

## РЕФЕРАТ

Магістерська робота за темою «Дослідження перемішування газорідинної суміші з розробкою самоусмоктуючої мішалки з кутом скосу входної кромки  $90^\circ$ »: 81 с., 15 табл., 19 рис., 1 дод., 110 джерел.

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

Об'єкт дослідження – самоусмоктуюча мішалка з кутом скосу входної кромки  $90^\circ$ .

Ціль роботи – Теоретичне та експериментальне дослідження гідродинаміки процесу перемішування газорідинного середовища в апараті об'ємного типу з самоусмоктуючими мішалками з кутом скосу входної кромки  $90^\circ$  і розробка методу розрахунку таких апаратів, дослідження гідродинаміки транзитного потоку по каналах мішалки та вдосконалення самоусмоктуючих перемішувальних 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 входного отвору впливає на пропускну спроможність лабораторних пристроїв; виявлено, що кут скосу входної вертикальної кромки впливає на пропускну спроможність випробовуваного лабораторного пристрою.

## ЗМІСТ

|   |    |
|---|----|
| Скорочення та умовні позначки .....   | 5  |
| Вступ .....   | 7  |
| Розділ 1. Аналітичний огляд газорідинних апаратів з мішалками .....   | 11 |
| 1.1 Загальні положення та визначення .....  | 11 |
| 1.2 Сучасний стан газорідинних апаратів .....   | 18 |
| 1.3 Газовміст перемішуючого середовища в апараті з мішалками .....  | 24 |
| 1.4 Потужність, споживана при перемішуванні. Ефективність<br>перемішування .....  | 28 |
| 1.5 Теорія роботи самоусмоктуючої мішалки .....   | 30 |
| Розділ 2. Методика розрахунку апаратів з самоусмоктуючими<br>перемішуючими пристроями .....                                   | 34 |
| 2.1 Алгоритм розрахунку апаратів з самоусмоктуючими<br>перемішуючими пристроями .....   | 34 |
| 2.2 Висновки та рекомендації щодо розрахунку апаратів об'ємного<br>типу з самоусмоктуючими перемішуючими пристроями .....     | 38 |
| Розділ 3. Експериментальна частина .....  | 40 |
| 3.1 Опис експериментального стенду та об'ємного апарату з<br>самоусмоктуючими мішалками .....                                 | 40 |
| 3.1.1 Опис самоусмоктуючої мішалки .....  | 45 |
| 3.2 Методика дослідження продуктивності самоусмоктуючої мішалки<br>з кутом скосу вхідної кромки $60^\circ$ .....              | 46 |
| 3.2.1 Методика визначення середнього газовмісту в апараті з<br>самоусмоктуючими мішалками .....                               | 51 |
| 3.3 Опис експериментальної установки для вивчення гідродинаміки<br>витікання рідини та дослідних лабораторних пристроїв ..... | 53 |

|  |    |
|--|----|
| 3.4 Випробування витратних характеристик при витіканні рідини із вертикального прямокутного насадка .....  | 57 |
| 3.5 Обговорення результатів дослідження. Гідродинамічні характеристики процесу витікання рідини з циліндричного отвору або циліндричного насадка ..... | 59 |
| Розділ 4. Застосування запропонованих конструкцій самоусмоктуючих перемішуючих пристроїв .....   | 63 |
| Розділ 5. Безпека експлуатації апаратів, що працюють під тиском .....  | 65 |
| Висновки .....   | 69 |
| Перелік джерел посилання .....   | 70 |
| Додаток .....  | 80 |

## 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;

$\bar{\Phi}$  – середній газовміст в апараті, од.;

$\bar{\Phi}_o$  – середній газовміст в кільцевому обсязі, ометаємом лопаттю мішалки, од.;

$\bar{\Phi}_л$  – середній газовміст в каналі лопаті од.;

$\bar{\Phi}_п$  – середній газовміст 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,  $\text{кг/м}^3$ ;

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

$\mu, \mu_{\text{п}}, \mu_{\text{г}}$  – 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,  $\text{Н/м}$ ;

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

$V_{\text{г}}$  – 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

В масообмінних процесах, зокрема для систем газ-рідина, інтенсифікація та підвищення продуктивності апаратів об'ємного типу з перемішувачами є актуальною і пріоритетною задачею в сучасній хімічній, нафтохімічній і мікробіологічній промисловості.

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.

Масообмінними процесами називають процеси, швидкість яких визначається законами перенесення маси з однієї фази в іншу крізь поверхню поділу фаз. Масообмінні процеси широко використовуються в промисловості для концентрування й розділення рідких, газоподібних і твердих сумішей, у тому числі і для захисту навколишнього середовища (передусім для очищення стічних вод і відхідних газів). Рушійна сила цих процесів - різниця хімічних потенціалів. Як і в будь-яких інших процесах, рушійна сила масообміну характеризує ступінь відхилення системи від стану динамічної рівноваги. У межах даної фази речовина переноситься від точки з більшою до точки з меншою концентрацією. Тому зазвичай в інженерних розрахунках наближено рушійну силу виражають через різниця концентрацій, що значно спрощує розрахунки масообмінних процесів. Процес переходу речовини (або декількох речовин) з однієї фази в іншу в напрямку досягнення рівноваги називають масопередачі.

Перенесення речовини усередині фази - з фази до межі розділу фаз або навпаки - від межі розділу в фазу - називають масоотдачі (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 нерухомою поверхнею контакту фаз (системи газ - тверде тіло, пар - тверде тіло, рідина - тверде тіло); масопередачі через напівпроникні перегородки (мембрани).

Абсорбція та хемосорбція займають значне місце в структурі технологічних процесів різних виробництв, ефективність яких залежить від раціонального використання природних ресурсів, якості продукції та впливу виробництва на навколишнє середовище.

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. Таке конструктивне виконання розподільчого пристрою для газового реагенту дає можливість використовувати багаторазову рециркуляцію газу. Для таких цілей використовуються пристрої для змішування газу з рідиною. Крім турбінних самоусмоктуючих мішалок заслуговують на увагу перемішувачі пристрої

роторно-струменевого типу, які представляють собою ротор у вигляді перевернутого стакану, на утворюючій його поверхні розміщені порожнисті лопаті.

Багаторазове переміщення молекул різних фаз відносно друг друга в усьому об'ємі апарату можливе під дією імпульсу енергії, який передається за допомогою струменю рідини чи газу або перемішуючого пристрою. Таким чином перемішування є типовим прикладом вирішення задачі з гідродинаміки потоків в масообмінних апаратах об'ємного типу [1-5], з яких найбільш ефективними для проведення газорідних хімічних процесів є апарати з перемішувачами. Конструкції мішалок, поза сумнівом, грають досить важливу роль в роботі цих апаратів.

У класичних апаратах такого типу газовий реагент зазвичай подається під перемішувачий пристрій через барботер, виконаний у вигляді тора зігнутої перфорованої труби, або через газорозподільник, виконаний у вигляді кільцевого відкритого знизу жолоба з рівномірно розміщеною по його верхній кромці перфорацією. В технічній літературі приведені надійні методи гідродинамічного розрахунку класичних газорідних апаратів. Проте, ці методи неприйнятні або недостатні для розрахунків апаратів з самоусмоктуючими мішалками ежекційного типу.

Мета роботи - узагальнення теоретичних і експериментальних даних, що відносяться до гідродинаміки газорідних апаратів і розробка методу розрахунку гідродинаміки транзитного потоку по каналах самоусмоктуючої мішалки з прямою вхідною кромкою.

Методи дослідження. При випробуванні різних моделей самоусмоктуючих мішалок в об'ємному апараті на експериментальному стенді використовувалися методи фізичного та математичного моделювання. Газовміст в апараті визначали за допомогою різниці висот рідини під час перемішування.



В період експериментальних досліджень використовувалися методи візуального спостереження та фотографування початку диспергування повітря в перемішувемій об'єм рідини, середнього газовмісту в апараті, визначення продуктивності самоусмоктуючої мішалки по газовій фазі і рідині за рахунок самоусмоктування та потужності мішалок методами інструментальних вимірювань. Обробка результатів експериментів, порівняння з теоретичними розрахунками та визначення похибок проведені за допомогою методів математичної статистики.

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

Новизна роботи. Розроблений лабораторний стенд, удосконалено аналітичні залежності з визначення витрат потужності на перемішування в апаратах об'ємного типу, які враховують особливості внутрішніх турбоежекційних перемішувальних пристроїв і газовміст газорідних систем. Розроблений засіб експериментального визначення коефіцієнта втрат при витіканні транзитного потоку через прямокутну щілину залежно від конфігурації вхідної частини отвору.

Практична цінність роботи. Дослідження процесу перетікання рідини із ротора мішалки в порожнину лопаті та одержані результати випробувань. Розроблені нові високоефективні конструкції перемішувальних пристроїв для проведення газорідних реакцій в апаратах об'ємного типу. На підставі отриманих результатів розроблені нові конструкції самоусмоктуючих перемішувальних пристроїв.

## РОЗДІЛ 1. АНАЛІТИЧНИЙ ОГЛЯД ГАЗОРІДИННИХ АПАРАТІВ З МІШАЛКАМИ

### 1.1 Загальні положення та визначення

У хімічній промисловості в останні роки питання вивчення гідродинамічних закономірностей двохфазних потоків набуло особливої ваги стосовно розрахунку абсорбційних та хемосорбційних масообмінних процесів. Агрегатний стан будь-якої речовини визначається його молекулярним складом і будовою, а також термодинамічними параметрами стану, найважливішими з яких є температура і тиск.

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

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

Ускладнення конструкції пристроїв для диспергування газу в рідині за задумом авторів [6,10] дозволяє підвищити ефективність розчинення газу в рідині та інтенсифікації масообміну. У всіх вище розглянутих випадках диспергування газового реагенту в зону реакції можливе за умови, якщо в газопроводі та барботері підтримується надмірний тиск, що перевищує тиск висоти стовпа рідини в апараті та суму витрат, пов'язаних з рухом газового реагенту.

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]. Таке конструктивне виконання розподільчого пристрою для газового реагенту дає можливість використовувати багаторазову рециркуляцію газу. Відомі також пристрої для

змішування газу з рідиною [13,14], що досить добре працюють в масообмінних процесах для насичення рідини повітрям, в той же час для процесів, при яких протікає хімічна реакція. Використання таких пристроїв для деяких технологічних процесів недоцільне у випадках, коли продукти реакцій приводить до забивання перфорації і, як наслідок, до зупинки роботи реактору. Для таких процесів пропонуються інші конструкції пристроїв для перемішування та турбінні мішалки закритого типу [15-19]. Принцип дії цих пристроїв зосереджений на створенні турбулентних потоків з високою різницею швидкостей робочих елементів лопатей та перемішуючого середовища і рівномірного розподілу бульбашок в рідині апарату.

Широкого використання в газорідних процесах набули апарати з самоусмоктуючими мішалками, які дозволяють проводити багаторазову циркуляцію важкорозчинних газів із газової фази апарату шляхом забезпечення сильно розвинутої міжфазної поверхні [4, 20]. В цих апаратах аератор виконує декілька функцій: усмоктує газ в реакційний об'єм, забезпечує його диспергування та забезпечує перемішування робочого середовища. Ефект усмоктування відбувається за допомогою введення енергії перемішуючим пристроєм, а оцінку ефективності газорідних апаратів призначених для проведення хімічних процесів автори [20-22] пропонують визначати по газовмісту, умовній витраті газу та питомій потужності.

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.

