розрідження, що виникає при обтіканні лопаті мішалки повітря із порожнини ротора потрапляє в порожнисті лопаті, з яких диспергує у вигляді бульбашок в перемішуваний об'єм.

Для контролю рівня рідини в апараті (рисунок 3.2) в неперервному режимі існує труба перетоку 17, закріплена в днищі апарату, а при періодичному режимі випробування апарату на поверхні обичайки розміщена міліметрівка, за допомогою якої контролюється рівень рідини в апараті та рівень газорідинного шару. Міліметрівка дозволяє проводити дослідження газовмісту в перемішуючому об'єму. В процесі експерименту визначалася висота поверхні газорідинної суміші над рівнем мішалки без обертання і при різних числах оборотів. В результаті диспергування газової фази в перемішуючий об'єм відбувається збільшення об'єму газорідинної суміші в апараті.

Апарат може працювати в неперервному режимі по рідині. Витрату води під час випробування різних самоусмоктуючих мішалок контролювали за допомогою ротаметра РС-5.

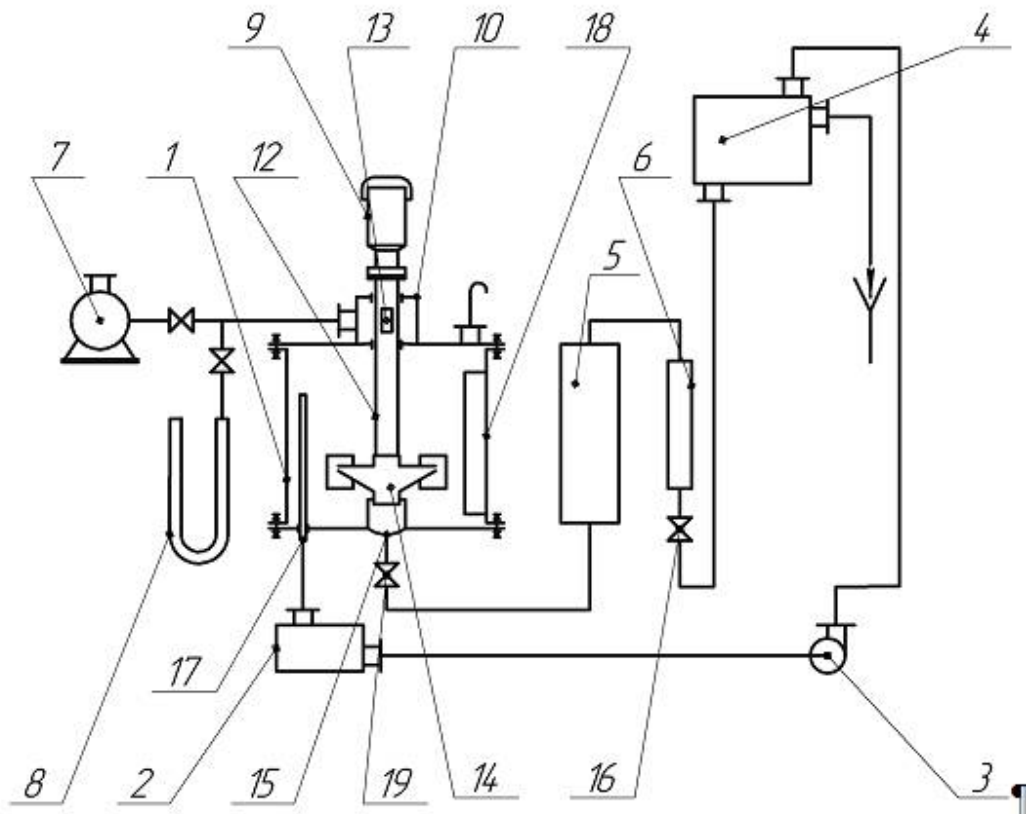


Рисунок 3.1 – Схема експериментального станда для проведення гідродинамічних випробувань в апараті об'ємного типу з самоусмоктуючими ежекційними мішалками: 1-апарат, 2-резервуар для зібрання рідини, 3-відцентровий насос, 4-напірний бак, 5-порівнювальна ємність, 6-ротаметр, 7-газовий годинник, 8-диференційний манометр, 9-електродвигун, 10-циліндричний стакан, 11-строботакхометр, 12-порожнистий вал, 13-отвори у порожнистому валу, 14-мішалка, 15-патрубок, 16-регулюючий вентиль, 17-переливна трубка, 18-відбивна перегородка, 19-вентиль.

Модель об'ємного апарату (рисунок 3.2) представляє собою вертикальний циліндричний посуд виконаний з органічного скла, з плоскими днищем та кришкою .

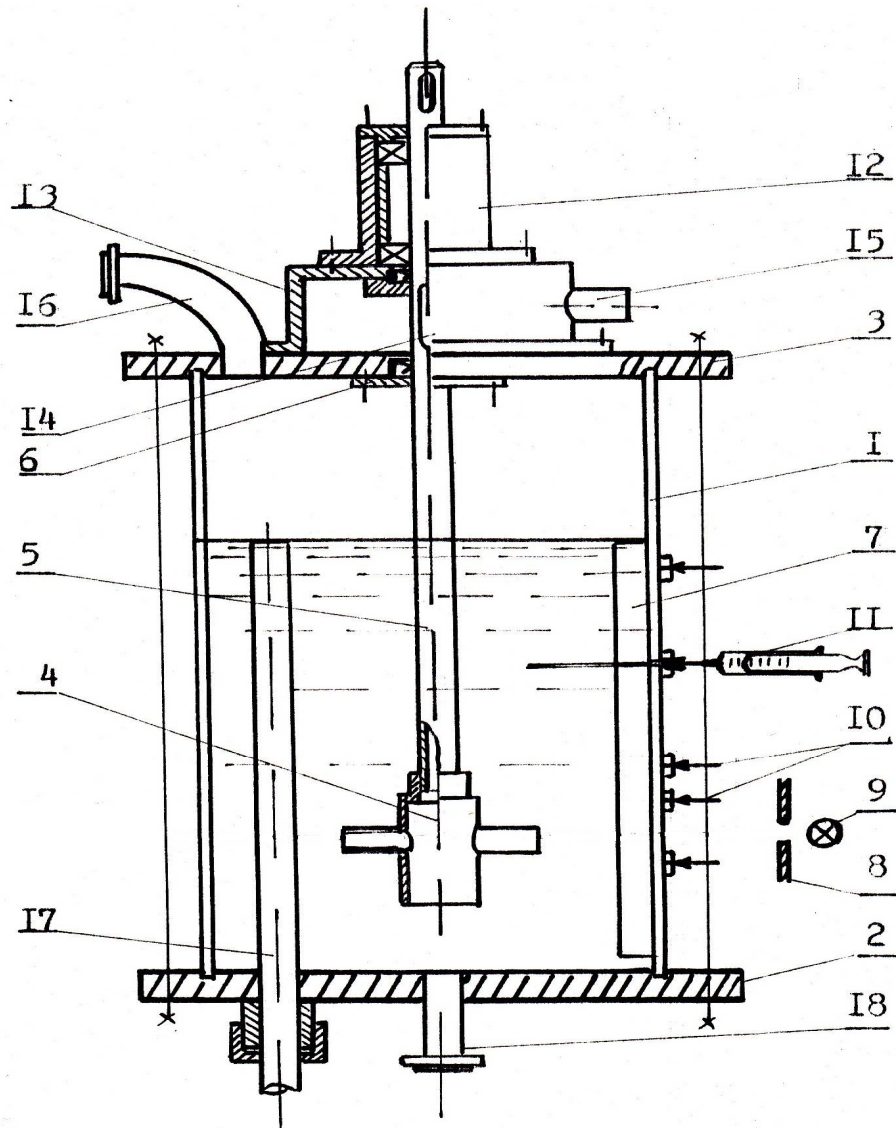


Рисунок 3.2 – Лабораторна модель об'ємного апарату з самоусмоктуючими мішалками:

1 – вертикальний циліндричний посуд; 2 – днище; 3 – кришка; 4 – самоусмоктуюча мішалка; 5 – полий вал; 6 – ущільнення; 7 – відбивна перегородка; 8 – екран; 9 – джерело світла; 10 – точки відбору проб; 11 – шприц медичний з голкою-зондом; 12 – підшипниковий вузол; 13 – розподільча камера; 14 – вхідний отвір в полий вал; 15,16 – вхідний та вихідний патрубків для газу або повітря; 17 – переливна труба; 18 – вхідний патрубок для рідини або води.

Таблиця 3.1 - Діапазон вимірювання параметрів експериментальної установки

Параметри	Діапазон вимірювання
Відбійні перегородки шириною $0,1D$ , м	3
Рівень заповнення апарату рідиною, $H$ , м	0,35 – 0,50
Діаметр самоусмоктуючих мішалок, $d_M$ , м	0,063; 0,08; 0,10; 0,126; 0,13; 0,18
Діаметр циліндричної лопаті, $d_0$ , м	0,008 – 0,016
Висота плоскої лопаті мішалки, $h$ , м	0,02
Ширина плоскої лопаті мішалки, $a$ , м	0,004 – 0,008
Число лопатей мішалки, $z$ , шт.	2; 3; 6
Кут скосу вхідної кромки в порожнисту лопать, град.	$45^\circ$
Висота розташування мішалок від днища апарату, м	0,08 - 0,15
Внутрішній діаметр статору, м	$1,1 d_M$
Зовнішній діаметр статору, м	$1,35 d_M$
Швидкість обертання мішалки, об/с	3 - 30

### 3.1.1 Опис самоусмоктуючої мішалки

Самоусмоктуюча мішалка, яка взята за базову модель, що випробується (рисунок 3.3) представляє собою циліндричний ротор 1, з осьовими вхідними каналами 2 і 3, на яких закріплені радіальні полі лопаті 4 з вихідними отворами 5. Самоусмоктуюча мішалка під'єднується до полого валу в апараті за допомогою маточини.

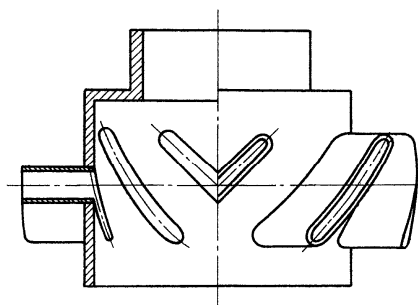


Рисунок 3.3 – Самоусмоктуюча мішалка

Мішалка працює таким чином. Самоусмоктуюча мішалка в об'ємному апараті закріплюється на торці порожнистого валу за допомогою маточини. При обертанні вала мішалки в порожнині ротора 1 утворюється розрідження, за допомогою якого через верхній канал в маточині мішалки усмоктується повітря або газовий реагент із порожнистого валу. Далі під дією відцентрових сил і розрідження, що виникає за кормовою частиною лопаті газова фаза диспергується в перемішуємий об'єм апарату.

Самоусмоктуюча мішалка в об'ємному апараті закріплюється на торці порожнистого валу за допомогою маточини. При обертанні вала мішалки в порожнині ротора утворюється розрідження, за допомогою якого через верхній канал в маточині мішалки усмоктується повітря або газовий реагент із порожнистого валу. Далі під дією відцентрових сил і розрідження, що виникає за кормовою частиною лопаті газова фаза диспергується в перемішуємий об'єм апарату.

### **3.2 Методика дослідження продуктивності самоусмоктуючої мішалки з кутом скосу вхідної кромки 45°**

Ємкість апарату заповнювали водою на певну висоту, яку регулювали за допомогою переливної труби. Включали електродвигун і поступово збільшували частоту обертання мішалки. При обертанні самоусмоктуючої

мішалки за рахунок гідродинамічних особливостей обтікання лопаті перемішуваною рідиною в порожнині ротора мішалки і порожнистих лопаток створюється розрідження, за рахунок якого засмоктується повітря. При випробуваннях досліджували вплив геометричних параметрів різних конструкцій мішалок на продуктивність по газовій фазі і газовміст в апараті. Діапазон вимірювань параметрів установки і самоусмоктуючих мішалок представлений в таблиці 3.1.

Початок підсосу повітря відзначали візуально по початку розповсюдження бульбашок газу в перемішуваному об'ємі. У цей момент часу визначали частоту обертання мішалки  $n_0$ . Далі поступово збільшували частоту обертання мішалки і визначали продуктивність самоусмоктуючої мішалки по газовій фазі за показниками газового годинника. В період випробування проводили 5-7 замірів збільшення висоти  $\Delta H$  газорідинної суміші по відношенню до поверхні рідини  $H$ , яке називається середнім газовмістом  $\bar{\varphi}$ .

$$\bar{\varphi} = \frac{\Delta H}{\Delta H - H_p} \quad (3.1)$$

Відхилення частоти обертання від середнього значення складало не більше 5%. Отримані дані по продуктивності газової фази і середнього газовмісту занесені в таблицю 3.3 та приведені у вигляді графічних залежностей рисунок 3.4 і 3.5.