Для газорідних процесів пов'язаних з проведенням екзотермічних реакцій використовуються реактори зі спеціальними мішалками [16,26-28], які поєднують в собі певні властивості лопатевих, турбінних та пропелерних мішалок. Відомі мішалки під час обертання усмоктують газовий реагент, що знаходиться над рідиною або подається по трубах до реактору і розподіляють його в перемішувальному середовищі, виконуючи функції рухомого барботеру. Для доставки газового реагенту в середину перемішуваного об'єму в таких апаратах використовують порожнистий вал, до якого прикріплюються трубчасті порожнисті [18,53], ежекційно-струменеві [18, 23,24], самоусмоктуючі [2-5, 29] мішалки.

Багаторазове переміщення молекул різних фаз відносно друг друга в усьому об'ємі апарату можливе під дією імпульсу енергії, який передається за допомогою струменю рідини чи газу або перемішувального пристрою. Таким чином перемішування є типовим прикладом вирішення задачі з гідродинаміки потоків в масообмінних апаратах об'ємного типу [1-5], з яких найбільш ефективними для проведення газорідних хімічних процесів є апарати з перемішувальними пристроями. Конструкції мішалок, поза сумнівом, грають досить важливу роль в роботі цих апаратів. В даний час є багато розробок конструктивних апаратів з перемішувальними пристроями, які описані в літературних джерелах [1-4]. Їх значно більше, чим інших масообмінних апаратів, наприклад теплообмінників або колонних апаратів, які зустрічаються в хімічній промисловості. Це пояснюється тим, що конструкцію апарату з мішалкою визначає не тільки конструкція і тип перемішувального пристрою, але й тип резервуару (судини), в якому воно встановлене.

Крім стандартних турбінних самоусмоктуючих мішалок заслуговують на увагу перемішувальні пристрої роторно-струменевого типу, які використовуються в апаратах об'ємного типу в якості самоусмоктуючих

мішалок. Вони представляють собою порожнистий ротор у вигляді перевернутого стакану, на утворюючій його поверхні розміщені порожнисті лопаті [19,24,25]. Описані мішалки працюють таким чином: під час обертання валу на рідину, що знаходиться в порожні ротору мішалки і лопатей діє відцентрова сила, що спонукає рідину рухатися від центру обертання до периферії. За рахунок нерозривності рідини на її місце заходить рідина з об'єму апарату, таким чином відбувається усмоктування перемішуючого середовища. Сульфуратор, в якому самоусмоктуюча мішалка призначена для проведення газорідинних реакцій представляє складну конструкцію, яка складається з об'ємної та плівкової частин. Інші самоусмоктуючі мішалки відрізняються тільки незначним удосконаленням окремих елементів конструкції.

Конструкція перемішуючого пристрою грає найбільш важливу роль в роботі апарату для газорідинного перемішування, але тип та конструкція апарату також може зробити великий вплив на його роботу.

Різноманітність конструкцій самоусмоктуючих мішалок свідчить про те, що існує ряд хіміко-технологічних процесів, при проведенні яких звичайні барботажні газорідинні апарати з мішалками не ефективні.

Мішалки розділяються на тихохідні з частотою обертання 15-80 об/хв, окружна швидкість на кінцях лопатей 1м/с) і швидкохідні з частотою обертання 100-1800 об/хв. та окружною швидкістю 10 м/с. До перших відносяться листові, рамні, якірні, лопатеві мішалки, до другої - турбінні і пропелерні мішалки різних типів, а також спеціальні типи мішалок, наприклад дискові, лопатеві і т.п. Ці мішалки залежно від форми лопатей і способу їх установки можуть створювати радіальний, осьовий, радіально-осьовий потоки рідини.

Радіальний потік створюють турбінні мішалки закритого типу, а також відкриті турбінні мішалки з прямими або зігнутими лопатями.

Осьовий потік можуть забезпечувати пропелерні і шнекові мішалки, а точніше - пропелерні і шнекові мішалки з дифуззором.

Турбінні мішалки забезпечені лопатями і мають чітко обкреслений ротор. У турбінних мішалках робочим органом є турбінне колесо діаметром  $d = (0,25 \dots 0,3)D$ , що обертається на вертикальній осі. Принцип дії аналогічний роботі колеса відцентрового насоса. Рідина входить у колесо по осі крізь центральний отвір і, діставши прискорення від лопатей, викидається з колеса в радіальному напрямі. Іноді обертове колесо встановлюють усередині нерухомого напрямного колеса з лопатями. Частота обертання турбінних мішалок змінюється від 400 до 2000 об/хв. Турбінні мішалки [1,4] працюють за принципом відцентрового насоса, 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. 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.

Турбінні мішалки [1,2,7] відносяться до швидкохідних типів перемішувальних пристроїв. Вони використовуються для швидкого емульгування, розчинення, диспергування, абсорбції газів. При роботі в турбулентному режимі турбінними мішалками потужність практично не залежить від в'язкості рідини, що перемішується, тому вони особливо придатні для роботи з рідинами, в'язкість яких змінюється в процесі перемішування.

Мішалки цього типу застосовують для перемішування рідин, як великої, так і малої в'язкості (до 20 Па·с). Проміжний радіально-осьовий

потік створюють турбінні мішалки з лопатями, встановленими з нахилом до площини обертання мішалки [3, 5].

Швидкохідні мішалки найчастіше працюють в апаратах з перегородками тому, що відсутність перегородок в апараті приводить до закручування рідини та утворенню воронки.

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 [6-7] або інших пристроїв [9]. При значній висоті об'ємного апарату на валу встановлюють дві або три мішалки. При значній висоті об'ємного апарату на валу встановлюють дві або три мішалки. Турбінна мішалка розташовується біля дна апарату на відстані 0,25-0,35 її діаметру. Відстань між ними приймається 0,5-2,0 діаметру мішалки, залежно від в'язкості рідини. Ці пристрої досить добре працюють в масообмінних процесах де проводиться насичення повітрям рідини, 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] для проведення масообмінних процесів в системі газ-рідина

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 перемішувачів, 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.

Ефективність роботи мішалок характеризує якісне проведення процесу і може бути виражена по-різному, в залежності від мети перемішування. Наприклад, у випадку одержання емульсій і суспензій ефективність перемішування можна оцінити за ступенем однорідності в об'ємі, що перемішується. При цьому перемішування буде кращим, чим швидше буде досягнута однакова концентрація одного компонента в усіх частинах об'єму рідини, що перемішується. При інтенсифікації дифузійних і теплових процесів ефективність характеризується відношенням коефіцієнтів тепловіддачі та масовіддачі під час перемішування та без нього.

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.



## 1.2 Сучасний стан газорідинних апаратів

Перемішування є типовим прикладом вирішення задачі з гідродинаміки потоків в масообмінних апаратах об'ємного типу [1-5], з яких найбільш ефективними для проведення газорідинних хімічних процесів є апарати з перемішувачами. Багаторазове переміщення молекул різних фаз відносно друг друга в усьому об'ємі апарату можливе під дією імпульсу енергії, який передається за допомогою струменю рідини чи газу або перемішувача.

Традиційний вид технологічного устаткування для проведення масообмінних процесів - це вертикальні циліндричні апарати з мішалками, вісь обертання яких співпадає з віссю апарату. Інтенсивність перемішування в апаратах значною мірою залежить від наявності всередині апарату внутрішніх нерухомих устроїв та типу перемішувачів. 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.

Використання пристроїв, в об'ємних апаратах з метою інтенсифікації масообміну особливо необхідно в умовах, коли за технологією необхідно поглинання важко розчинних газів, зазвичай з подальшою реакцією між розчиненим газом і речовинами, що знаходяться в рідині. Основною характеристикою масообмінних реакторів впроваджених в системах газ-рідина є величина поверхні контакту фаз [71,72], яка пропорційна об'ємній частці бульбашок газу або газовмісту в двофазній системі. Ця величина не є постійною, вона залежить від способу введення газової фази в перемішуваче

середовище, інтенсивності перемішування, геометричних розмірів апарату, фізичних властивостей системи і витрати газового компонента.

Газовміст в об'ємі апарату за умови механічного перемішування залежить від фізико-хімічних властивостей компонентів, гідродинаміки і геометричних параметрів. Основною характеристикою двохфазних систем є середній газовміст перемішуваного середовища, величина якого необхідна для розрахунків робочого об'єму апарату і витрат енергії на перемішування та розрахунків з визначення коефіцієнту масообміну.

Цей недолік можуть усунути самоусмоктуючі мішалки. З патентної літератури відомі мішалки, які при обертанні самостійно усмоктують газовий реагент або повітря, що знаходиться над рідиною і розподіляють його в перемішувачому середовищі, імітуючи рухомий барботер.

Самоусмоктуючі мішалки залежно від форми поверхні і кутів конструктивних елементів мішалок, що створюють розрідження розділюють 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.

У технічній літературі також немає даних, які дозволяють об'єктивно порівняти ефективність різних конструкцій самоусмоктуючих мішалок і навіть не запропонований достатньо універсальний критерій оцінки роботи їх ефективності.

Газова продуктивність або об'ємна витрата газу, що проходить через порожнисті канали самоусмоктуючих мішалок є параметром властивим тільки таким мішалкам. Отже, розрахунок цього параметра є найбільш істотним і першочерговим завданням гідродинамічного розрахунку газорідинних апаратів з самоусмоктуючими перемішувачими пристроями.

Усмоктування газу самоусмоктуючою мішалкою 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.

Класифікація не враховує усі особливості і складнощі відомих конструкцій самоусмоктуючих мішалок [21-45], форму усмоктуючих пристроїв, які часто не вписуються ні в одну із описаних [20] груп тому що одночасно поєднують ознаки декілька таких груп.

Різноманітність конструкцій самоусмоктуючих мішалок свідчить про те, що існує ряд технологічних процесів, при проведенні яких звичайні барботажні газорідинні апарати виявляються недостатньо ефективними або зовсім непридатними для подібних реакцій. Це стимулює розробку нових конструкцій апаратів, у тому числі і самоусмоктуючих мішалок. В літературі відсутні надійні методи розрахунку таких мішалок і напрями конструювання таких мішалок, а також параметри оцінки їх ефективності.

Газова продуктивність або об'ємна витрата газу, що проходить через порожнисті канали самоусмоктуючих мішалок є параметром властивим тільки таким мішалкам. Отже, розрахунок цього параметра є найбільш істотним і першочерговим завданням гідродинамічного розрахунку газорідинних апаратів з самоусмоктуючими перемішуючими пристроями.

Усмоктування газу самоусмоктуючою мішалкою 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.

Утворення зони розрідження за кормовою частиною тіла, яке обтікається рідиною, повітрям або газом, або, навпаки, рухомого тіла в такому ж середовищі є однотипним і доведено [53-55] експериментально і обґрунтовано теоретично.

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. 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. 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.

Турбулентний стан рідини розташовується від точки переходу до точки відриву (теж деяка область). 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.

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 [56-60]. Режим обтікання лопаті мішалки в тангенціальному і радіальному напрямках не відрізняються.

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.

При обертанні самоусмоктуючих перемішуючих пристроїв в середовищі апарату об'ємного типу на рідину, що знаходиться перед лобовою поверхнею лопатей, діє відцентрова сила, яка спонукає утворення радіального потоку та створення циркуляційних вихрів в середині апарату [1-5].

Гідродинаміка руху рідини при обтіканні перешкод дуже добре описана в фундаментальних підручниках [60-70]. В [65-67] відмічають, що режим обтікання лопаті мішалки в тангенціальному і радіальному напрямках не відрізняються: радіальний перебіг середовища утворює зону розрідження біля торцевої частини лопаті, а тангенціальна течія утворює подібну зону за кормою лопаті. Будь-які інші дані, що стосуються механізму роботи самоусмоктуючих мішалок і метод розрахунку їх насосної газової продуктивності, в літературі не виявлені.

Крім турбінних самоусмоктуючих мішалок заслуговують на увагу перемішуючі пристрої роторно-струменевого типу [18-21], які використовуються в апаратах об'ємного типу в якості самоусмоктуючих мішалок. Описані мішалки працюють таким чином: під час обертання валу на рідину, що знаходиться в порожній ротору мішалки і лопатей діє відцентрова сила, що спонукає рідину рухатися від центру обертання до периферії. За рахунок нерозривності рідини на її місце заходить рідина з об'єму апарату, таким чином відбувається усмоктування перемішуючого

середовища. Сульфуратор [19], в якому самоусмоктуюча мішалка призначена для проведення газорідних реакцій представляє складну конструкцію, яка складається з об'ємної та плівкової частин. Вони представляють собою порожнистий ротор у вигляді перевернутого стакану, на утворюючій його поверхні розміщені порожнисті лопаті [18,20,21]. Інші самоусмоктуючі мішалки [19] такого типу відрізняються тільки незначним удосконаленням окремих елементів конструкції.

Перші спроби складання енергетичного балансу в площині вихідного отвору порожнистої лопаті за рахунок визначення залежності початкової або мінімальної частоти обертання самоусмоктуючої мішалки. Запропонований достатньо простий метод визначення коефіцієнту опору самоусмоктуючої мішалки з циліндричними лопатями та зроблена спроба на базі експериментальних даних описати методику розрахунку продуктивності самоусмоктуючих мішалок по газовій фазі, використовуючи рівняння Бернуллі.

Розроблені і впроваджені в виробництво в хімічній, нафтохімічній, біохімічній і інших технологіях самоусмоктуючі мішалки представляють собою різноманітні по конструкції пристрої, механізм усмоктування газу яких вимагає більш досконалого експериментального вивчення і теоретичного обґрунтування.

Більш детально розглянутий фізичний стан процесу усмоктування перемішувачами і експериментально обґрунтований механізм усмоктування газового реагенту через порожнисті циліндричні лопаті самоусмоктуючої мішалки [49-51], що ґрунтується на механізмі утворення зони розрідження за циліндричною лопаттю мішалки при обтіканні її перемішувачою рідиною. Проведені експериментальні дослідження по визначенню локального газовмісту в об'ємі, що знаходиться поблизу мішалки та визначена залежність локального і середнього газовмісту в апараті.

### 1.3 Газовміст перемішуючого середовища в апараті з мішалками

Однією з основних характеристик масообмінних реакторів впроваджених в системах газ-рідина є величина поверхні контакту фаз [71,72], яка пропорційна об'ємній долі бульбашок газу або газовмісту в двофазній системі. Ця величина не являється постійною, вона залежить від засобу введення газової фази в перемішуюче середовище, інтенсивності перемішування, геометричних розмірів апарату, фізичних властивостей системи та витрати газового компонента. Використання перемішуючих пристроїв в об'ємних апаратах з метою інтенсифікації масообміну особливо необхідне 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.

Основною характеристикою цієї двофазної системи є середній газозміст [73-84] перемішаного середовища, величина якого необхідна для розрахунків робочого об'єму апарату і витрат енергії на перемішування та розрахунків з визначення коефіцієнту масообміну.

При збільшенні частоти обертання мішалки стійкість розподілу апарату на зони порушується і при перевищенні частоти обертання вище критичної розподіл газу в об'єму апарату виявляється рівномірним. 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 перемішаного об'єму апарату.

Газозміст в об'ємі апарата за умови механічного перемішування залежить від фізико-хімічних властивостей компонентів, гідродинаміки і геометричних параметрів. 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 диспергування газу та збільшення газу відповідає деякому мінімальному рівню інтенсивності перемішування, який залежить від витрати газу, розмірів апарату і властивостей фаз.

Структура газорідинної суміші та величина газовмісту в апаратах з мішалками багато в чому залежить від інтенсивності перемішування, умов введення газу в зону реакції [72] та його витрати. В роботі [81] автори відмічають, що під час роботи дискової відкритої турбінної мішалки за кормовою частиною лопаті генеруються вихри, які значно впливають на акумуляцію газу в зоні перемішуючого пристрою. За припущеннями авторів створення пухиркового реактора з газовмістом 60-90% по об'єму дозволить вирішити дві наявні проблеми: а) в разі збільшити між фазну поверхню і як наслідок збільшити вихід продуктів реакції; б) досягти стехіометричного співвідношення компонентів необхідних для реагування вхідних продуктів. Коли інтенсивність перемішування перевищує поріг диспергування, основна маса газу диспергується у вигляді дрібних бульбашок, які рівномірно розподіляються спочатку в верхній частині апарату, а потім, при подальшому зростанні частоти обертання мішалки, розподіл між аеруємою та неаеруємою зонами зникає і увесь об'єм апарату заповнюється газорідинною сумішшю.

У разі введення газу в зону реакції через барботер або інші призначені для цього пристрої, що розташовані в апараті під мішалкою, при низькій інтенсивності перемішування практично не відбувається диспергування газу в перемішуємому середовищі, наряду з цим спостерігається підйом великих газових або повітряних бульбашок у центральній частині апарату. Початок



диспергування газу і збільшення газовмісту відповідає мінімальному рівню інтенсивності перемішування в апараті, яке залежить від кількості введеного газу, розмірів апарату та властивостей газу [88-90]. Автори відмічають, що діаметр бульбашок є фактично постійною величиною. У реальних умовах величина середнього питомого газовмісту в апаратах з механічними перемішувачами може скласти від 2-3 до 15-20%, яка зростає із збільшенням частоти обертання мішалки або питомої потужності (з розрахунку на одиницю об'єму газорідинної суміші), а також при підвищенні витрати газу. Для розрахунку середнього газовмісту використовується емпірична кореляція [2-4], яка враховує значення дисипації енергії на перемішування при певній частоті обертання і діаметр перемішувача, а також приведену швидкість руху газу в апараті.

При збільшенні частоти обертання стійкість поділу апарату на аеріруєму і неаеріруєму зону порушується, і при перевищенні деякого критичного значення частоти обертання весь обсяг апарату виявляється заповненим газорідинною сумішшю. Критичне 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. Оформлення процесів перемішування газорідинних систем є установка в апаратах відбивних перегородок [2]. 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. Це явище спостерігається в тих випадках, коли верхній край відбивних перегородок виступає над рівнем перемішуваної середовища.

У апаратах з відбивними перегородками в тих випадках, коли верхній край перегородок виступає над поверхнею перемішуваного середовища, відбувається мимовільне захоплення газу на поверхні середовища [75]. При відносно невеликій інтенсивності перемішування перемішувачий об'єм аерується (газується) у верхній частині апарату, але при більшій інтенсивності перемішування розподілений на зони об'єм руйнується [49].

У загальному випадку, для апаратів з примусовим введенням газу, що диспергується у барботажному шарі звичайними мішалками, дані параметри досліджувалися достатньо детально авторами [38,39]. Основною характеристикою, що визначає інтенсивність процесів масообміну при перемішуванні мішалками в системах газ-рідина, є величина поверхні контакту фаз, яка пропорційна кількості газових бульбашок в середовищі, що перемішується, і середньому діаметру цих бульбашок [25-75].

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.

У реальних умовах величина середнього питомого газовмісту може скласти від 2-3 до 15-20%, який зростає із збільшенням частоти обертання мішалки або питомої потужності (з розрахунку на одиницю об'єму суміші) і при підвищенні витрати 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 [82]. Запропонований також ряд кореляцій, що зв'язують газовміст безпосередньо з діаметром мішалки і частотою її обертання.

При цьому, енергія, що витрачається 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.

Питомий газовміст суміші повітря і рідини, перемішуваною самоусмоктуючою мішалкою (дані відносяться до апарату заввишки 1м, діаметром 0,36м, з мішалкою діаметром 0,045 і 0,09м) при постійній об'ємній витраті газу через мішалку, є величиною постійною, не залежною від висоти (об'єму) газорідної суміші, розташованої над мішалкою [52].

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].

Враховуючи, що в апаратах 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.

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

Потужність на перемішування є одним із важливих робочих параметрів мішалок є витрата енергії, що вводиться в перемішуємий об'єм, в залежності від конструктивних особливостей мішалок витрачається на створення

циркуляційного потоку та турбулізацію перемішуємого середовища. 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 перемішуємого 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 перемішуємого середовища. Залежить від типу мішалки, розмірів і конструкції апаратів, а також властивостей середовища.

У зв'язку з цим пропонується використовувати метод розрахунку потужності, як величину кутової швидкості мішалки помноженої на момент, який діє на лопаті .

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 [91-95]. Це прийнято враховувати виразом

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

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

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

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.

Розроблені і впроваджені в виробництво в хімічній, гідрометалургійній, біохімічній, харчовій і інших технологіях самоусмоктуючі мішалки представляють собою різні конструкції механічних пристроїв, механізм усмоктування газу якими вимагає більш досконалого експериментального вивчення і теоретичного обґрунтування.

### **1.5 Теорія роботи самоусмоктуючої мішалки**

Реактори зі швидкохідними перемішувачами 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 цих апаратах є несталою тривимірною турбулентною течією з вихровою структурою.

Коли в реакторі відбувається взаємодія між газом і рідиною використовують пристрої для подачі газу у вигляді барботерів різної конструкції. У той же час 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.

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

Гідродинаміка транзитного потоку усередині самоусмоктуючих мішалок має на своїй меті визначення коефіцієнта витрати при закінченні транзитного потоку через самоусмоктуючий перемішувачий пристрій, визначення залежності коефіцієнта витрати від конструктивних особливостей вхідного отвору, визначення насосної продуктивності мішалок і розробка нових конструкцій самоусмоктуючих мішалок, розробка гідродинамічного розрахунку таких мішалок.

Дослідження гідродинаміки в апаратах з самоусмоктуючими перемішувачими пристроями мають на меті визначення насосної продуктивності різних конструкцій мішалок та розробку методики, яка дозволить збільшити продуктивність самоусмоктуючих мішалок за рахунок зменшення гідродинамічних витрат транзитного потоку під час руху усередині мішалки.

В апараті, який заповнений на певну висоту рідиною, продуктивність самоусмоктуючої мішалки можлива в разі, коли перепад тиску  $\Delta p$  транзитного потоку, що знаходиться в порожнині мішалки, повинен бути більшим ніж сума опорів: опору гідростатичного стовпа рідини  $\Delta p_{GC} = \rho g H$  і опору руху транзитного потоку по каналах самоусмоктуючої мішалки  $\sum \Delta p_m$  [95].

$$\Delta p \geq \Delta p_{GC} + \sum \Delta p_m . \quad (1.5)$$

Перепад тиску, розглядаючи обертання мішалки в апараті, як рух лопаті із швидкістю  $v_r$  в рідині, яка має швидкість  $v_{жс}$ , знайдемо [88].

$$\Delta p = \psi \frac{\rho (\Delta v)^2}{2} , \quad (1.6)$$

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

Швидкість рідини біля мішалки, яка обертається, досить важко визначити, а різниця швидкостей пропорційна величині  $\Delta v = \pi d n$ , коефіцієнт пропорційності із коефіцієнтом опору мішалки можливо представити у вигляді коефіцієнта  $\xi$ , рівняння (1.6) буде мати вид [75]:

$$\Delta p = 0,5 \xi \pi^2 d^2 n^2 \rho \geq \rho g h . \quad (1.7)$$

При обертанні валу самоусмоктуючої мішалки в апараті в порожнині ротору і лопаті мішалки виникає перепад тиску - розрідження, яке визначається за формулою [75]:

$$\Delta p = 0,5\pi^2 n^2 d^2 \rho (1 - \varphi_0) \xi, \quad (1.8)$$

де  $n$  - частота обертання валу мішалки;

$d$  - діаметр самоусмоктуючої мішалки;

$\rho$  - щільність рідини;

$\varphi_0$  - газовміст в зоні лопаті мішалки;

$\xi$  - коефіцієнт опору лопатей мішалки.