На рисунку 3.4 приведені дані продуктивності по газовій фазі самоусмоктуючих мішалок діаметром 0,065; 0,126; 0,168 та 0,180м з циліндричними лопатями. Моделі самоусмоктуючих мішалок випробовувались в апараті діаметром 0,24м з трьома відбивними перегородками на глибині занурення 0,12-0,37м.

Аналіз одержаних даних показує, що продуктивність самоусмоктуючих мішалок залежить від числа обертів, діаметра і кількості



лопатею самоусмоктуючої мішалки. Спочатку із збільшенням частоти обертання мішалки від 0 до 3 об/с продуктивність самоусмоктуючої мішалки по газовій фазі не спостерігалась, далі із зростанням частоти обертання мішалки до 5 об/с в перемішуємому об'ємі з'являлися окремі бульбашки повітря і продуктивність зростала повільно. При збільшенні частоти обертання мішалки з 5 до 12,5 об/с продуктивність по газовій фазі зростає швидко і майже з лінійною залежністю. Збільшення діаметра мішалки від 0,065 до 0,18м приводить до суттєвого зростання продуктивності газового потоку в режимі самоусмоктування.

В той же час, збільшення глибини занурення мішалки в апараті приводить до зменшення продуктивності по газовій фазі. Під час випробувань мішалок було підмічено, що з появою повітряних бульбашок в перемішуючому просторі висота перемішуємого об'єму в апараті збільшується. Це відбувається за рахунок рівномірного розподілу бульбашок повітря в переміщуваній рідині - газозмісту.

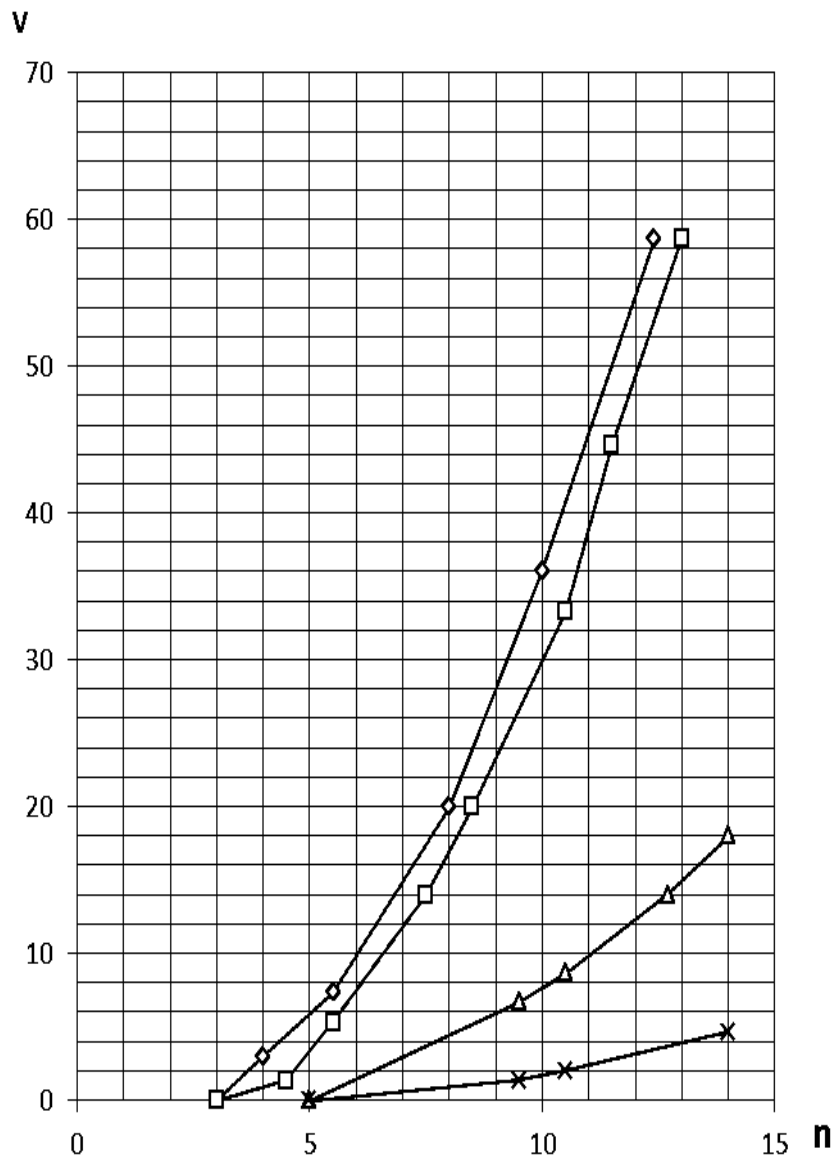


Рисунок 3.4 – Залежність продуктивності самоусмоктуючої мішалки по газовій фазі від швидкості обертання мішалки при постійній глибині занурення:

Діаметр самоусмоктуючих мішалок:  $\diamond$  -  $d = 0,180$  м;  $\square$  -  $d = 0,168$  м;

$\Delta$  -  $d = 0,126$  м;  $\times$  -  $d = 0,065$  м.

Продуктивність самоусмоктуючих мішалок залежить від ступеню розрідження (надлишкового тиску), яке виникає при обертанні мішалки в рідині апарату.

На рисунку 3.5 показана залежність надлишкового тиску в середині самоусмоктуючої мішалки діаметром 0,16м з двома циліндричними лопатями. Надлишковий тиск, що виникає в середині самоусмоктуючої мішалки приводить до того, що повітря із розподільчого пристрою через порожнистий вал засмоктується в перемішуємий об'єм. Поступове збільшення частоти обертання самоусмоктуючої мішалки приводить до збільшення розрідження (надлишкового тиску) в середині мішалки, яке перевищує величину гідростатичного тиску стовпа рідини в апараті і втрат при перетіканні повітря в каналах мішалки. В період проведення випробувань під час появи перших бульбашок в перемішуємому об'ємі фіксували частоту обертання мішалки. Далі усмоктуюче повітря під дією гідродинамічних сил, що виникають в результаті дії мішалки, розподіляється у вигляді бульбашок в перемішуємій рідині, це приводить до збільшення висоти газорідного середовища в апараті.

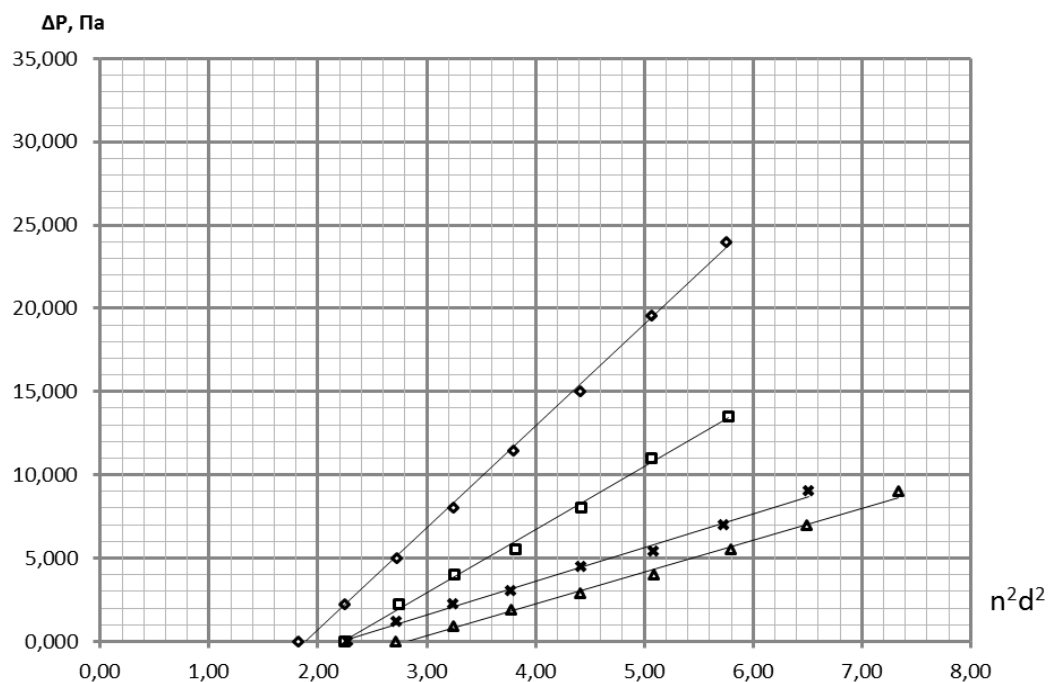


Рисунок 3.5 – Залежність надлишкового тиску в полості самоусмоктуючої мішалки від комплексу  $n^2d^2$ :

Глибина занурення самоусмоктуючої мішалки діаметром  $d=0,18$  м:

◇ -  $h=0,10$  м;    □ -  $h=0,15$  м;    х -  $h=0,20$  м;    Δ -  $h=0,25$  м.

Дослідження з вивчення гідродинаміки проводили по 3-5 раз і отримані результати по визначенню продуктивності мішалки від частоти обертання та діаметру мішалки, середнього та локального газовмісту, а також величини початкової частоти обертання мішалки у вигляді середньозважених величин заносили в таблиці.

Аналіз отриманих експериментальних даних показує, що на продуктивність самоусмоктуючих мішалок найбільш активно впливає діаметр і частота обертання мішалки та її глибина занурення.

Були проведені порівняльні випробування самоусмоктуючих мішалок з різною конфігурацією входної кромки в порожнисті плоскі лопаті.

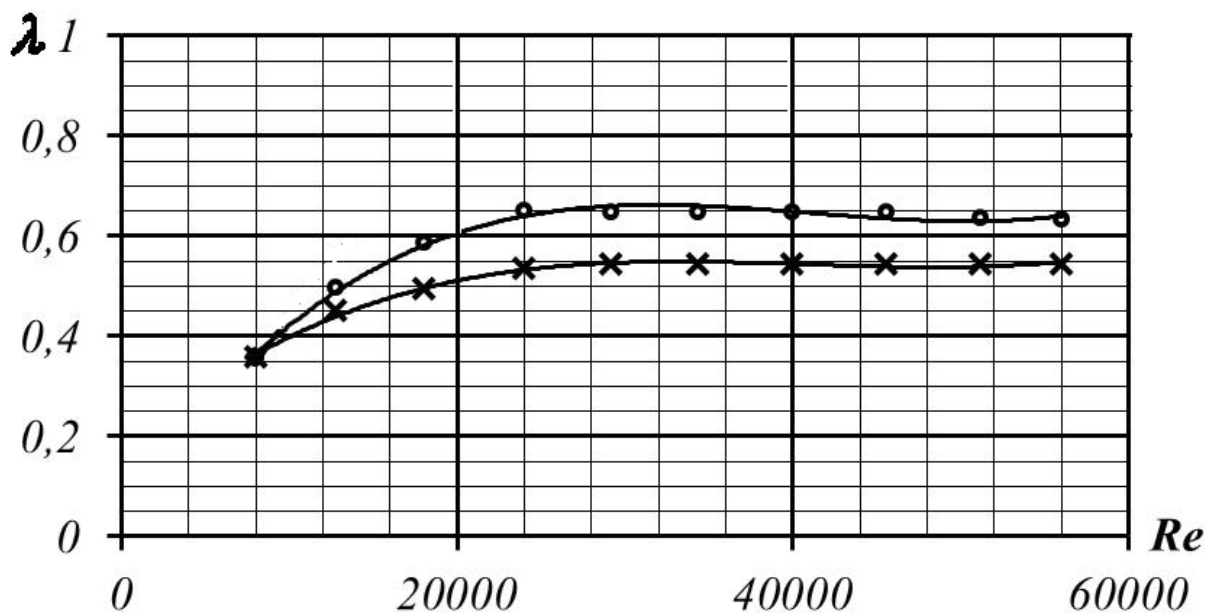


Рисунок 3.6 – Графік залежності коефіцієнта витрати вертикальної щілини з різним кутом скосу однієї кромки від числа Рейнольдса:

o –вхідна кромка виконана під кутом  $45^{\circ}$ ; X - пряма вхідна кромка

Як видно з графічних залежностей величина кута скосу однієї вертикальної кромки щілини впливає на величину коефіцієнта витрати рідини за рахунок збільшення поперечного перетину струменя в порожнистій лопаті. Під час руху транзитного потоку з порожнини ротору через щілину в

порожнину лопаті з боку скошеної кромки утворюється безвідривний режим перетікання, тобто відбувається неповне стиснення витікаючого струменя рідини унаслідок зменшення місцевого коефіцієнту опору, це приводить до збільшення коефіцієнту витрати і підвищення продуктивності транзитної рідини.