Швидкість витікання транзитного потоку відповідно [103] дорівнює

$$v = \frac{1}{\sqrt{\alpha + \xi}} \sqrt{\frac{2\Delta p}{\rho}}. \quad (1.9)$$

Продуктивність самоусмоктуючої мішалки по газу в режимі самоусмоктування з урахуванням формули (1.8) дорівнює

$$V_p = \mu S_o \sqrt{\frac{2\Delta p}{\rho}} = \mu S_o \sqrt{\pi^2 n^2 d^2 \xi (1 - \varphi_0)}. \quad (1.10)$$

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



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

### **2.1 Алгоритм розрахунку апаратів з самоусмоктуючими перемішуючими пристроями**

Механічні перемішуючі пристрої складаються з трьох основних частин: власне з мішалки, валу і приводу. Мішалка є робочим елементом пристрою, що закріплюється на вертикальному, горизонтальному або на похилому валу. Привід може бути здійснений або безпосередньо від електродвигуна (для швидкохідних мішалок), або через редуктор або клинопасову передачу.

За високих швидкостей обертання мішалок перемішувана рідина залучається до кругового руху і навколо валу утворюється лійка, глибина якої збільшується із зростанням числа оборотів і зменшенням густини і в'язкості середовища.

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.

Об'єм реактору періодичної визначається однократною загрузкою реагентів. Тоді робочий об'єм буде дорівнювати:

$$V = \frac{G\tau}{\rho} \quad (2.1)$$

де  $G$  – продуктивність реактора по ключовому реагенту кг/с;

$\tau$  – середній час перебування реагентів в реакторі, с;

$\rho$  – щільність реагентів, кг/м<sup>3</sup>.

Для реактора змішування неперервної дії рівняння визначення об'єму реактору буде мати вигляд:

$$V = v_0\tau \quad (2.2)$$

де  $v_0$  - початкова витрата реагентів м<sup>3</sup>/с.

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

$$D = H = \sqrt[3]{\frac{V}{\pi}} \cdot \quad (2.3)$$

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

$$D = H = \sqrt[3]{\frac{V}{\pi \cdot m}} \quad (2.3)$$

Найбільш близькими до конструкції самоусмоктуючих мішалок є закриті турбінні мішалки. Діаметр самоусмоктуючої мішалки  $d_m$  дорівнює:

$$d_M = 1/3 \div 1/4 D_a. \quad (2.4)$$

Ширина лопаті

$$B = 1/5 \div 1/8 d_M, \quad (2.5)$$

розташування мішалки від днища

$$h = d_M \quad (2.6)$$

Енергетичний стан процесу усмоктування можна записати:

$$\Delta P_{\text{л}} \approx \Delta P_{\text{ГС}} + \Delta P_{\text{Г}}. \quad (2.7)$$

де  $\Delta P_{\text{л}}$  - перепад тиску за рахунок обтікання лопаті потоком рідини, Па;

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

$\Delta P_{\text{Г}}$  - гідравлічний опір валу і мішалки, Па.

Перепад тиску в середині мішалки і порожнистої лопаті визначається по формулі:

$$\Delta P_{\text{л}} = 0,5 \pi^2 n^2 d_M^2 \rho_B \xi_0. \quad (2.8)$$

Початкову частоту обертання мішалки  $n_0$ , при якій починається витік газових бульбашок з порожнистої лопаті в перемішуємий об'єм:

$$n_0 = \sqrt{\frac{2g(h_{\text{ГС}} + h_{\text{Г}})}{\pi^2 d_M^2 \xi_0}}. \quad (2.9)$$

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

$$w = \sqrt{\frac{2\Delta P_{\text{л}}}{\rho_{\text{л}}}}, \quad (2.10)$$

Тоді теоретична насосна продуктивність по газовій фазі самоусмоктуючої ежекційних мішалки  $V_{\text{Г}}$ , м<sup>3</sup>/с, складає

$$V_{\Gamma} \approx \lambda S_0 \sqrt{\frac{2\Delta P_p}{\rho_{\Pi}}} \approx \lambda S_0 z \pi d_M \sqrt{(n^2 - n_0^2) \xi_0}. \quad (2.11)$$

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

$z$  - число лопатей мішалки.

Насосна продуктивність самоусмоктуючої ежекційної мішалки з плоскими порожнистими лопатями і ежекційною перегородкою:

по газовій фазі

$$\frac{V_{\Gamma}}{nd_M^3} = 0.03 \cdot \sin \alpha^{1.5} \cdot \left(\frac{a}{b}\right)^{0.5} \cdot \left(\frac{h}{d_M}\right)^{-0.9} \quad (2.11)$$

і рідині

$$\frac{V_P}{nd_M^3} = 0.0033 \cdot \left(\frac{a}{b}\right). \quad (2.12)$$

Середній газоміст перемішуючого середовища в апараті об'ємного типу з самоусмоктуючою ежекційною мішалкою визначається

$$\bar{\varphi} = 0.21(n - n_0)^{1.8} \cdot d^{1.5} \left(\frac{b}{d_M}\right)^{0.1} \cdot \left(\frac{H}{D_A}\right)^{0.6}. \quad (2.13)$$

Знаючи насосну продуктивність  $V$ , площі поперечного перетину для кожної з фаз та початкову частоту обертання, при якій починається виток газу можна визначити діаметр мішалки.

Приведена методика дозволяє провести гідродинамічні розрахунки апаратів для проведення абсорбції важкорозчинних газів та реакторів для проведення екзотермічних газорідинних реакцій.

## 2.2 Висновки та рекомендації щодо розрахунку апаратів об'ємного типу з самоусмоктуючими перемішуючими пристроями

1 В залежності від типу хімічної реакції, кількості реагентів та продуктів реакції визначаються матеріальні потоки.

2 Визначаються основні фізичні властивості речовин та їх сумішей.

3 Виконується розрахунок кінетичних характеристик стадії хімічних перетворень. На основі яких визначається одна з розрахункових величин – час хімічної реакції –  $\tau$ .

4 В результаті аналізу особливостей даного типу хімічної реакції обирається апаратне оформлення у вигляді одного апарату з мішалкою, каскаду реакторів і т.д.

5 Після визначення специфічних та конструктивних технологічних особливостей обраного типу реактора загальне характеристичне рівняння матеріального балансу перетворюється в характеристичне рівняння, що відповідає типу реактора.

6 В реакторах з перемішуючими пристроями обирають тип мішалки. Від правильності обраної мішалки залежить технологічний та тепловий розрахунок реактора.

7 В залежності від в'язкості, концентрації, температури та інших фізико-механічних впливів середовища визначають число обертів обраного типу мішалки. В цей же час розраховується потужність, що витрачається на перемішування.

8 Тепловий розрахунок полягає в складанні загального характеристичного рівняння реактора. Після визначення основних теплових параметрів проводиться аналіз стабільності роботи реактора по тепловому режиму та встановлюються оптимальні робочі температури.

9 Під час конструктивного розрахунку визначаються основні розміри апарату та перемішуючого пристрою.

10 Розрахунок на міцність є заключним етапом комплексного розрахунку реактора. Необхідно розуміти, що при виборі конструкційних матеріалів для хімічних реакторів та допоміжного обладнання, сам матеріал не впливає на хімічний процес в об'ємі реактора, але може значно впливати на процеси переносу тепла.

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.

При вирішенні задачі вибору апарата необхідно провести системний аналіз впливу цих факторів.

## РОЗДІЛ 3. ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНА ЧАСТИНА

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

Для визначення впливу основних геометричних форм та параметрів самоусмоктуючих мішалок на їх насосну продуктивність по газовій фазі та рідині на експериментальних стендах були проведені гідродинамічні випробування самоусмоктуючих мішалок с кутом скосу кромки 90 градусів, загальний вид якого зображено на рисунках 3.1 та 3.2.

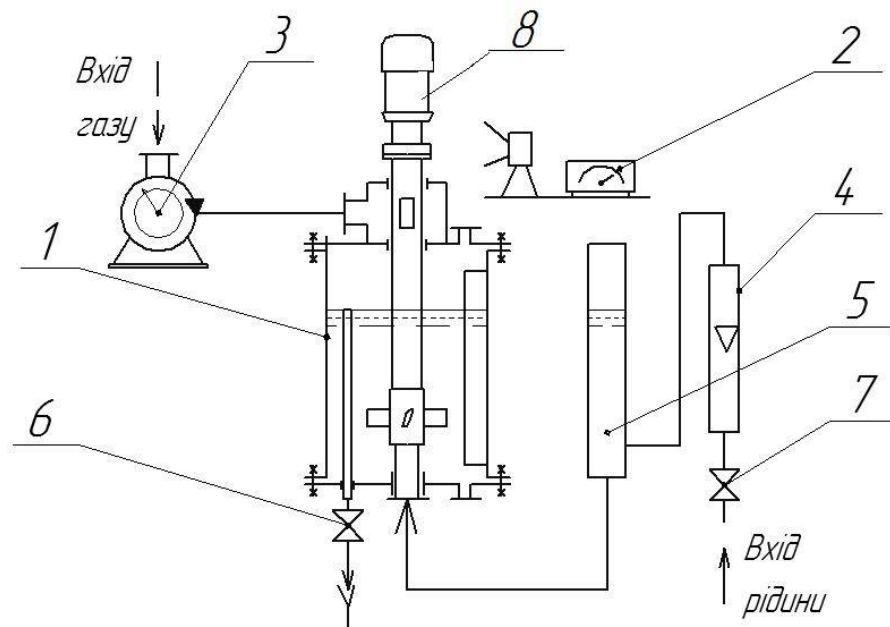


Рисунок 3.1 – Схема експериментального стенда для проведення гідродинамічних випробувань в апараті об'ємного типу з самоусмоктуючими ежекційними мішалками: 1 – апарат об'ємного типу з самоусмоктуючою мішалкою; 2 – електронний стробоскопічний тахометр; 3 – газовий лічильник; 4 – ротаметр для рідини; 5 – проміжний прозорий стакан; 6 – кран; 7 – регулюючий вентиль; 8 – електродвигун.

Схема експериментального стенду (рисунок 3.1) включає в себе апарат об'ємного типу 1 з самоусмоктуючою мішалкою з кутом скосу вхідної

кромки  $90^\circ$ , електронний стробоскопічний тахометр 2 для контролю частоти обертання валу мішалки, газовий лічильник 3, ротаметр 4 та проміжний прозорий стакан 5, призначений для вимірювання кількості рідини, що усмоктується мішалкою, кран 6, призначений для включення роботи апарату в періодичному або безперервному режимі по рідині та регулюючий вентиль 7, який дозволяє підтримувати рівень води в проміжному стакані 5 таким, що дорівнює висоті газорідної суміші в апараті 1. Обертання валу самоусмоктуючої мішалки забезпечувалося за допомогою електродвигуна постійного току 8, який дозволяє регулювати частоту обертання в широкому діапазоні частот.

Для контролю продуктивності самоусмоктуючої мішалки з кутом скосу вхідної кромки  $90$  градусів по рідині кран 6 переводиться в положення «відкрито», яке відповідає роботі апарату в безперервному режимі, забезпечуючи відведення із об'єму апарату надлишку рідини через переливну трубку і, як наслідок, зберігати її постійний рівень в апараті. В схемі експериментальної установки передбачено проведення опитів в режимі безпосередньої подачі рідини в нижню циліндричну частину самоусмоктуючої мішалки. Для цього конструкцією апарату було передбачено використання спеціального ущільнення, яке запобігає попаданню води з напірного стакану 5 в об'єм, що перемішується.

Модель об'ємного апарату (рисунок 3.2) представляє собою вертикальний циліндричний посуд 1, виконаний з органічного скла, з плоскими днищем 2 та кришкою 3.



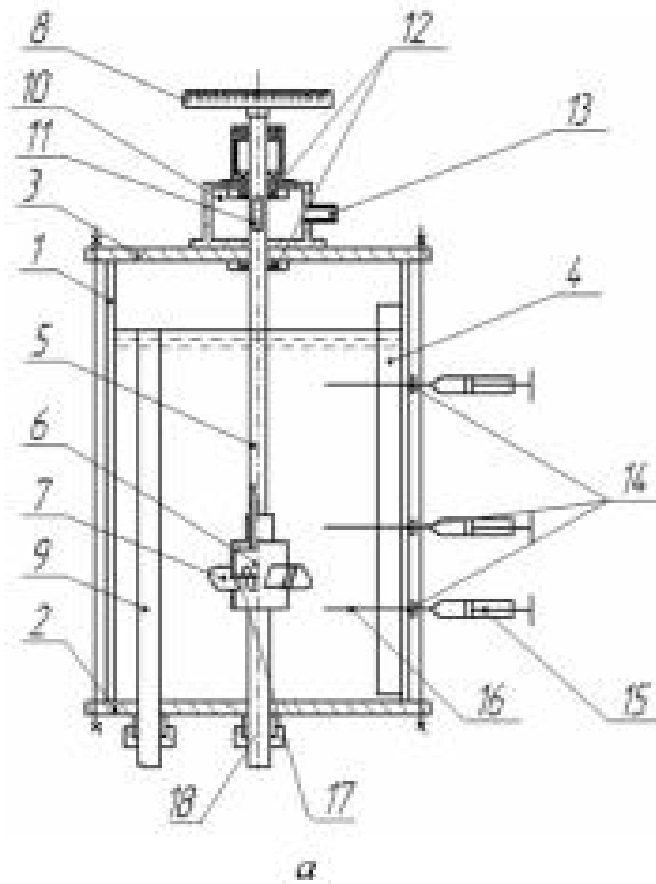


Рисунок 3.2 – Лабораторна модель об'ємного апарату з самоусмоктуючою мішалкою:

1 – вертикальна циліндрична обичайка із органічного скла; 2 – днище;  
 3 – кришка; 4 – відбивна перегородка; 5 – порожнистий вал; 6 – самоусмоктуюча мішалка; 6.1 – ротор самоусмоктуючої мішалки; 6.2 – маточина; 7 – порожнисті лопаті; 8 – пристрій для вимірювання потужності;  
 9 – переливна трубка; 10 – розподільча коробка; 11 – вхідний отвір в порожнистий вал; 12 – гумові манжети; 13 – штуцер подачі повітря; 14 – пробовідбірник; 15 – шприц; 16 – капілярна трубка; 17 – ежекційна перегородка; 18 – патрубок для подачі рідини.

Дослідна модель самоусмоктуючої мішалки 4 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 4 шириною 0,1 діаметра апарату. На кришці 3 апарату укріплена розподільча камера 10, яка складається з циліндричної оболонки з штуцером для подачі повітря 13. 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 ізольована від зовнішнього середовища і апарату за допомогою гумових манжетів 12. В зоні розподільчої камери 13 вал 5, його трубна частина має отвори 11 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 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 6. 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 9, закріплена в днищі апарату. В процесі експерименту визначалася висота поверхні газорідинної суміші над рівнем мішалки без обертання і при різних числах оборотів. В результаті

диспергування газової фази в перемішувачій об'єм відбувається збільшення об'єму газорідної суміші в апараті.

Таблиця 3.1 - Діапазон вимірювання параметрів експериментальної установки

| Параметри   | Діапазон вимірювання                 |
|---|--------------------------------------|
| Діаметр апарату, $D$ , м                            | 0,15 – 0,4;                          |
| 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, $d_o$ , 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 входної кромки в порожнисту лопать, град. | $90^\circ$                           |
| 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

Самоусмоктуючі мішалки представляють собою перемішуючі пристрої виконані у вигляді циліндричного порожнистого ротору, на утворюючій поверхні якого профрезировані циліндричні отвори певного діаметру або щілинні канали.

Самоусмоктуюча мішалка [11-19], 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.

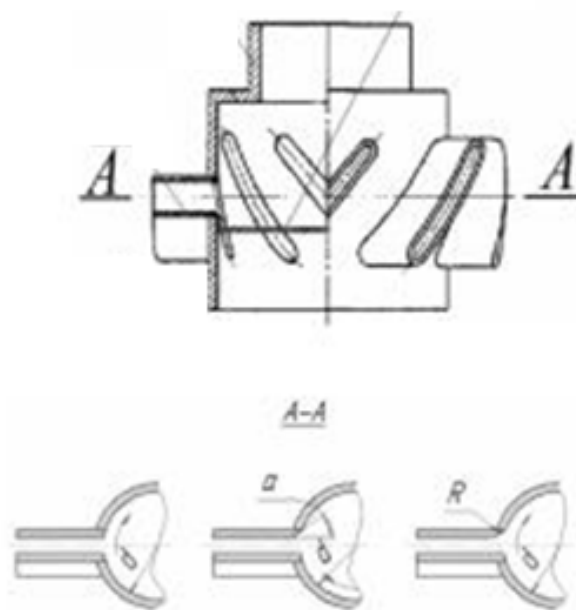


Рисунок 3.3 - Самоусмоктуюча мішалка

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.

### **3.2 Методика дослідження продуктивності самоусмоктуючої мішалки з кутом скосу вхідної кромки 90°**

Експериментальна установка працює таким чином. Змонтовану модель апарату (рисунок 3.2) із встановленою випробовуваною самоусмоктуючою мішалкою (рисунок 3.3) приєднали до комунікацій експериментального стенду (рисунок 3.1).

Для проведення випробувань в безперервному режимі подачі рідини в об'ємному апараті 1 (рисунок 2.1) на переливній трубці відкривався кран 6, патрубок подачі рідини 18 (рисунок 2.3) забезпечувався торцевим ущільненням, яке дозволяло потрапляння рідини з проміжного стакану 5 (рисунок 2.1) в об'єм апарату тільки через порожнини лопатей мішалки. Експериментальний стенд заповнювався рідиною, висота якої регулювалася висотою установки переливної трубки, при цьому рівень рідини в апараті 1 і проміжному стакані 5 був однаковий. Під час обертання самоусмоктуючої мішалки, на рідину, що знаходиться всередині, діє відцентрова сила, за допомогою якої рідина переміщується від осі обертання до периферії порожнистих лопатей і далі потрапляє в об'єм апарату. За рахунок нерозривності потоку, рівень рідини в проміжному стакані 5 зменшується, для його підтримки на раніше встановленій висоті, відкривали лінію подачі рідини за допомогою регулюючого вентиля 7. Об'єм поданої рідини визначали за допомогою ротаметра 4. Надлишок води з апарату витікав через переливну трубку 9.

При певній частоті обертання самоусмоктуючої ежекційної мішалки проводили 5-7 замірів висоти газорідинної суміші, далі середньозважені дані заносили в таблиці та визначали середній газовміст перемішуючого середовища в апараті по формулі [1]

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

Відхилення частоти обертання від середнього значення складало не більше 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 лопатей 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 перемішуваній рідині - газозмісту.

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

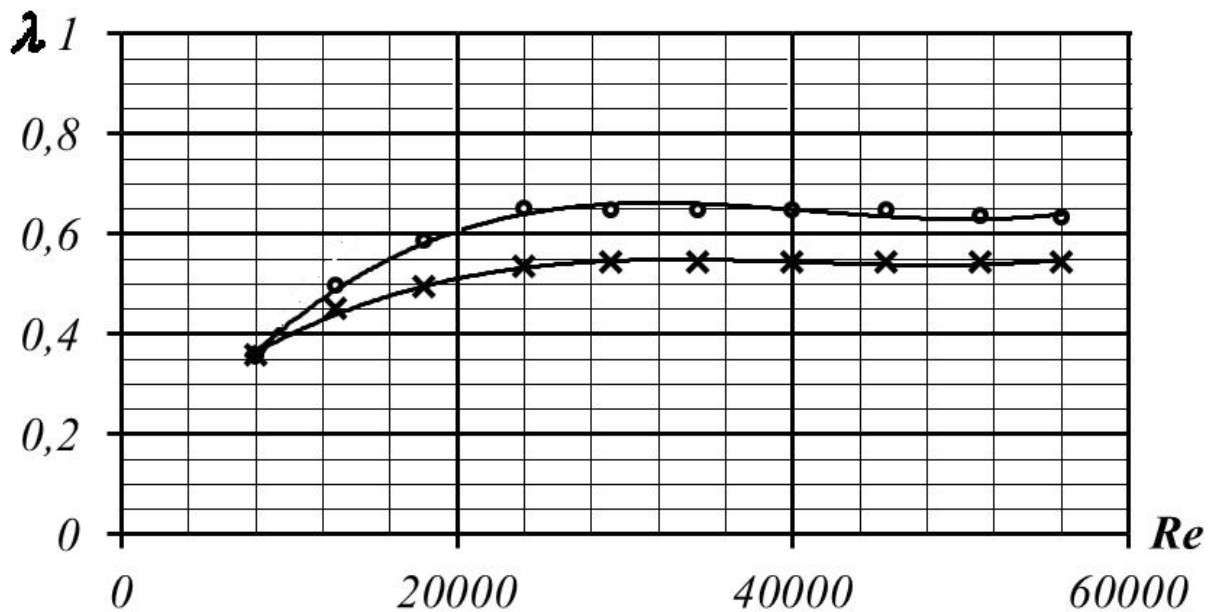


Рисунок 3.4 – Графік залежності коефіцієнта витрати вертикальної щілини з різним кутом скосу однієї кромки від числа Рейнольдса:

o – пряма вхідна кромка  $90^{\circ}$ ; x – пряма кромка циліндричного отвору

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.