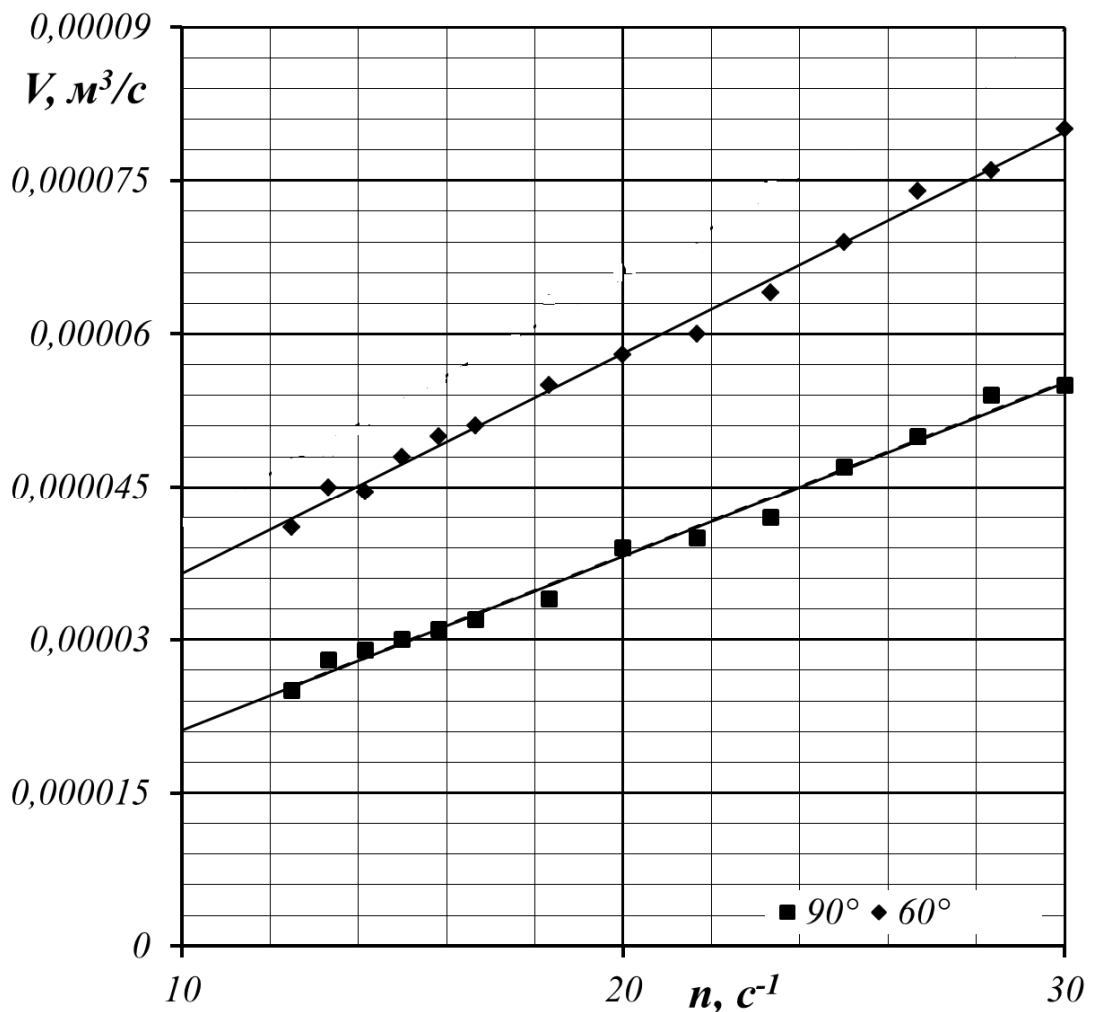


Рисунок 3.7 – Залежність насосної продуктивності самоусмоктуючої мішалки  $d = 0,1$  м по рідині від частоти обертання при різних кутах скосу  $\alpha$  вхідної кромки в порожнисту лопать: ■ –  $\alpha=45^\circ$ ; ◆ –  $\alpha=90^\circ$ .

Отримані експериментальні дані з насосної продуктивності по рідині були порівняні з насосною продуктивністю по рідині геометрично подібних мішалок з прямими вхідними кромками.

Проведені випробування таких самоусмоктуючих мішалок і отримані результати показують, що зміна кута скосу вхідної кромки порожнистих

лопатеї з -  $90^0$  на кут  $45^0$  впливає на продуктивність самоусмоктуючої мішалки по газовій фазі.

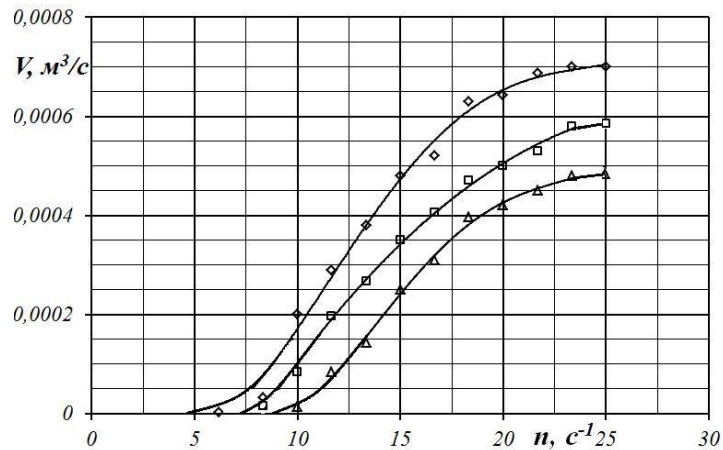


Рисунок 3.8 – Залежність насосної продуктивності самоусмоктуючої ежекційної мішалки  $d_m=0,1 \text{ м}$  при глибині занурення  $0,24 \text{ м}$  по газовій фазі від кута нахилу порожнистої лопаті:  $\diamond$   $\alpha=45^0$ ;  $\square$  –  $\alpha=60^0$ ;  $\Delta$  –  $\alpha=90^0$ .

### 3.2.1 Методика визначення середнього газовмісту в апараті з самоусмоктуючими мішалками

Ефективність хімічних перетворень в системах газ-рідина залежить не тільки від швидкості реакції, а й від гідродинамічного стану в апараті. Основною характеристикою двофазних систем в апаратах з механічними мішалками є газовміст. Її величина необхідна для визначення об'єму апарату, розрахунку потужності і масообміну.

Висоту зростання поверхні газорідинного середовища визначали за допомогою трьох лінійок, розміщених по колу апарату під кутом  $120^0$ . В період випробувань проводили по три заміри приросту газорідинного шару по відношенню до висоти заповнення при певних числах обертання мішалки, відхилення швидкості якої не перевищувало 5%. Далі визначали середньоарифметичне значення  $\bar{\varphi}$ .

Отримані експериментальні дані показують, що при постійних фізико-хімічних властивостях рідини середній газовміст  $\bar{\varphi}$  в апараті зростає із збільшенням числа обертів та діаметру мішалки і зменшується із збільшенням глибини занурення мішалки (рисунок 3.9).

Локальний газовміст  $\varphi_0$  визначали в різних точках апарату через отвори в циліндричній обичайці апарату за допомогою медичного шприцу 11 (рисунок 3.2) об'ємом  $20 \text{ см}^3$ , сполученого з зондом. Зонд представляє собою трубку діаметром  $2,5 \text{ мм}$  з внутрішнім діаметром  $1,8 \text{ мм}$ . Відбір проб в кількості 5-7 проб з локального газовмісту проводили при встановленій частоті обертання мішалки та постійній продуктивності по газу. Попередні випробування по визначенню швидкості відбору проби за допомогою шприца показали, що середнє значення локального газовмісту в середині шприца не відрізняється не більше ніж на 3%. Локальний газовміст  $\varphi_0$  визначали по формулі

$$\varphi_0 = \frac{100 - V_p^{\text{III}}}{100}, \quad (3.2)$$

де  $V_p^{\text{III}}$  - об'єм рідини в середині шприца,  $\text{см}^3$ .

Аналіз проведених випробувань показав, що навіть при високих числах обертання мішалки, в вертикальному перетині апарату спостерігається три зони, які відрізняються між собою різним газовмістом:

- кільцевий об'єм, утворений лопатями мішалки. В цій зоні локальний газовміст  $\varphi_0$  значно перевищує середній газовміст  $\bar{\varphi}$  в апараті;
- зона розміщена в нижній частині апарату, тут спостерігається найвищий газовміст;

- зона розташована над мішалкою, вона має найкращий розподіл бульбашок повітря в перемішуємому об'ємі. На практиці в цій зоні газовміст досить близько співпадає з середнім газовмістом  $\bar{\varphi}$ .

Також було відмічено, що величина середнього газовмісту впливає на величину насосної продуктивності, а також на величину надлишкового тиску в середині самоусмоктуючої мішалки. Про це свідчить зниження пропорційності зростання насосної продуктивності по газовій фазі при збільшенні числа обертання мішалки в межах 15-20об/с.

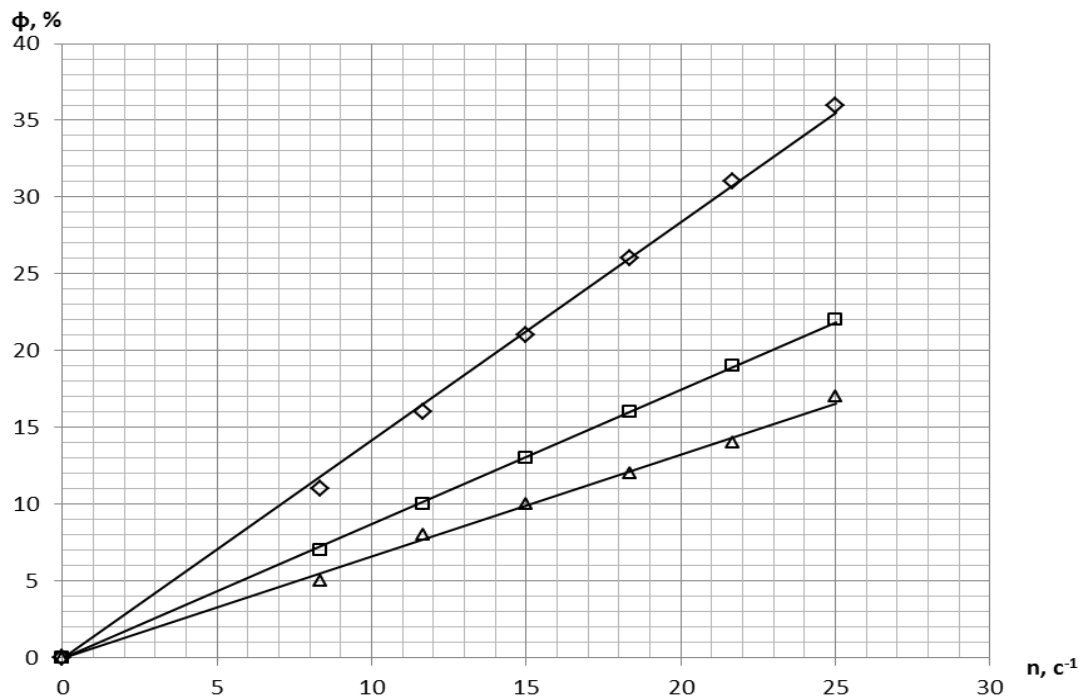


Рисунок 3.9 – Залежність середнього газовмісту  $\bar{\varphi}$  в апараті з самоусмоктуючою мішалкою від числа обертів при різних глибинах занурення:

◇ - глибина занурення мішалки 120мм; □ - глибина занурення мішалки 180мм; Δ - глибина занурення мішалки 240мм

Отримані висновки, що між локальним газовмістом  $\varphi_0$  в кільцевому об'ємі, який утворюється лопатями мішалки, і середнім газовмістом  $\bar{\varphi}$  існує залежність, описана рівнянням



$$\varphi_0 = 1,2\varphi^{-0,6} \quad (3.3)$$

Ця залежність справедлива для самоусмоктуючих мішалок і може використовуватися під час підрахунків продуктивності та виборі частоти обертання мішалок.