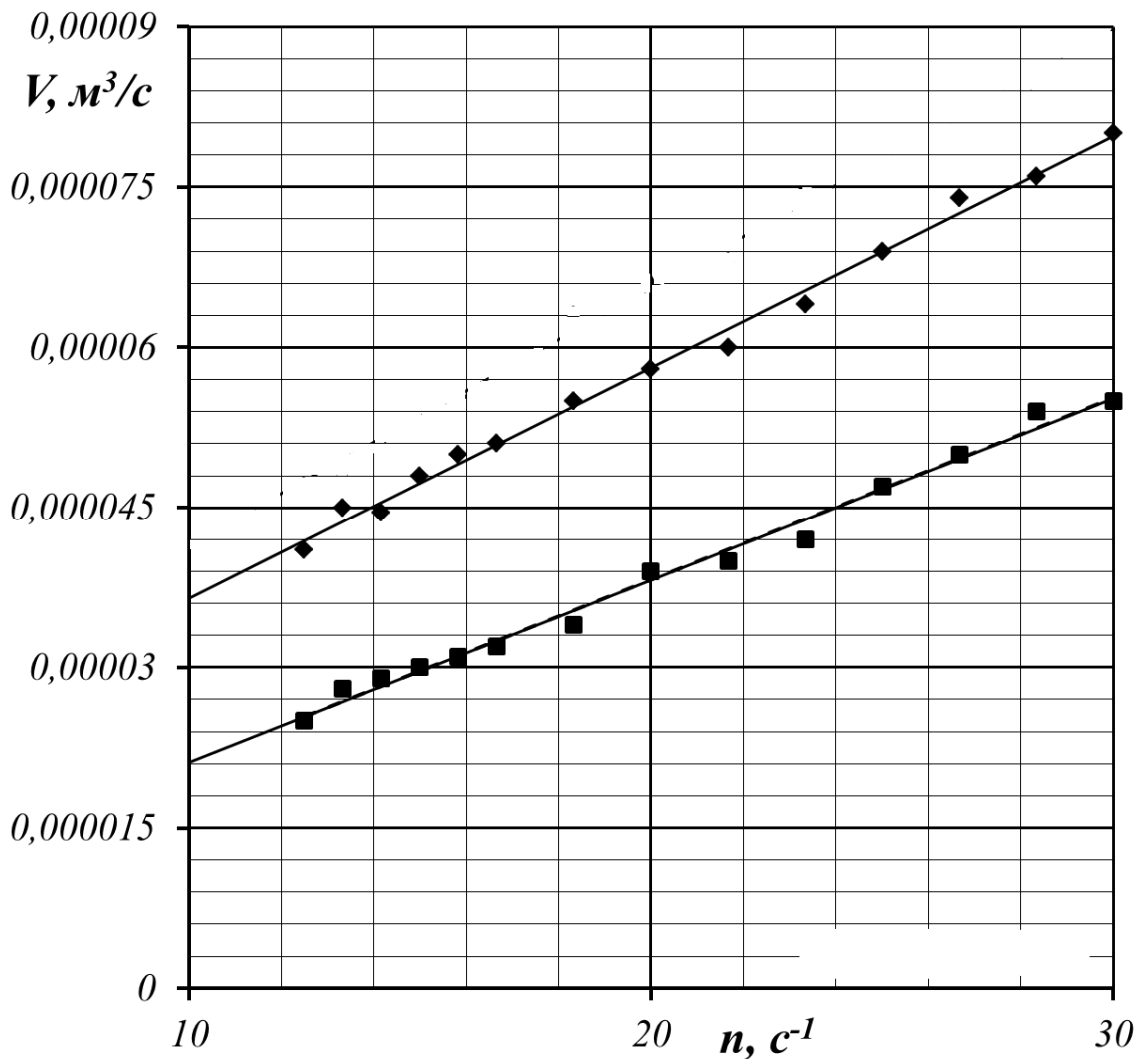


Рисунок 3.5 – Залежність насосної продуктивності самоусмоктуючої мішалки  $d = 0,1$  м по рідині від частоти обертання при різних перетинах порожнистої лопаті: ■ – циліндричний перетин порожнистої лопаті; ◆ - щілинний перетин порожнистої лопаті.

Удосконалення самоусмоктуючих мішалок з щілинними порожнистими лопатями, з метою збільшення насосної продуктивності за рахунок зміни величини коефіцієнту витрати під час руху транзитного потоку в середині мішалки, яке полягає в зміні конфігурації вхідної кромки щілинного отвору на вході в порожнину лопаті. Вхідний щілинний отвір зі сторони лобової поверхні лопаті мав скіс вхідної кромки  $60^{\circ}$ . Отримані експериментальні дані з насосної продуктивності по рідині були порівняні з



насосною продуктивністю по рідині геометрично подібних мішалок з прямими вхідними кромками (рисунок 3.5). Внаслідок обробки експериментальних даних було отримане рівняння по визначенню коефіцієнта витрати залежно від величини кута скосу вхідної кромки.

Проведені випробування таких самоусмоктуючих мішалок і отримані результати показують, що зміна конфігурації перетину порожнистої лопаті впливає на продуктивність самоусмоктуючої мішалки по газовій фазі.

Особливості проведення певних газорідних реакцій вимагає створення специфічних засобів, які приводять до зміни конструкції самоусмоктуючих мішалок шляхом зміни кута скосу вхідної кромки лопатей та установки в середині порожнистого ротору перегородки (рис. 3.6).

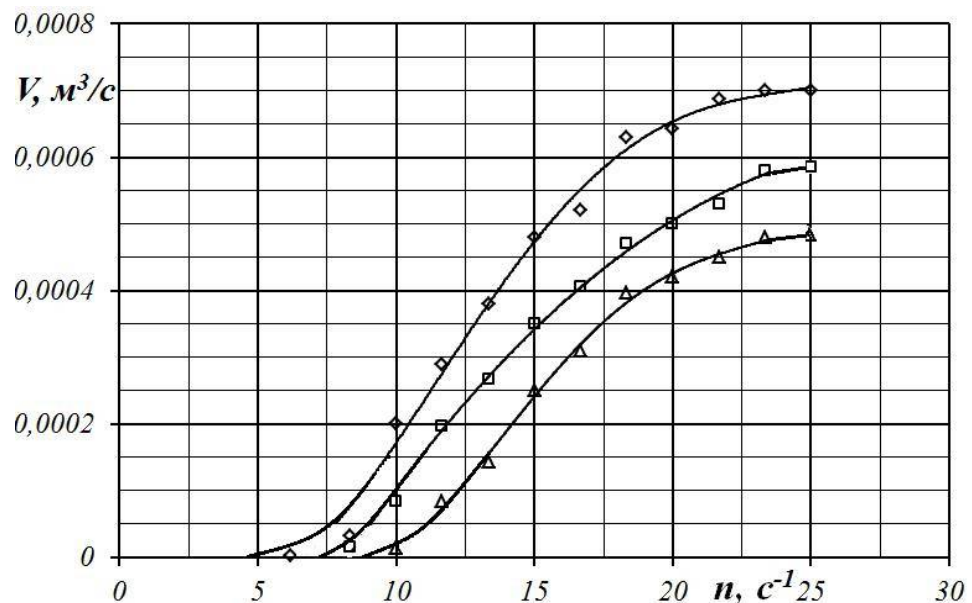


Рисунок 3.6 – Залежність насосної продуктивності самоусмоктуючої ежекційної мішалки  $d_m=0,1$ м при глибині занурення 0,24м по газовій фазі від кута нахилу порожнистої лопаті;  $\diamond \alpha=90^\circ$ ;  $\square - \alpha=60^\circ$ ;  $\Delta - \alpha=45^\circ$ .

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

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

Основною характеристикою масообмінних апаратів з механічними перемішувальними пристроями для процесів в системі газ-рідина є газовміст перемішувального середовища, величина якого необхідна для визначення об'єму апарату та розрахунку витрат потужності на перемішування.

Середній газовміст в апараті визначали по збільшенню висоти газорідинної суміші під час роботи самоусмоктуючої мішалки за допомогою рівномірно розмішених по колу обичайки трьох міліметрових лінійок, а для визначення локального газовмісту в певних точках вертикального перетину апарату використовували медичні шприці об'ємом 20 см<sup>3</sup>.

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%.

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 3.7).

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

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

де  $V_p^{III}$  - об'єм рідини в середині шприца, см<sup>3</sup>.

В період випробувань при фіксованій частоті обертання мішалки також проводили замір локального газовмісту  $\varphi_0$  в певних точках вертикального перетину об'єму апарата та біля порожнистих лопатей самоусмоктуючої ежекційної мішалки. Відбір газорідинної суміші проводили через розташовані на циліндричній обичайці апарату пробовідбірники 14 за допомогою медичного шприцу 11 об'ємом  $20 \text{ см}^3$ , сполученого із зондом. Зонд представляє собою трубку діаметром  $3 \text{ мм}$  з внутрішнім діаметром  $1,8 \text{ мм}$  з можливістю осьового переміщення. Попередні випробування по визначенню впливу швидкості відбору проби за допомогою шприця показали, що середнє значення локального газовмісту в середині шприця не залежить від швидкості руху поршня.

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  $15\text{-}20 \text{ об/с}$ .

Аналіз отриманих даних під час проведених досліджень середнього та локального газовмісту в апараті з самоусмоктуючою мішалкою підтверджує раніше отримані висновки [101], що між локальним газовмістом  $\varphi_0$  в кільцевому об'ємі, який утворюється лопатями мішалки, і середнім газовмістом  $\bar{\varphi}$  існує залежність, описана рівнянням

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

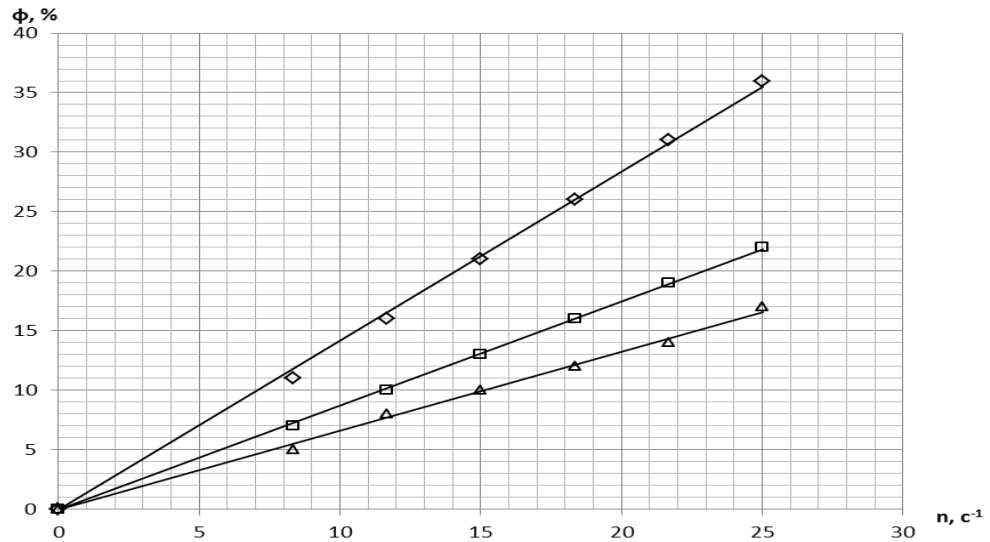


Рисунок 3.7 - Залежність середнього газовмісту  $\bar{\varphi}$  в апараті з самоусмоктуючою мішалкою від числа обертів при різних глибинах занурення

◇ - глибина занурення мішалки 0,12 м; □ - глибина занурення мішалки 0,18 м; Δ - глибина занурення мішалки 0,24 м.

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

Транзитний потік води і повітря в порожнині ротору самоусмоктуючої мішалки повторює рух, аналогічний руху, який описується в гідравліці [102] в розділі «витікання рідини через отвори і насадки». Основним питанням даного розділу є визначення швидкості витікання і витрати рідини для різних форм отворів та насадок.

Для вивчення гідродинаміки витікання рідини та визначення коефіцієнту витрати  $\mu$  були виготовлені лабораторні моделі пристроїв

(рисунок 3.8 і 3.9), 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.

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.

Лабораторні моделі пристроїв були поділені на два типи: перший тип моделей мав циліндричні або прямокутні отвори (рисунок 3.8), другий – на утворюючій поверхні мав вертикальні прямокутні щілини з розміром, рівним перетину лопаті в лабораторній моделі самоусмоктуючої мішалки (рисунок 3.9). Їх для випробувань вмонтовували в експериментальну установку (рисунок 3.7), 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.

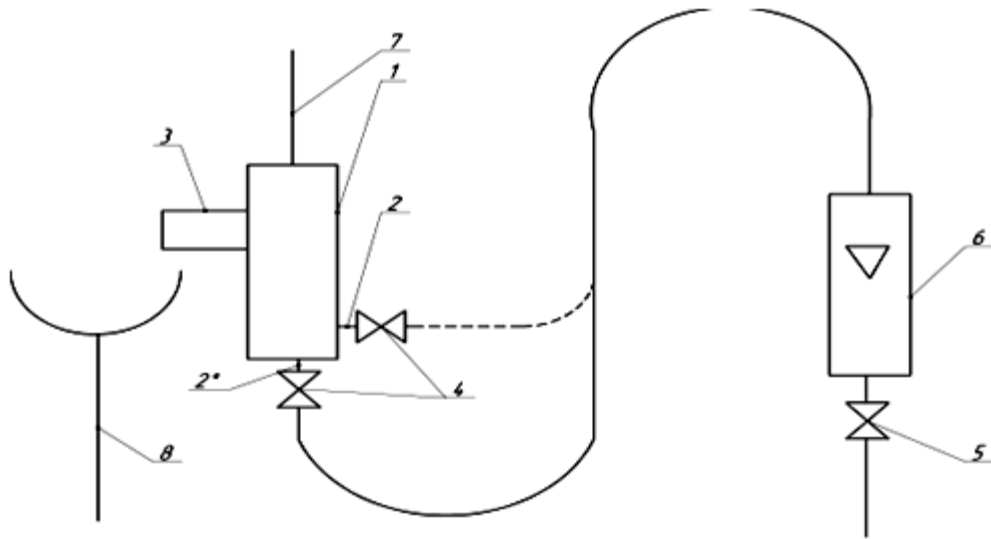


Рисунок 3.7 – Схема експериментальної установки для проведення дослідження гідродинаміки витікання рідини через насадок, який є копією лопаті мішалки:

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

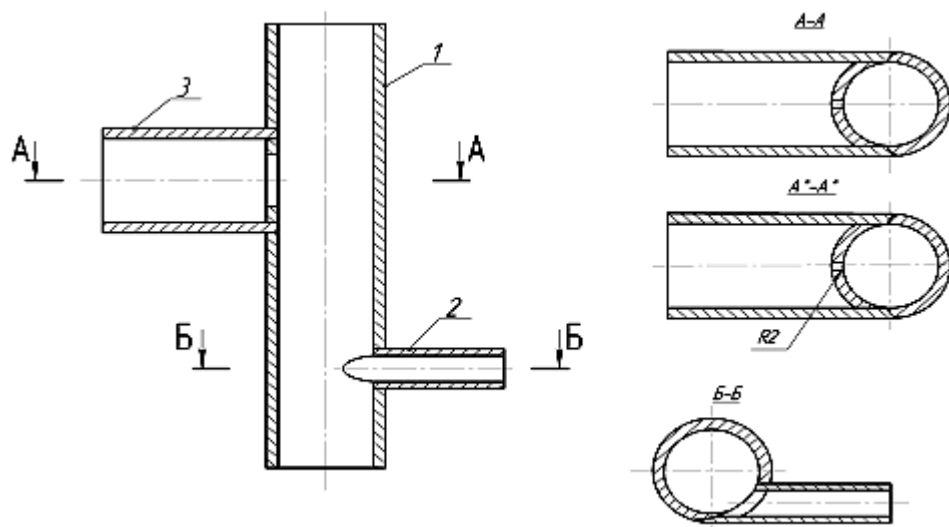


Рисунок 3.8 – Модель пристрою, для вивчення процесу витікання рідини із отвору в боковій поверхні трубки

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

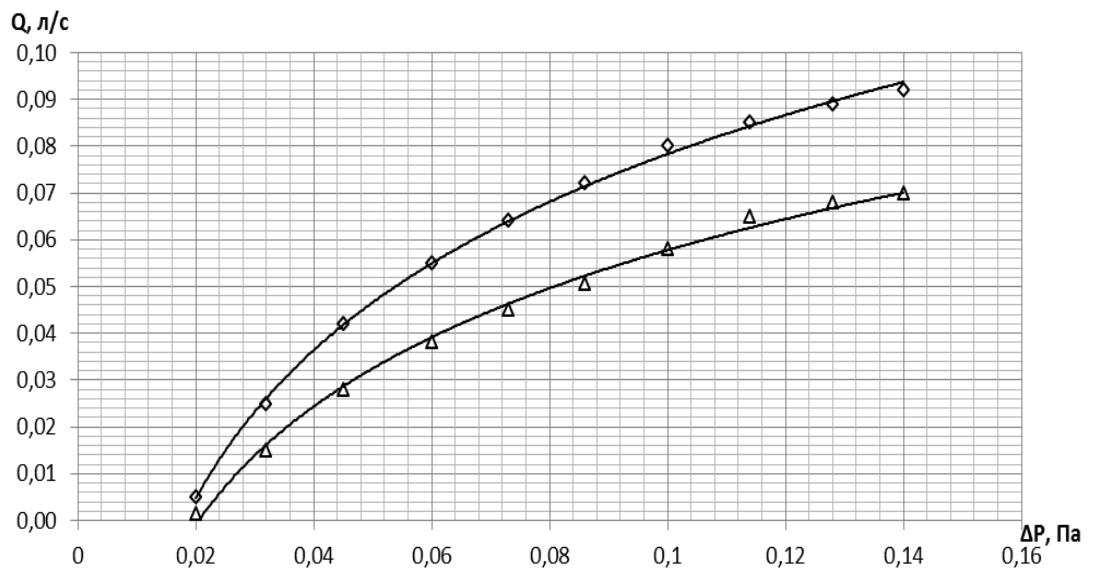


Рисунок 3.10 - Характеристика витікання рідини через вертикальний щілинний отвір при осьовій подачі рідини:

◇- вертикальна щілина отвору; Δ - порожниста лопать круглого перетину

Також було відмічено, що турбулентність та пульсація рідини, що подається, впливає на якість вимірюваних показників. Тому для вирівнювання швидкості руху рідини в середині трубки та зменшення впливу пульсацій потоку в низ трубки помістили струменевий вирівнювач у вигляді сітки.

Аналіз отриманих даних показує, що спосіб подачі рідини в випробовуваний пристрій впливає на результати витікання рідини: при осьовій подачі коефіцієнт витрати для моделей пристроїв з прямими кромками менше, ніж для моделі із зміненою конфігурацією кромки. Тому подальші випробування будуть проводитися тільки при осьовій подачі рідини в лабораторний пристрій. Приведені дані свідчать про те, що коефіцієнт витрати значною мірою залежить від конфігурації вхідного отвору.

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

На цьому етапі проводили дослідження моделей пристроїв з вмонтованими щілинними насадками.

На лабораторному стенді проводили випробування щілинних насадок з метою визначення залежності витрати води від надлишкового тиску (рисунок 3.11). Лабораторний пристрій сконструйований таким чином, що дозволяє приєднувати по черзі щілинні насадки з різними конфігураціями вхідних отворів. Насадки виготовлені з внутрішнім перетином 4 мм x 20 мм, рівним перетину порожнистих лопатей лабораторної моделі самоусмоктуючої мішалки.

Для цього було виготовлено чотири типи різних моделей щілинних насадок, які відрізняються тільки по конфігурації.

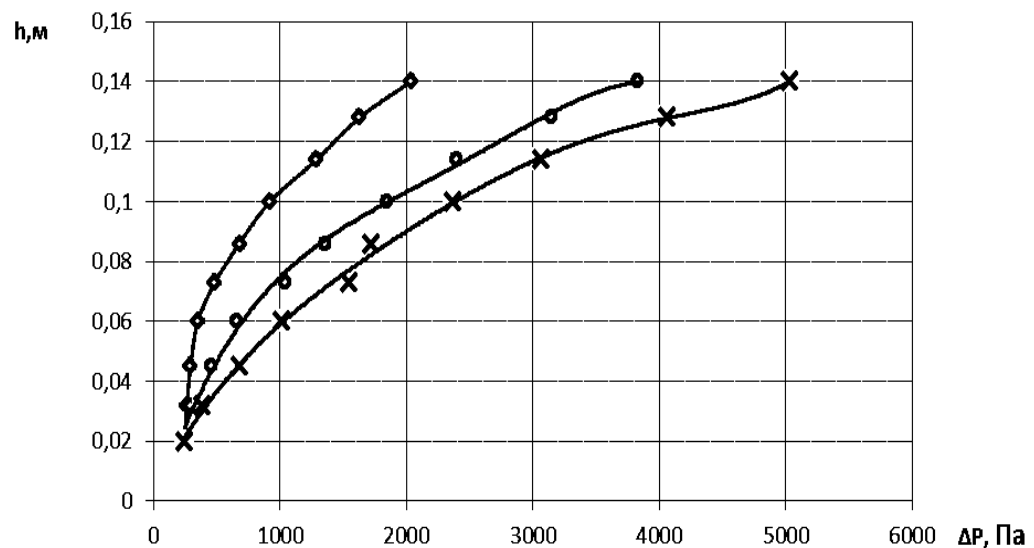


Рисунок 3.11 – Характеристика витікання рідини через вертикальний щілинний отвір при осьовій подачі рідини

◇ - щілинний перетин лопаті; ○ – циліндричний перетин лопаті; х – циліндричний перетин лопаті, скошена вхідна кромка (кут скошу менше 90°)



Результати випробувань заносилися в таблиці 2.5 і представлені у вигляді графічних залежностей (рисунок 3.11).

Отримані дані під час випробувань представлені у вигляді графічної залежності (рисунок 3.12)

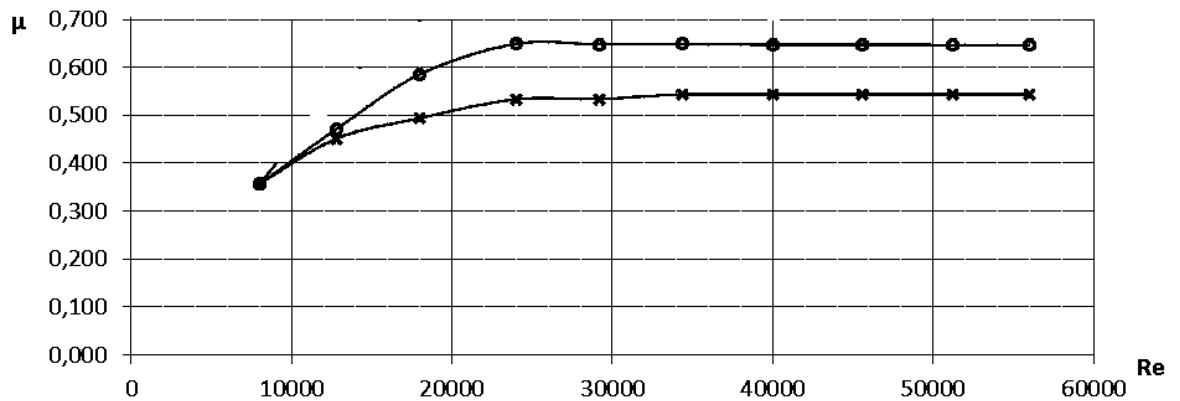


Рисунок 3.12 - Графік залежності коефіцієнта витрати вертикальної щілини з різною конфігурацією від числа Рейнольдса:

o – щілинний перетин лопаті; x – циліндричний перетин лопаті

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 трубі лабораторного пристрою, досягається більша продуктивність транзитної рідини.

Аналіз отриманих даних при лабораторних дослідженнях показав, що витікання рідини через щілинний отвір з скошеною кромкою значно вище, ніж з прямокутними кромками. При чому кут скосу впливає на продуктивність транзитного потоку [107,108].