### **3.3 Опис експериментальної установки для вивчення гідродинаміки витікання рідини та дослідних лабораторних пристроїв**

Гідродинаміка витікання рідини та визначення коефіцієнту витрати  $\mu$  були виготовлені лабораторні моделі пристроїв (рисунок 3.10 і 3.11), в яких транзитний потік води витікає з отвору в боковій поверхні в повітряний простір під певним тиском.

Лабораторна модель пристрою представляє собою прозору трубку, діаметр якої дорівнює діаметру ротору лабораторної моделі самоусмоктуючої мішалки. На утворюючій поверхні циліндричних трубок товщиною 4мм були просвердлені циліндричні отвори діаметром 4, 6, 8, 10мм. Також були виготовлені лабораторні моделі пристроїв, які були копією лабораторних самоусмоктуючих мішалок. В них на утворюючій стороні трубок розташовували прямокутні вертикальні щілини з геометричними параметрами, рівними внутрішнім розмірам самоусмоктуючої мішалки. Така конструкція моделей пристрою дозволяє провести досліди по визначенню швидкості перетікання рідини із порожнини трубки через отвори в боковій поверхні. Під час експериментів рідину в моделі пристроїв подавали з наростаючою потужністю, яку регулювали по показникам об'ємного ротаметру РС-5. Величину тиску в середині трубки визначали по показникам висоти рідини в пьезометричній трубці, приєднаній через штуцер до верхньої кришки пристрою.

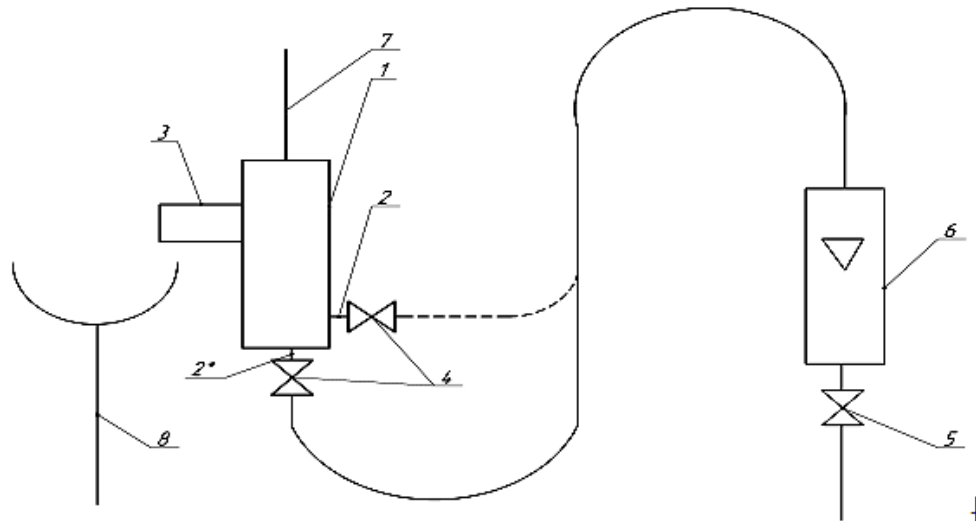


Рисунок 3.10 – Схема експериментальної установки для проведення дослідження гідродинаміки витікання рідини через насадок, який є копією лопаті мішалки:

1-порожнистий пристрій у вигляді циліндричної трубки; 2-штуцер для подачі рідини в дослідній моделі; 3-насадок (імітатор лопаті мішалки); 4,5-вентиль; 6-ротаметр; 7-п'єзометр; 8-каналізаційний трубопровід

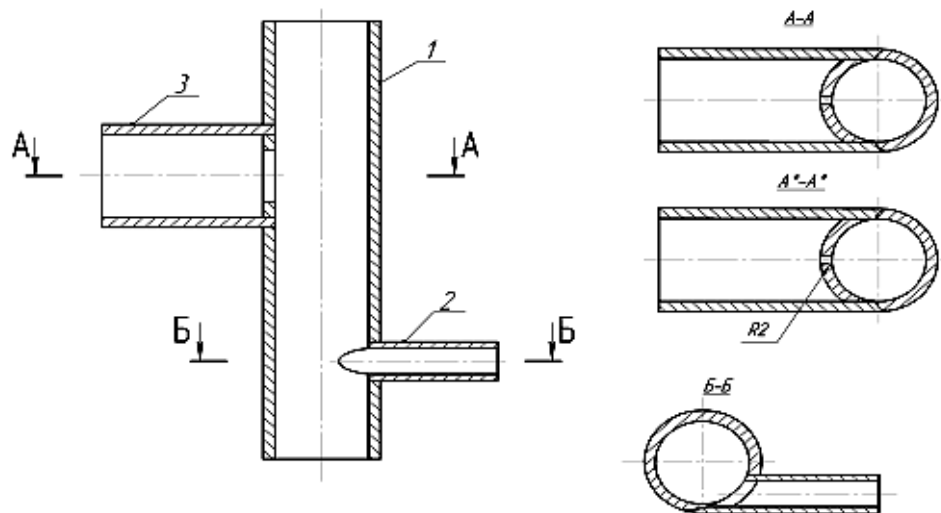


Рисунок 3.11 – Модель пристрою, для вивчення процесу витікання рідини із отвору в боковій поверхні трубки:

1 - порожниста циліндрична трубка; 2 - штуцер для подачі рідини; 3 - трубка для попередження розбризкування витікаючої рідини

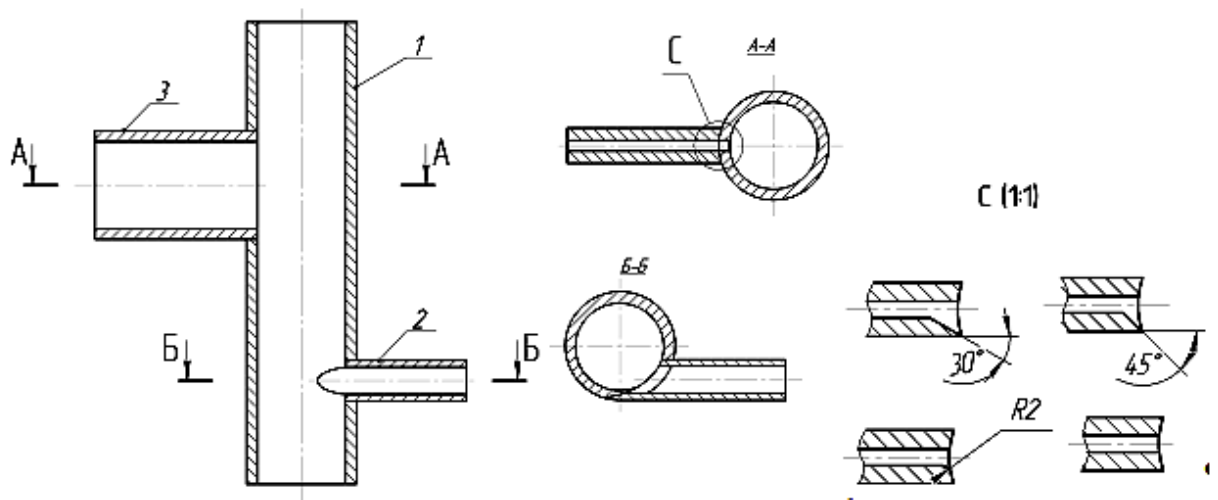


Рисунок 3.11 – Модель пристрою, для вивчення процесу витікання рідини із вертикального щілинного насадку на боковій поверхні трубки:

1 - порожниста циліндрична трубка; 2 - штуцер для подачі рідини; 3 – насадок, копія лопаті лабораторної моделі мішалки.

Умови витікання рідини у цих пристроях незалежно від форми отворів однакові: рідина із порожнини трубки наближається до отвору із усього прилеглого об'єму, рухаючись з прискоренням по різних плавних траєкторіях. Струмінь рідини відривається від внутрішньої стінки біля кромки отвору і далі стискається в перетині. Стиснення струменю обумовлене дією фізичних законів, що діють при зміні напрямку руху рідини.

Лабораторні моделі пристрої були поділені на два типи: перший тип моделей мав циліндричні або прямокутні отвори (рисунок 3.11), другий – на утворюючій поверхні мав вертикальні прямокутні щілини з розміром, рівним перетину лопаті в лабораторній моделі самоусмоктуючої мішалки (рисунок 3.11). Їх для випробувань вмонтовували в експериментальну установку (рисунок 3.9), де проводилися дослідження за визначенням коефіцієнта

витрати через циліндричні або вертикальний щілинний отвір та щілинний насадок. Експериментальна установка дозволяє проводити дослідження при різних числах Рейнольдса.

### 3.4 Випробування витратних характеристик при витіканні рідини із вертикального прямокутного насадка

Проведені випробування на лабораторних пристроях товщиною 1 мм з отворами діаметром 3, 4, 5, 6, 8 мм. Під час випробувань проводили записи показників надлишкового тиску та витрати води на лабораторний пристрій. Для аналізу отриманих результатів брали середнє значення з 3-5 випробувань. Воду на лабораторні пристрої подавали через осьовий патрубок. Отримані результати (рисунок 2.10).

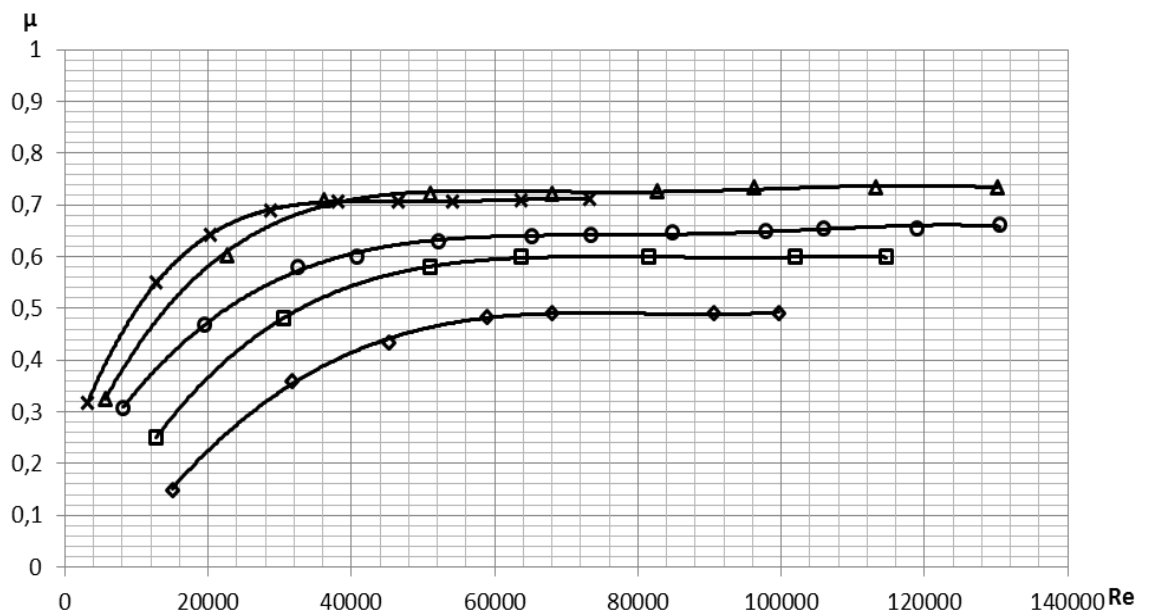


Рисунок 3.12 – Залежність коефіцієнта витрати при витіканні через стінку товщиною 1 мм з циліндричним отвором від числа Рейнольдса:

◇ – діаметр отвору 3 мм;      □ – діаметр отвору 4 мм;      ○ – діаметр отвору 5 мм;      Δ – діаметр отвору 6 мм;      х – діаметр отвору 8 мм

До того ж, товщина трубки, в якій просвердлений отвір суттєво впливає на коефіцієнт витрати. Випробування проводилися в широкому діапазоні чисел Рейнольдса від 2000 до 140000. Для пристроїв з отворами в боковій стінці товщина стінки білу отвору складала 1 мм.

Із збільшенням числа Рейнольдса спостерігається поступовий ріст коефіцієнту витрати для усіх діаметрів отворів, а після  $Re > 40000$  величина коефіцієнту витрати приймала постійне значення, яке коливалося від 0,5 для отвору діаметром 3 мм до 0,7 для круглого отвору діаметром 8 мм в діапазоні величин  $Re > 40000 - 120000$ . Також проведені випробування на пристроях з отворами в боковій стінці товщиною 4 мм. Отримані результати показують, що товщина стінки для малих отворів (діаметром 3 і 4 мм), які не перевищують товщину стінки впливає на коефіцієнт витрати більше ніж для отворів діаметром від 5 до 10 мм.

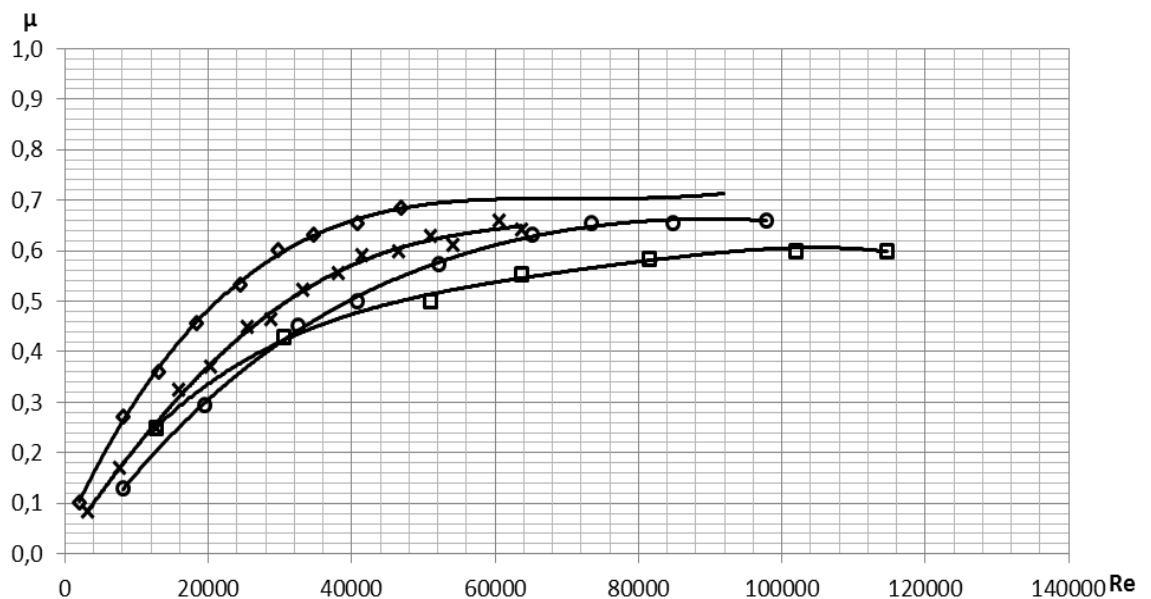


Рисунок 3.13 – Залежність коефіцієнта витрати через стінку товщиною 4 мм з циліндричним отвором від числа Рейнольдса:

□ – діаметр отвору 4 мм;    ○ – діаметр отвору 5 мм;    х – діаметр отвору 8 мм;    ◇ – діаметр отвору 10 мм

Для круглих отворів з шириною стінки в 4 мм коефіцієнт витрати знаходиться в межах  $\mu = 0,62-0,64$ . Ці дані дають змогу зробити висновки, що під час витікання із круглого отвору рідина в товстій стінці стискається до певного діаметру і коефіцієнт витрати  $\mu$  в даному випадку залежить від типу отвору, коефіцієнту стискування  $\varepsilon$  та швидкості  $\varphi$ .

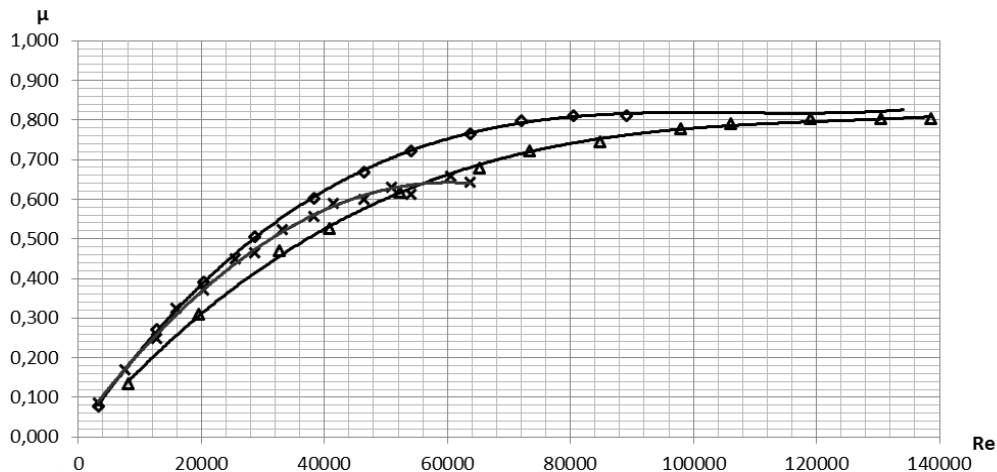


Рисунок 3.14 – Залежність коефіцієнта витрати через стінку товщиною 4 мм з циліндричним отвором від числа Рейнольдса:

Δ – діаметр отвору 5 мм;     ◊ – діаметр отвору 8 мм, кромка отвору виконана з кутом скосу 45°;     x – діаметр отвору 8 мм, пряма кромка.

Із графічних залежностей виходить, що коефіцієнт витрати  $\mu$  для круглих отворів в боковій стінці товщиною 4 мм змінюється поступово без різких коливань в той же час в діапазоні  $Re > 50000-90000$  коефіцієнт витрати зростає поступово, і при  $Re > 100000$  для отворів діаметром 0,005-0,010 м можна рахувати постійною величиною. При витіканні рідини вплив в'язкості на коефіцієнт витрати відбувається тільки при ламінарному режимі, а при турбулентному режимі - незначний, особливо при  $Re > 30000$  становить  $\mu = 0,62-0,64$ . Прості розрахунки для рідини, що витікає з циліндричного отвору приймають наступні значення:  $\mu = 0,64$ ;  $\varphi = 0,97$ ;  $\varepsilon = 0,64$ .

Для отворів з зміненою конфігурацією кромки вхідного отвору ці показники мають інші значення: для отвору діаметром 5мм -  $\mu=0,8$ ;  $\varphi=0,97$ ;  $\varepsilon=0,83$ , а для отвору діаметром 8мм -  $\mu=0,7$ ;  $\varphi=0,97$ ;  $\varepsilon=0,73$ .

На лабораторному стенді проводили випробування щілинних насадок з метою визначення залежності витрати води від надлишкового тиску (рисунок 3.15). Для цього було виготовлено чотири типи різних моделей щілинних насадок, які відрізняються тільки по конфігурації однієї вхідної кромки щілинних отворів: вхідна вертикальна кромка має скіс під кутом  $\theta$ , рівний  $90^{\circ}$ ,  $60^{\circ}$ ,  $45^{\circ}$  або округлена, а решта кромки прямі.

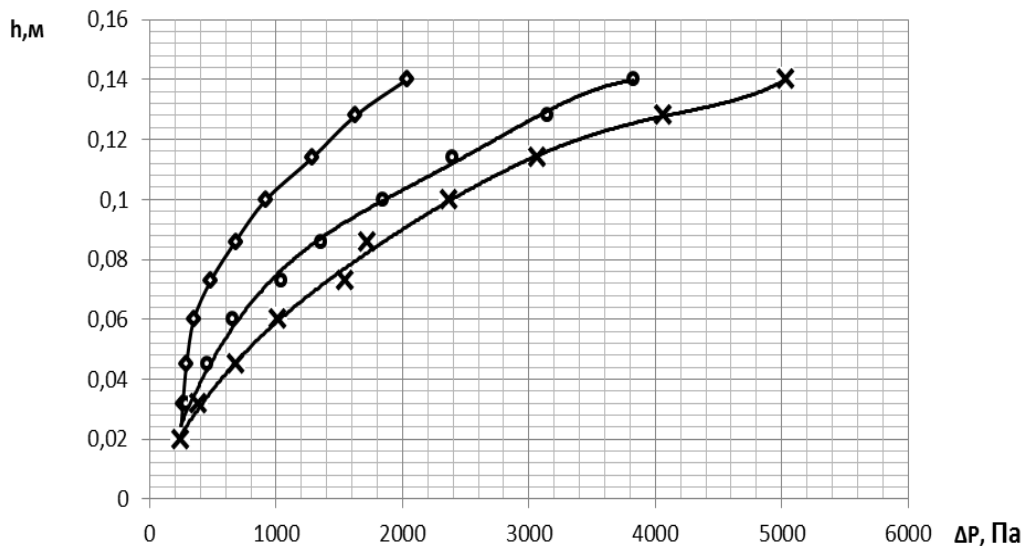


Рисунок 3.15 – Характеристика витікання рідини через вертикальний щілинний отвір при осьовій подачі рідини:

◇ - кут скосу однієї кромки  $45^{\circ}$ , а інші під прямим кутом; ○ - кут скосу однієї кромки  $60^{\circ}$ , а інші під прямим кутом; x - кут скосу кромки щілини  $90^{\circ}$ .

Кожне випробування проводили 3-4 рази, визначали середнє значення п'езометричного тиску та кількість рідини, яка постачається на установку. Результати випробувань заносилися в таблиці і представлені у вигляді графічних залежностей (рисунок 3.15). Також були проведені порівняльні випробування. Основним насадком, з яким проводилися порівняння

результатів випробувань лабораторних пристроїв з різними конфігураціями вхідних кромки, є насадок з прямими кромками при вході.

Отримані дані під час випробувань зведені в таблиці 3.2 і представлені у вигляді графічної залежності (рисунок 3.16)

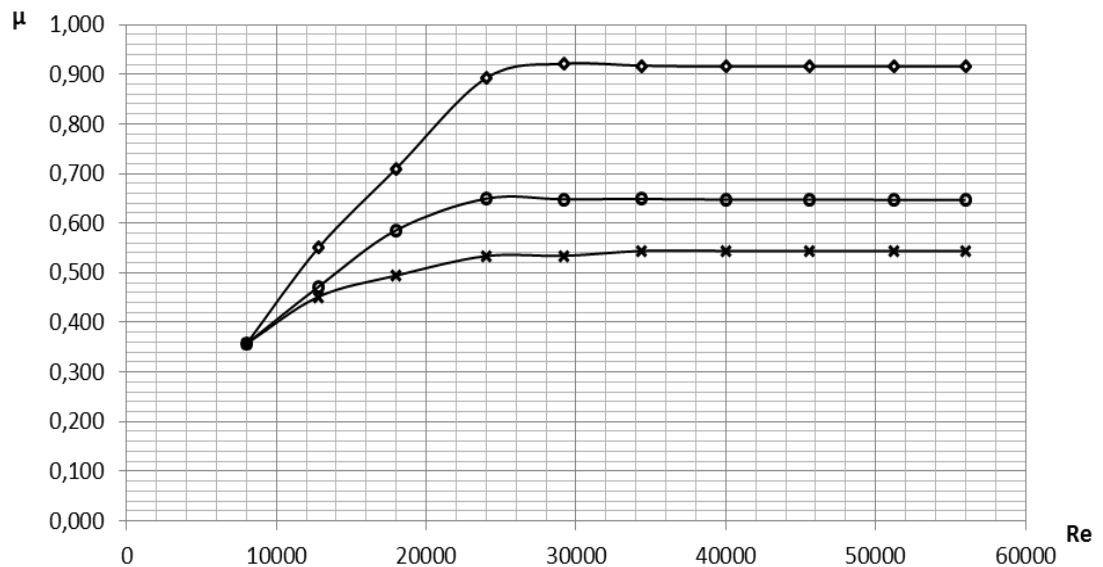


Рисунок 3.16 – Графік залежності коефіцієнта витрати вертикальної щілини з різною конфігурацією від числа Рейнольдса:

◇ - кут скосу однієї кромки  $45^{\circ}$ , а інші під прямим кутом; ○ - кут скосу однієї кромки  $60^{\circ}$ , а інші під прямим кутом; х - кут скосу кромки щілини  $90^{\circ}$ .

Як видно з графічних залежностей кут скосу однієї вертикальної кромки щілини впливає на величину витрати рідини за рахунок збільшення поперечного перетину струменя з однієї сторони. З боку скошеної кромки утворюється безвідливний режим закінчення рідини, відбувається неповне стиснення витікаючого струменя, що приводить до збільшення коефіцієнта стиснення, а, отже, до збільшення коефіцієнта витрати. Це приводить до того, що при менших величинах п'єзометричного тиску в трубці лабораторного пристрою, досягається більша продуктивність транзитної рідини.



Отримані дані по коефіцієнту витрати для щілинних насадок зі скошеною кромкою показують, що значення коефіцієнту витрати в залежності від кута скосу при  $Re > 30000$  можна визначати по емпіричній залежності

$$\mu = 0,957 \cdot \cos^2 \alpha - 0,986 \cdot \cos \alpha + 0,5, \quad (3.4)$$

де  $\theta$  - кут скосу вхідної кромки вертикальної прямокутної щілини.

Для насадка з кутом скосу вхідної кромки, рівним  $45^\circ$  коефіцієнт витрати дорівнює 0,9. Отримані результати дають можливість зробити зміни в конструкції самоусмоктуючих мішалок.

### **3.5 Обговорення результатів дослідження. Гідродинамічні характеристики процесу витікання рідини з циліндричного отвору або циліндричного насадка**

В обговоренні отриманих лабораторних випробувань самоусмоктуючих мішалок була вибрана досить проста мішалка з порожнистими циліндричними лопатями. Самоусмоктуюча мішалка діаметром 0,10 м з двома циліндричними лопатями випробувалася в апараті діаметром 0,25 м. Глибина занурення мішалки в циліндричному апараті діаметром 0,25 м збільшувалась від 0,10 до 0,25 м.

Продуктивність самоусмоктуючих мішалок по газу при відомій площі перетину порожнистих циліндричних лопатей, їх кількості і відомій швидкості руху газу в лопаті, можна визначити по формулі

$$Q = v_{\phi} f \cdot z, \quad (3.5)$$

або

$$Q = \mu \cdot f \sqrt{\frac{2\Delta p}{\rho}} \quad (3.6)$$

де  $v_\phi$  - швидкість руху газового потоку, що віднесена до усього перетину полої лопаті;

$f$  - площа перетину полої лопаті;

$z$  - кількість лопатей самоусмоктуючої мішалки.

Під час витікання рідини виникають втрати в самому отворі, які можливо розглядати, як місцеві втрати, що визначаються формулою

Вейсбаха  $h = \zeta \frac{v^2}{2g}$ . Втрати транзитного потоку в порожнині ротора мішалки

відбувається в наслідок тертя молекул рідини та утворення пограничного шару на поверхні струменя рідини, який утворилася в перетині отвору.

Частинки рідини в перетині отвору рухаються не по паралельних траєкторіях, які обумовлені інерцією і таким чином приводять до зменшення

перетину струменя після виходу рідини з циліндричного отвору. Це явище характеризується коефіцієнтом стиснення  $\varepsilon$  рідини, який вираховується, як

відношення площі перетину струмені  $f_c$  до площі перетину отвору  $f$

$$\varepsilon = \frac{f_c}{f}. \quad (3.7)$$

Кількість транзитного потоку  $Q$ , який протікає по каналах та отворах самоусмоктуючої мішалки обчислюється

$$Q = v_c \cdot f_c = \varepsilon \cdot \phi \cdot f \sqrt{2 \cdot g \cdot H}, \quad (3.8)$$

де  $f$  - площа перетину порожнистих лопатей самоусмоктуючої мішалки,

або

$$Q = \mu \cdot f \sqrt{2 \cdot g \cdot H} , \quad (3.9)$$

де  $\mu$  - коефіцієнт витрати, який дорівнює  $\mu = \varepsilon \cdot \varphi$ .

Вирахувати коефіцієнт витрати потоку  $\mu$  аналогічно методики, при якій вираховували коефіцієнт витрати під час витікання рідини із резервуара через бокову насадку

$$\mu = \frac{Q}{f \sqrt{2gH}} , \quad (3.10)$$

де  $Q$  - витрати рідини, м<sup>3</sup>/с;

$H$  - напір витікання рідини, висота стовпа рідини в пьезометричній трубці, м;

$\rho$  - щільність рідини, кг/м<sup>3</sup>;

$f$  - площа поперечного перетину щілинного отвору, м<sup>2</sup>.

Із вище приведених теоретичних досліджень можна зробити припущення, що для збільшення продуктивності транзитного потоку під час роботи самоусмоктуючої мішалки найімовірніше проведення конструктивних змін, пов'язаних із збільшенням коефіцієнта витрати  $\mu$  за допомогою зменшення коефіцієнту опору при вході в порожнисті лопаті. При великих числах Рейнольдса значення  $\varphi = 1$ , тоді можна припустити, що,  $\mu = \varepsilon$  тобто коефіцієнт витрати залежить від конструктивних особливостей вхідного отвору.

Результати проведених випробувань на щілинних насадках показали, що кут скосу вхідної кромки насадка впливає на пропускну спроможність випробуваного пристрою, при чому найбільшим коефіцієнтом витрати має пристрій з щілинним насадком з кутом скосу однієї кромки, рівним 45<sup>0</sup>.

## **РОЗДІЛ 4. ЗАСТОСУВАННЯ ЗАПРОПОНОВАНИХ КОНСТРУКЦІЙ САМОУСМОКТУЮЧИХ ПЕРЕМІШУЮЧИХ ПРИСТРОЇВ**

Відомо, що бродіння - процес перетворення цукру під впливом дріжджів в вуглекислий газ і спирт. Завдяки вмісту вуглекислого газу пиво добре вгамовує спрагу.

Найбільша пригнічувальна дія на бродильну спроможність спостерігається за максимально можливою концентрації CO<sub>2</sub>, яка досягається за умови хімічної рівноваги між пірвіноградною кислотою і продуктами її перетворень (оцтовим альдегідом і CO<sub>2</sub>).

Насичення пива CO<sub>2</sub> відбувається в процесі бродіння і доброджування.

Вуглекислота - найважливіша складова частина пива. Вона надає пиву приємного освіжаючого смаку, сприяє піноутворенню, запобігає сполученню пива з киснем повітря, консервує пиво, пригнічує розвиток сторонніх і шкідливих мікроорганізмів.

У шпунтованому пиві більша частина вуглекислоти перебуває у перенасиченому стані. Перенасичення розчину газу у пиві досягається за подовженого витримування пива у спокійному стані. Зв'язування і накопичування вуглекислоти у пиві можливі завдяки тому, що доброджування відбувається у закритих резервуарах за надлишкового тиску. Таким чином, пиво насичується вуглекислим газом і навіть перенасичується, якщо міститься у бродильних апаратах під тиском. У середньому за нормальних умов доброджування перенасичення пива вуглекислотою досягає 30-40 %.

Різниця між перенасиченням вуглекислим газом води і пива пояснюється тим, що вуглекислота, яка утворюється у результаті бродіння, перебуває у особливому фізичному стані у вигляді колоїдного розчину дрібних бульбашок, стабілізованих утворюваними на їх поверхні адсорбційними плівками. У процесі бродіння як побічні малі компоненти утворюються поверхнево активні колоїднорозчинні речовини. Ці речовини

утворюють стабілізовані плівки на поверхні найменших бульбашок або навіть зародків утворюваної газової фази.

Плівки - адсорбційні оболонки, що обволікають зародки бульбашок за самого їх утворення, перешкоджають коалесценції, тобто злиттю бульбашок у більші, тому гальмують процес їх підймання. Крім того, вони можуть сповільнювати дифузю газу з навколишньої перенасиченої рідини у бульбашку. Все це й призводить до різкого сповільнення ліквідування перенасичення після зняття тиску у порівнянні з тим випадком, коли перенасичення було досягнуто простою сатурацією води під тиском.

За іншим припущенням сповільнена ліквідація перенасичення зумовлена утворенням під час бродіння дуже нестійких хімічних сполук типу ефірів вугільної кислоти, які після зняття тиску поступово розкладаються, виділяючи вільний вуглекислий газ.

Частина вуглекислоти вступає у хімічну взаємодію з амінокислотами та етиловим спиртом. При цьому утворюються вуглекислі ефіри. Велика відмінність між букетами готового і молодого пива частково пояснюється присутністю вуглекислих ефірів.

Розчинення вуглекислого газу у пиві відбувається повільно і завжди навіть за дуже малого його вмісту. Вуглекислий газ, що утворюється, не встигає розчинитися, збирається над поверхнею пива і створює підвищений тиск у танку. На розчинення  $\text{CO}_2$  впливає не тільки величина тиску, але й час витримання за цього тиску.

Пропонується використовувати нові розроблені конструкції самоусмоктуючих перемішуючих пристроїв на стадії насичення  $\text{CO}_2$ .

## **РОЗДІЛ 5. БЕЗБЕКА ЕКСПЛУАТАЦІЇ АПАРАТІВ, ЩО ПРАЦЮЮТЬ ПІД ТИСКОМ ТА ЕЛЕКТРОБЕЗПЕКА**

Апарати та посудини, що працюють під тиском, — це герметично закриті ємкості, призначені для здійснення хімічних, теплових та інших технологічних процесів, а також зберігання та перевезення газоподібних, рідких і інших речовин, які перебувають під надлишковим тиском. До них належать парові та водогрійні котли, компресори, холодильні установки, стаціонарні посудини, балони, трубопроводи гарячої води, пари та газу.

Основна небезпека під час експлуатації цього обладнання полягає в можливості раптового руйнування, що супроводжується вибухом за рахунок вивільнення енергії адіабатичного розширення пари або газу.

Посудини, що працюють під тиском, належать до обладнання з підвищеною небезпекою. Залежно від умов експлуатації (температури, тиску, об'єму) їх поділяють на дві групи.

Усе обладнання першої групи реєструють і контролюють органи Держпромгірнагляду.

Посудини, що належать до другої групи (з умовами роботи, що відрізняються від таких у першій групі), не реєструють і контроль за ними організовує керівництво підприємства, яке відповідає за його безпечну експлуатацію та ремонт.

Експлуатація та ремонт обладнання першої групи регламентує ДНАОП 0.00-1.07-97 "Правила обладнання та безпечної експлуатації посудин, які працюють під тиском" та ДНАОП 0.00-1.08-94 "Правила обладнання та безпечної експлуатації парових і водогрійних котлів". Для своєчасного виявлення можливих дефектів такого обладнання перед запуском в експлуатацію його оглядають представники органів Держпромгірнагляду. Якщо недоліків не виявлено, вони видають дозвіл на експлуатацію вищезазначеного обладнання.

Обладнання другої групи експлуатують відповідно до вимог техніки безпеки до таких посудин, які наведено в галузевих правилах з охорони праці і виробничої санітарії.

Основними причинами аварій під час експлуатації обладнання є:

- дефекти виготовлення;
- корозійне руйнування;
- порушення технологічного режиму та правил експлуатації;
- несправності арматури, приладів і пристроїв безпеки.

Небезпека під час експлуатації таких посудин полягає в зриванні болтів, кришок люків, випинанні та розриві днищ тощо.

Безаварійної експлуатації досягають завдяки таким заходам і засобам:

- забезпечення надійності конструкції посудин;
- можливості проведення внутрішнього огледу, очищення та ремонту;
- накладанню стикових зварних швів, які доступні для контролю під час виготовлення, монтажу й експлуатації посудин;
- перевірці наявності сертифікатів якості матеріалів, які застосовують для виготовлення та ремонту посудин;
- дотриманню допустимого тиску стаціонарних посудин, який може знижуватися в процесі експлуатації внаслідок корозії стінок;
- оснащенню посудин відповідними контрольно-вимірювальними приладами, запобіжними пристроями, засобами автоматизації, покажчиками рівня рідини, запірною та запірно-регулювальною арматурою.

Для запобігання підвищенню тиску в посудині вище критичного рівня використовують розривні запобіжні мембрани. Їх виготовляють з металу (міді, алюмінію), які працюють на зріз, та з крихких матеріалів (чавуна), що працюють на руйнування. За тиску, що перевищує робочий не більше ніж на 25 %, мембрана розривається, і тиск у посудині падає.

## ВИСНОВКИ

Внаслідок теоретичних та експериментальних випробувань витікання рідини через отвір різної конфігурації та прямокутний насадок, було встановлено:

- характеристика витікання рідини із отвору або насадка залежить від форми отвору та величини надлишкового тиску;

- проведені випробування з гідродинаміки під час витікання транзитного потоку через отвори та насадки в боковій поверхні позначили безліч характеристик процесу витікання рідини;

- витрати транзитної рідини визначаються розміром площі отвору або насадка, коефіцієнтом витрати та величиною надлишкового тиску. Збільшення величини витрати транзитного потоку залежить від форми вхідної кромки отвору або насадка;

- коефіцієнт витрати залежить від форми вхідної частини отвору або насадка і для кожного отвору або насадка є постійною величиною при значних числах Рейнольдса і не залежить від надлишкового тиску;

- практичні випробування коефіцієнта витрати для різних варіантів конструкцій вхідних отворів плоских насадок показали ефективність скошеної або округлої кромки при рівних значеннях надлишкового тиску;

- проведені лабораторні випробування та отримані результати свідчать про те, що в рамках магістерської роботи була проведена спроба розробки нових конструкцій самоусмоктуючих мішалок із зменшеною величиною гідравлічних витрат та збільшенням насосної продуктивності.



**ПЕРЕЛІК ДЖЕРЕЛ ПОСИЛАННЯ**

1. Стренк Ф. Перемешивание и аппараты с мешалками. Л., Изд. «Химия» 1975, 384 с.
2. Васельцов Э.А., Ушаков В.Г. Аппараты для перемешивания жидких сред. Л., Машиностроение, 1979. 272 с.
3. Брагинский Л.Н., Бегачов В.И., Барабаш В.М. Перемешивание в жидких средах: Физические основы и инженерные методы расчета. Л., Химия, 1984. 336 с.
5. А. с. 1303178 СССР. Турбинная мешалка./ Васельцов Э.А., Клипиницер В.А. и др. Оpubл. 1987, Бюл. №14.
6. А. с. 1165442 СССР. Устройство для аэрации и перемешивания жидкости. / Агафонов Ю.В. Чегодаев Ф.Н. и др. Оpubл. 1985. Бюл. №25.
7. А. с. 1299613 СССР. Устройство для диспергирования газа в жидкости./ Васельцов Э.А., Мороз Т.А. и др.. Оpubл. 1987. Бюл. №12.
8. А. с. 814429 СССР. Устройство для смешения газа с жидкостью./ Стронгин Г.М. и др. Оpubл. 1981 Бюл. № 11.
9. А. с. 1318271 СССР. Устройство для смешения жидкости с газом./ Голубев А.Р., Марков В.А. и др. Оpubл.1987, Бюл. №23.
10. А. с. 1299613 СССР. Устройство для диспергирования газа в жидкости./ Васельцов Э.А. и др. Оpubл. 1987, Бюл. № 12.
11. А.С.1606168 СССР. Устройство для перемешивания жидких сред./ Шабрацкий В.И., Барвин В.И. и др.. Оpubл. 1990, Бюл. №42
12. А. с. 1655548 СССР. Устройство для смешения жидкости с газом. / Д. И. Белкин, В. И. Шабрацкий, В. А. Носач и др. Оpubл. 1991, Бюл. № 22.
13. А. с. 1637106 СССР. Перемешивающее устройство. / Д. И. Белкин, В. И. Шабрацкий, В. А. Носач и др. - 1991 (не публикуется).

14. Парафенко Н. И., Розкин М. Я. Новые роторно-струйные перемешивающие устройства.- В сб.: Теория и практика перемешивания в жидких средах. - М.: НИИТЭХИМ, 1973. - С. 175-180.

15. Парафенко Н. И., Розкин М. Я., Барвин А. И., Микуленко А. В. Исследование самовсасывающей мешалки с радиально-вытекающими струями. - Химическое и нефтехимическое машиностроение. - 1973. - №7. - С. 14.

16. А. с. 1165443 СССР. Устройство для аэрации жидкости. / П. В. Давыдов, В. Г. Правдин, В. В. Сахаров, А. С. Фадеев, А. В. Чередников. Оpubл. 1985, Бюл. № 25.

17. А. с. 1165442 СССР. Устройство для аэрации и перемешивания жидкости. / Ю. В. Агафонов, Ф. Н. Чегодаев, А. Г. Шитов, П. Г. Якимов. Оpubл. 1985, Бюл. № 25.

18. А. с. 437522 СССР. Смеситель для обработки систем газ-жидкость. / В. В. Консетов, Н. А. Лебедев, Э. А. Яновский и др. Оpubл. 1974, Бюл. № 28.

19. А. с. 610554 СССР. Аппарат с самовсасывающей мешалкой. / В. И. Лосик, В. В. Невелич, Н. Т. Яковлева и др. Оpubл. 1978, Бюл. № 22.

20. А. с. 276964 СССР. Массообменный аппарат. / М. С. Гаврилов, М. Я. Розкин, Г. Ф. Слезко и др. Оpubл. 1968, Бюл. № 24.

21. А. с. 537955 СССР. Устройство для аэрирования сточных вод. / С. М. Шифрин, С. Г. Коган, Б. Г. Мищунов. Оpubл. 1976, Бюл. № 45.

22. А. с. 1169729 СССР. Газожидкостной реактор. / А. В. Шишкин, Г. В. Турунцев, М. И. Шибутович. Оpubл. 1985, Бюл. № 28.

23. А. с. 1286258 СССР. Аэрирующее устройство. / Г. Н. Потыхина, Г. М. Тарарыков, В. А. Федоров, А. И. Щербаков. Оpubл. 1987, Бюл. № 4.

24. А. с. 1318271 СССР. Устройство для смешения жидкости с газом. / А. Р. Голубев, В. А. Марков, А. И. Ершов и др. Оpubл. 1987, Бюл. № 23.

25. Beese G., Liehmann A.Z., Apparatus for Aerating Liquids. Pat. USA. №2530814 e.l. 261-03, опубл.12.10.45 МС1 В01F 13/02

26. Бакланов Н. А. Пропеллерные и турбинные мешалки в американской промышленности. Американская техника и промышленность. 1946. - № 7. - с. 479-503.

27. А. с. 127246 СССР. Способ аэрирования жидкостей. / А. А. Иванов. Опубл. 1960, Бюл. №7.

28. А.с. 1190973 СССР. Устройство для диспергирования газа в жидкости. / В. Бранден. Опубл. 1985, Бюл. № 41.

29. А. с. 398265 СССР. Устройство для смешения жидкостей. / Н. И. Парафенко, М. Я. Розкин. Опубл. 1973, Бюл. № 38.

30. А.с. 778759 СССР. Устройство для диспергирования газа в жидкости. / В. Н. Кузнецов, В. М. Никитин, А. А. Собцов, Н. Ф. Мещеряков. Опубл. 1980, Бюл. № 42.

31. А. с. 814429 СССР. Устройство для смешивания газа с жидкостью. / Г. М. Стронгин, А. С. Матвеев, Ю. А. Гришин. Опубл. 1981, Бюл. № 11.

32. А. с. 1357061 СССР. Газожидкостной реактор. / А. В. Шишкин, Г. В. Турунцев, М. И. Шибутович, Н. И. Кретов, А. А. Самойлов. Опубл. 1987, Бюл. № 45.

33. А. с. 332127 СССР. Устройство для аэрации жидкости./ Чечура А.А. Опубл. 1972, Бюл. № 10.

34. А. с. 1122347 СССР. Аппарат с самовсасывающей мешалкой./ Лосик В.И., Невелич В.В., Антонов В.Н. и др. Опубл.1984, Бюл.№ 41.

35. А. с. 1606168 СССР. Устройство для перемешивания жидких сред./ Шабрацкий В.И., Барвин В.И., Барвин А.И. и др.Опубл.1990, Бюл. № 42.

36. Васильев А. В., Зайцев В. А., Горшкова Т. П., Пестов А. С. Исследование массообмена в автоклавах с самовсасывающими мешалками. Химическое и нефтехимическое машиностроение. - 1978. - № 9. - С. 13-16.

37. Фирстов В. А., Климов В. В. Исследование работы щелевых самовсасывающих мешалок. Тез. докл. II Всесоюзной научно-технической конференции "Молодые исследователи и конструкторы - химическому машиностроению". - М.: ЦИНТИхимнефтемаш, 1979. - С. 8.

48. Зайцев В. А., Куприянов Ю. И., Васильев А. С. и др. Исследование эффективности самовсасывающих мешалок.- В сб.: Теория и практика перемешивания в жидких средах. - М.: НИИТЭХИМ, 1979. - С. 153-159.

49. Зайцев В. А., Гусева Г. П. Исследование гидродинамики в аппаратах с аэрирующими устройствами. Химическое и нефтехимическое машиностроение. - 1983. - № 10. - С. 13-14.

50. Стороженко Л. В., Гаврилов М. С., Барвин В. И. Исследование самовсасывающей мешалки эжекционного типа. Вестник Харьковского политехнического института. Химическое машиностроение. - 1970. - Вып.3, № 48/96/. - с.11.

52. Аржаников Н. С., Мальцев В. Н. Аэродинамика. - М.: Оборонгиз, 1956. - 370 с.

53. Краснов Н. Ф. Аэродинамика тел вращения. - М.: Машиностроение, 1964. - 410 с.

54. Мильченко А. И., Щур С. Г., Михалев М. Ф., Демьянова Е. М., Щупляк И. Н. Поля давлений и окружных скоростей, создаваемых лопастной мешалкой. Химическое и нефтехимическое машиностроение. - 1976. - № 2. - С. 44.

55. Гуревич м. И. Об одной схеме струйного обтекания плоской пластины. Труды ЦАГИ. - 1943. - № 612. - С. 8.

57. Перник А. Д. Проблемы кавитации. - Л.: Судостроение, 1963.

58. Абрамович Г.И. и др. Теория турбулентных струй. – М.: Наука, 1984. 715 с.

59. Лойцянский Л. Г. Механика жидкости и газа. - М.: Наука, 1970. - 502 с.

60. Альштуль А. Д., Кисилев П. Г. Гидравлика и аэродинамика /основы механики жидкости/. - М.: Стройиздат, 1965. - 274 с.

61. Емцев Б.Т. Техническая гидромеханика: Ученик для вузов по специальности «Гидрвлические машины и средства автоматизи». – 2-е узд. М.: машиностроение, 1987.- 440 с.

62. Петров Г. И., Штейнберг Р. И. Исследование потока за плохообтекаемыми телами. Труды ЦАГИ. - 1940. - Вып.482. - С. 18.
63. Майер У., Мауль Д. Плохообтекаемые тела и отрыв вихрей. Тез. докл. "Европа-17".- В кн.: Механика. - М.: Мир, 1972. - № 2. - С. 100-113.
64. Биркгоф Э., Сарантонелло Э. Струи, следы и каверны. - М.: Мир, 1964. - 466 с.
65. Федяевский К. К., Блюмина Л. Х. Гидроаэродинамика отрывного обтекания тел. - М.: Машиностроение, 1977. - 120 с.
66. Таганов Г. И. К вопросу подсасывающего действия струй в поперечном потоке. Труды ЦАГИ. - 1967. - Вып.1172. - С. 23.
67. Козырев С. П. Гидроабразивный износ материалов при кавитации. - М.: Машиностроение, 1971. - 240 с.
68. Кнэпп Р., Дейли Дж., Хэммит Ф. Кавитация. - М.: Мир, 1974. - 687 с.
69. Лаврентьев М. А., Шабат Б. В. Проблемы гидродинамики и их математическая модель. - М.: Наука, 1973. - С. 416.
70. Brand D. Kavitation and Ruhrorganen. Chem.-Ing.-Tech. 1969. Ig. 41. № 56, с. 266-271.
71. Кафаров В. В., Гольдфарб М. И., Иванова М. Г. Изучение процесса перемешивания в системах газ-жидкость. Химическая промышленность. - 1954. - № 7. - С. 39-44.
72. Касаткин А. Г. Основные процессы и аппараты химической технологии. - М.: Химия, 1971. - 784 с.
73. Зайцев В. А., Киприянов Ю. И., Васильев А. С. и др. Исследование эффективности самовсасывающих турбинных мешалок. - В сб.: Теория и практика перемешивания в жидких средах. Тез. докл. II Всесоюзной конференции. - М.: НИИТЭХИМ, 1973. - С. 153-159.
74. Васильев А. В., Зайцев В. А., Горшкова Г. П., Пестов А. С. Исследование массообмена в автоклавах с самовсасывающими

турбинными мешалками. Химическое и нефтяное машиностроение. - 1978. - № 9. - С. 13-16.

75. Шабрацкий В.И., Гидродинамика газожидкостных аппаратов с самовсасывающими мешалками. Канд. дис. - М., 1995г., 235 с.

76. Сойфер Р. Д., Кафаров В. В. Газосодержание аэрируемой жидкости в аппаратах с мешалкой. Химическое и нефтяное машиностроение. - 1967. - № 3. - С. 16-18.

77. Calderbank R. U. Physical rate processes in industrial fermentation. Part 2. Interfacial area in gas-liquid centering with mechanical aqitation Trans. Ins. Chem. Engrs. 1958, v. 38, p. 443-463.

78. Ефимов Б. Л. Исследование гидродинамики и массопередачи в жидкой фазе при механическом перемешивании газожидкостных смесей. Автореф. канд. дис. М., 1973.

79. Касаткин А. Г., Кафаров В. В., Панфилов М. И. Исследование процесса перемешивания механическими мешалками в системе газ-жидкость. Труды МХТИ им. Д. И. Менделеева. - 1957. - Вып.24. - С. 413-427.

80. Yoshida F., Minza Y. Gas absorption in agitated gas-liquid contactors Ind.-Eng.-Chem. 1963, v. 2, №4, p. 263-268.

81. Бальцежак С. М., Соломаха Г. П. Газосодержание в барботажных аппаратах с механическим перемешиванием в двухфазных (газ-жидкость) и трехфазных (газ-жидкость-твердое) системах.- В сб.: Теория и практика перемешивания в жидких средах. - М.: НИИТЭХИМ, 1982. - С. 86-88.

82. Clark M. W. and Vermenlen T. Power Requirements for Mixing of Liquid-Gas Systems p. 29-31. Univ. California Lawrence Radiation Lab. Berkeley. UCRL 10996 (1963).

83. Цирлин А. М., Трушанов В. Н., Ходов Г. Я., Рабинович Р. А. Газосодержание в аппаратах с механическим перемешиванием при высоких удельных затратах энергии. Химическое и нефтяное машиностроение. - 1974. - № 6. - С. 13-15.

84. Шабалин Н. И., Петушинский Л. Н. Исследование поверхности контакта фаз и коэффициентов массоотдачи в реакторах с самовсасывающими мешалками. - М.: ЦИНТИхимнефтемаш, 1979. - С. 11-12.

85. Кафаров В. В. Процессы перемешивания в жидких средах. - М.: Госхимиздат, 1949. - 230 с.

86. Штербачек З., Тауск П. Перемешивание в химической промышленности. - Л.: Госхимиздат, 1963. - 416 с.

87. Cooper R. G., Wolf D. Pumping capacities in stirred tanks Theory and application Canad. I. Chem. Eng. 1967, v. 45, № 4, p. 197-203.

88. Брагинский Л. Н., Бегачев В. И. О взаимосвязи между окружной скоростью и мощностью при перемешивании. ТОХТ. - 1972. - Т.6, № 2. - С. 760-768.

89. Бегачев В. И., Брагинский Л. Н. О мощности и распределении окружной скорости в аппаратах с якорными мешалками. ТОХТ. - 1974. - Т.8, № 1. - С. 79-84.

90. Жгун Г. Г., Ушаков В. Г., Брагинский Л. Н. Расчет мощности в аппаратах с фрезерными мешалками. Тез. докл. Всесоюзного научно-технического совещания "Создание и внедрение современных аппаратов с активными гидродинамическими режимами для технологических процессов. - М.: 1977. - С. 185-190.

91. Яковлев Н. А., Соломаха Г. П. Об определении гидравлических параметров при массообмене в системах газ-жидкость при механическом перемешивании. Труды МИХМ. - М.: Высшая школа, 1975. - С. 94-99.

92. Барабаш В. М., Лалакина Л. Л., Васильева В. С. Высокоэффективное газораспределительное устройство для перемешивания в системах газ-жидкость.- В сб.: Теория и практика перемешивания в жидких средах. - Л., 1990. - С. 139-141.

93. Петушинский Л. Н., Шабалин Н. И., Бойко В. И., Родионов А. И. Определение энергозатрат при работе турбинной самовсасывающей

мешалки.- В сб.: Теория и практика перемешивания в жидких средах. - Л., 1990. - С. 155-156.

94. Зайцев В. А., Гусева Т. П. Исследование энергетических затрат в аппаратах с аэрирующими устройствами.- В сб.: Теория и практика перемешивания в жидких средах. - М.: НИИТЭХИМ, 1982. - С. 97-99.

95. Гзовский С. Я. Потребляемая мощность, интенсивность и эффективность действия радиально-лопастных мешалок. Химическое и нефтяное машиностроение. - 1965. - № 3. - С. 1-6.

96. Бальцежак С. В. Гидродинамика и массоотдача в жидкой фазе у границы газ-жидкость в двухфазных (газ-жидкость) и трехфазных (газ-жидкость-твердое тело) системах в барботажных аппаратах с механическим перемешиванием. Канд. дис. - М., 1982.

97. Шабрацкий В. И., Рудь М. И., Панин Ю. Г. и др. Способ получения водомаслорастворимых ПАВ. Тез. докл. VII Всесоюзной конференции по ПАВ и сырью для их производства. - Белгород. - 1988.

98. Парамонов В. И., Шабрацкий В. И., Боголепов А. В. и др. К вопросу аппаратурно-технологического оформления процесса сульфирования алкилбензолов фракции 340-500 С. Тез. докл. У1 Всесоюзной конференции по поверхностно-активным веществам и сырью для их производства. - Волгодонск, 1984. - С. 98-99.

99. Шабрацкий В. И., Роговик В. И., Садченко Л. С. и др. Изучение экологических показателей хлорирования пассивных органических соединений. Материалы II Всесоюзного научно-технического совещания "Пути совершенствования, интенсификации и повышения надежности аппаратов в основной химии". - Сумы, 1982. - С.260.

100. Шабрацкий В. И., Роговик В. И., Бедусенко И. Я. Применение реакторов емкостного типа с всасывающей мешалкой для хлорирования пассивных органических соединений. Материалы VIII Всесоюзной конференции "Химреактор". - Чимкент, 1983. - С. 253-258.



101. Шабрацкий В.И. Гидродинамика газожидкостных аппаратов с самовсасывающими мешалками. Автореф. канд. дис. М., 1995.
102. Башта Т.М. и др.. Гидравлика, гидромашины и гидроприводы. Ученик для машиностроительных вузов / Т.М. Башта и др.. М.: Машиностроение, 1982. – 423 с.
103. Альштуль А.Д. Гидравлические сопротивления. – М.: Недра, 1970. – 216 с.
104. Идельчик И.Е. Справочник по гидравлическим сопротивлениям. М.: Машиностроение, 1975. – 384 с.
105. Лабораторный курс гидравлики, насосов и гидропередат: Учеб. пособие для машиностроительных вузов/ Под ред. С.С.Руднева и Л.Г. Подвидза, Изд. М.: Машиностроение, 1974. – 416 с.
106. Белкин Д.И., Шабрацкий В.И., Барвин В.И., Шабрацкий С.В. К расчету эжекционной производительности самовсасывающих мешалок по жидкости. Матеріали шостої міжнародної науково-практичної конференції. Том 5, Полтава 2010 р. с 41-44.
107. Белкин Д.И., Шабрацкий В.И., Барвин В.И., Шабрацкий С.В. Увеличение производительности самовсасывающих мешалок по газовому реагенту. Матеріали восьмої міжнародної науково-практичної конференції. Том 7, Полтава 2012 р. с24-26.
108. Белкин Д.И., Шабрацкий С.В., Барвин В.И., Шабрацкий В.И. Усовершенствование конструкции самовсасывающих мешалок. Матеріали восьмої міжнародної науково-практичної конференції. Том 8, Полтава 2012 р. с46-48.

## ДОДАТОК

Таблиця 1 – Експериментальні та розрахункові дані продуктивності самоусмоктуючих мішалок

Діаметр мішалки 0,18м				
$n, c^{-1}$	$Q \cdot 10^5, m^3/c$	$\varphi_0$	$n^2 d^2$	$\Delta P$
3	0	0,01	0,29	0,000
4,00	3,00	0,01	0,52	0,051
5,50	7,33	0,03	0,98	0,304
8,00	20,00	0,11	2,07	2,261
10,00	36,00	0,18	3,24	7,325
12,40	58,67	0,23	4,98	19,455
Діаметр мішалки 0,168м				
$n, c^{-1}$	$Q \cdot 10^5, m^3/c$	$\varphi_0$	$n^2 d^2$	$\Delta P$
3,00	0,00	0,01	0,29	0,000
4,50	1,33	0,01	0,66	0,010
5,50	5,33	0,03	0,98	0,161
7,50	14,00	0,11	1,82	1,108
8,50	20,00	0,18	2,34	2,261
10,50	33,33	0,23	3,57	6,279
11,50	44,67	0,23	4,28	11,278

Таблиця 2 – Експериментальні та розрахункові дані для визначення коефіцієнта витрати щілинних вертикальних отворів

$d_b=0,006$ м, $b=0,008$ м, $d_m=0,18$ м Глибина занурення мішалки 0,1 м				
$n, c^{-1}$	$Q \cdot 10^5, m^3/c$	$\varphi_0$	$n^2 d^2$	$\Delta P$
4,17	1,25	0,01	0,56	0,009
5,00	4,50	0,03	0,81	0,114
5,83	9,08	0,11	1,10	0,466
6,67	11,00	0,18	1,44	0,684
7,50	14,20	0,23	1,82	1,140
8,33	20,00	0,29	2,25	2,261
9,17	28,50	0,36	2,72	4,591
10,00	37,00	0,42	3,24	7,000
10,83	45,00	0,48	3,80	10,450
11,67	50,00	0,53	4,41	14,130
12,50	58,82	0,57	5,06	19,555
13,33	71,42	0,62	5,76	28,830
Глибина занурення мішалки 0,15 м				
$n, c^{-1}$	$Q \cdot 10^5, m^3/c$	$\varphi_0$	$n^2 d^2$	$\Delta P$
5,78	6,10	0,03	1,08	0,210
6,73	10,10	0,07	1,47	0,577
7,55	12,50	0,10	1,85	0,883
8,33	16,00	0,13	2,25	1,447
9,20	20,00	0,18	2,74	2,261
10,03	25,00	0,23	3,26	3,533
10,85	29,00	0,30	3,81	4,753
11,68	33,30	0,37	4,42	6,267
12,50	41,00	0,42	5,06	9,501
13,35	51,00	0,46	5,77	14,701
Глибина занурення мішалки 0,20 м				
$n, c^{-1}$	$Q \cdot 10^5, m^3/c$	$\varphi_0$	$n^2 d^2$	$\Delta P$
5,80	2,00	0,02	1,09	0,023
6,72	7,50	0,04	1,46	0,318
7,57	10,50	0,08	1,86	0,623
8,38	14,50	0,10	2,28	1,188
9,17	17,00	0,13	2,72	1,633
10,00	20,00	0,20	3,24	2,261
10,80	22,50	0,24	3,78	2,861
11,68	25,00	0,30	4,42	3,533
12,53	29,00	0,34	5,09	4,753

## Продовження таблиці 2

h, м	Q, л/с	Q, м <sup>3</sup> /с	V, м/с	ζ	μ	Re			
1	2	3	4	5	6	7			
Вертикальна щілина отвору має усі прямі кромки									
0,005	0,02	0,00002	0,25	6,2784	0,399094	8000			
0,025	0,032	0,000032	0,4	4,905	0,451524	12800			
0,042	0,045	0,000045	0,5625	3,534507	0,531907	18000			
0,055	0,06	0,00006	0,75	3,06944	0,570782	24000			
0,064	0,073	0,000073	0,9125	3,157461	0,56277	29200			
0,072	0,086	0,000086	1,075	3,005075	0,576863	34400			
0,08	0,1	0,0001	1,25	2,82528	0,594935	40000			
0,085	0,114	0,000114	1,425	2,869629	0,59032	45600			
0,089	0,128	0,000128	1,6	2,889352	0,588301	51200			
0,092	0,14	0,00014	1,75	2,979037	0,579378	56000			
Вертикальна щілина отвору має одну вертикальну скошену кромку (кут скосу кромки вхідної щілини 45 <sup>0</sup> ), а інші прямі кромки									
0,02	0,02	0,00002	0,25	0,025	0,008	0,3	0,39	8000	0,00254
0,04	0,03	0,00003	0,4	0,04	0,005	0,5	0,61	12800	0,00407
0,01	0,04	0,00004	0,562	0,056	0,001	0,7	0,78	18000	0,02150
0,03	0,06	0,00006	0,75	0,075	0,001	0,8	0,99	24000	0,01592
0,05	0,07	0,00007	0,912	0,091	0,001	0,9	1,02	29200	0,01697
0,07	0,08	0,00008	1,075	0,107	0,001	0,9	1,01	34400	0,01682
0,09	0,1	0,0001	1,25	0,125	0,001	0,9	1,01	40000	0,016766
0,13	0,11	0,00011	1,425	0,142	0,001	0,9	1,01	45600	0,01556
0,16	0,12	0,00012	1,6	0,16	0,001	0,9	1,01	51200	0,01553
0,21	0,14	0,00014	1,75	0,175	0,001	0,9	1,01	56000	0,01486