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**

Збільшення насосної продуктивності по газу (збільшення об'єму транзитного потоку) самоусмоктуючої мішалки можливе в разі збільшення діаметру і числа обертів мішалки або за рахунок удосконалення гідродинаміки руху транзитного потоку по внутрішніх каналах мішалки тобто збільшення коефіцієнту витрати  $\mu$ . Це дає можливість проводити випробування на моделі частини корпусу самоусмоктуючої мішалки керуючись методикою [103-105].

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 можна визначити по формулі

$$Q = v_{\phi} f \cdot z, \quad (3.7)$$

або

$$Q = \mu \cdot f \sqrt{\frac{2\Delta p}{\rho}} \quad (3.8)$$

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

$f$  - площа перетину полої лопаті;

$z$  - кількість лопатей самоусмоктуючої мішалки.

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  $f$

$$\varepsilon = \frac{f_c}{f}. \quad (3.9)$$

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

$$Q = v_c \cdot f_c = \varepsilon \cdot \varphi \cdot f \sqrt{2 \cdot g \cdot H}, \quad (3.10)$$

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

$$Q = \mu \cdot f \sqrt{2 \cdot g \cdot H}, \quad (3.11)$$

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

Знаючи насосну продуктивність лабораторної моделі самоусмоктуючої мішалки та її геометричні параметри, із формули (3.11) можна вирахувати коефіцієнт витрати потоку  $\mu$  аналогічно методики, при якій вираховували коефіцієнт витрати під час витікання рідини із резервуара через бокову насадку

$$\mu = \frac{Q}{f \sqrt{2gH}}, \quad (3.12)$$

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

$H$  - напір витоку 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>.

Коефіцієнт витрати рідини  $\mu$  і швидкості  $\varepsilon$  в загальному випадку визначаються дослідним шляхом, а коефіцієнт швидкості  $\varphi$  вираховується по формулі

$$\varphi = \frac{1}{\sqrt{\alpha + \zeta}}. \quad (3.13)$$

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.

Враховуючи вище описані випробування та теоретичні викладки можна зробити висновок, що зміна конфігурації вхідного отвору в лопать самоусмоктуючої мішалки, аналогічно з проведеними випробуваннями,

дозволить збільшити насосну продуктивність. Визначений коефіцієнт витрати  $\mu$  експериментальних мішалок, а також проведені пробні випробування і порівняння отриманих характеристик експериментальних мішалок з базовою самоусмоктуючою мішалкою дають підставу про підвищення ефективності експериментальних мішалок. Збільшення коефіцієнта витрати для самоусмоктуючих мішалок дозволить збільшити продуктивність транзитного потоку в режимі самоусмоктування без зміни основних параметрів: збільшення частоти обертання і діаметру мішалки.

## РОЗДІЛ 4. ЗАСТОСУВАННЯ ЗАПРОПОНОВАНИХ КОНСТРУКЦІЙ САМОУСМОКТУЮЧИХ ПЕРЕМІШУЮЧИХ ПРИСТРОЇВ

Останніми роками в багатьох країнах із розвиненим сільським господарством велику увагу приділяють раціональному використанню азотних добрив. Достатня кількість азоту в ґрунті необхідна для нормального росту і розвитку рослин. У перерахунку на суху масу вміст азоту в рослинах становить від 1 до 5%. Цей елемент у рослинному організмі входить до складу найважливіших біологічних сполук: амінокислот, білків, нуклеїнових кислот. Також значна кількість вітамінів міститься у своєму складі азот, крім того, він входить до складу молекул хлорофілу

Азотні добрива поділяють на аміачні, що містять азот у вигляді катіону  $\text{NH}_4^+$ , нітратні, що містять азот у вигляді аніону  $\text{NO}_3^-$ , аміачно-нітратні та амідні, в яких азот знаходиться у формі  $\text{NH}_2$ -групи.

Усі азотні добрива водорозчинні, добре засвоюються рослинами, проте швидко вимиваються з ґрунті дощами або при зрошенні з рівня кореневої системи рослин глибше в ґрунт. На частку карбаміду та нітрату амонію припадає більше 60 % від загального виробництва азотних добрив, тому їх розглянуто детальніше. Властивості нітрату амонію та карбаміду впливають на технологічний процес їх отримання та економіку використання.

Нітрат амонію (аміачна селітра) — кристалічна речовина, добре розчинна у воді, а також гігроскопічна, тобто легко поглинає вологу з атмосферного повітря, а залежно від температури може існувати в п'яти кристалічних модифікаціях, що розрізняються структурою кристалів. Унаслідок високої розчинності у воді, гігроскопічності та через поліморфні модифікації, що супроводжуються виділенням тепла, добриво легко злежується, що призводить до ускладнень під час використання. Щоб запобігти вказаним недолікам, нітрат амонію слід зберігати за температури, нижчої  $32^\circ\text{C}$ , випускати в гранульованому вигляді з обробкою гранул

речовинами, що утворюють гідрофобну плівку, а також вводити добавки, які перешкоджають поліморфним перетворенням.

Водні розчини карбаміду стійкі тільки до 80°C, а за вищої температури розкладаються, що виключає можливість випаровувати такі розчини за атмосферного тиску.

Основою системи технології виробництва аміачної селітри є нейтралізація азотної кислоти газоподібним аміаком.

Процес нейтралізації азотної кислоти аміаком є незворотним, гетерогенним, екзотермічним, хемосорбційним процесом, що відбувається в дифузійній області, і швидкість його обмежується дифузією аміаку з газу до поверхні рідини.

Аміак, який не вступив в реакцію з азотною кислотою у донейтралізаторах, надходить у скруббер-нейтралізатор. Насадка скрубера-нейтралізатора обприскується закисленим розчином з баку, очищена у скруббері-нейтралізаторі сокова пара надходить у промивний скруббер.

Пропонується використовувати нові розроблені конструкції самоусмоктуючих перемішуючих пристроїв на стадії нейтралізація азотної кислоти газоподібним аміаком. Лабораторні випробування показали свою ефективність та більшу продуктивність для проведення газорідних реакцій у порівнянні з барботажними апаратами.

Застосування самоусмоктуючих мішалок дозволить скоротити витрату газового реагенту (аміак), а також спростити технологічні схеми для проведення цих процесів.

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

На підприємствах хімічної промисловості знайшли широкого вжитку апарати, що працюють під тиском.

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

Конструкція апаратів повинна забезпечувати безпеку при експлуатації та передбачати можливість огляду, очищення, промивки, продувки та ремонту апарата.

Зварні шви апаратів виконуються тільки стиковими. Сварні шви в тавр допускаються для приварювання плоских днищ, фланців, трубних грат, штуцерів. Отвори для люків та лазів повинні розташовуватися поза зварних швів.

Зварні шви повинні бути доступні для контролю при виготовленні, монтажі та експлуатації апаратів.

Сосуд вважається таким, що витримав гідравлічне випробування, якщо не виявлено ознаків розриву, течії на стінках апарату, видимих кінцевих деформацій.

Апарати піддаються технічній перевірці в наступних випадках:

- після реконструкції та ремонту з застосуванням зварки або пайки окремих частин апарату;

- якщо апарат був демонтований та встановлений на новому місці;

- якщо апарат перед пуском не працював більше одного року.

Апарати з надзвичайно небезпечними та високо небезпечними шкідливими речовинами та іншими подібними середовищами до початку



виконання всередині них будь-яких робіт, а також перед внутрішнім оглядом підлягають ретельній обробці у відповідності до інструкції з безпечного виконання робіт.

Небезпека при експлуатації полягає у можливому раптовому вибуху великої потужності за рахунок вивільнення енергії адіабатичного розширення пари або газу. Так, при вибуху посудини, яка знаходиться під тиском 1М Па, при її об'ємі 1 м<sup>3</sup>, вивільняється енергія близько 10 МВт. При цьому руйнуються технологічні конструкції, що часто супроводжується тяжкими травмами.

З огляду на підвищену небезпеку до обслуговування систем (посудин), що працюють під тиском, допускаються особи, які досягли 18-річного віку, пройшли медичне обстеження, навчання за затвердженою програмою, атестовані й мають посвідчення на обслуговування відповідного устаткування (посудини, апарата). Підготовка таких працівників здійснюється у навчальних закладах (професійно-технічних училищах, навчально-курсівих комбінатах), які одержали в установленому порядку дозвіл Держгірпромнагляду на проведення такого навчання. Періодичні перевірки знань працівників, які обслуговують системи, що працюють під тиском, здійснюються не менше одного разу на рік.

Адміністрація підприємства зобов'язана утримувати системи, що працюють під тиском у справному стані, який забезпечує безпеку їх обслуговування та надійність роботи. На підприємствах повинні бути розроблені, затверджені, вивішені на робочих місцях та видані під розписку обслуговуючому персоналу інструкції щодо безпечного обслуговування таких систем.

На підприємствах в установленому порядку призначається особа, на яку покладається відповідальність за справний стан та безпечну експлуатацію систем (посудин), що працюють під тиском.

Високий рівень електрифікації підприємств та тяжкі умови експлуатації електрообладнання (вологість, змінні температури, наявність

вибухонебезпечних та агресивних речовин, контакт із землею та ін.) потребують особливої уваги до забезпечення електробезпеки обслуговуючого персоналу. Електротравми виникають при контакті з струмоведучими частинами електроустановок, при пробі ізоляції та появі напруги на не струмоведучих металоконструкціях, при потраплянні у поле розтікання струму в землі біля впавших дротів або заземлювачів (ураження кроковою напругою).

Електричний струм може викликати місцеве або загальне ураження: механічні травми, опіки, осліплення випромінюванням електричної дуги, металізацію шкіри, електричні мітки на шкірі та електричні удари (параліч серця, органів дихання). Вірогідність того або іншого ураження залежить від сполучення багатьох факторів: сили струму, шляху струму через тіло людини, часу дії струму, електричного опору та загального стану шкіри, виробничих обставин. Смертельно небезпечний змінний струм промислової частоти силою більше 100 мА.

На Добвущівському нафтовому родовищі при бурінні в якості зварювальної установки використовується автономний зварювальних генератор змінного струму. Перед використання пересувних зварювальних установок їх треба добре зафіксувати. А колеса поставити на ручні гальма. Довжина первинного кола між пунктом живлення і пересувною зварювальною установкою не повинна перевищувати 10 м.

Всі струмоведучі частини повинні бути надійно ізольовані. Якість ізоляції визначається її електричним опором (0.5...1 МОм), який повинен перевірятися мегомметром.

Опір ізоляції необхідно перевірити не рідше одного разу на три місяці, а при автоматичному зварюванні під флюсом один раз на місяць. Ізоляція повинна витримувати напругу в 2кВ протягом 5 хв.

Корпус та все елементи електрозварювальної установки зануляються.

Приєднання і відєднання від мережі електрозварювальних установок, а також спостереження за їх справам станом повинні вестися електротехнічним персоналом з кваліфікаційною групою не нижче III.

## ВИСНОВКИ

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

- характеристика витікання рідини із отвору залежить від форми отвору
- коефіцієнт витрати залежить від форми вхідної частини отвору і для кожного отвору є постійною величиною при значних числах Рейнольдса і не залежить від 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.

Пристрій для перемішування рідин [109], що містить порожнистий ротор з осьовими вхідними каналами, радіальні порожнисті лопаті з вихідними отворами, порожнина яких з'єднана з порожниною ротора вхідний канал з фронтальної сторони циліндричної лопаті має округлу форму, радіус якої складає 0,5-1,0 діаметра лопаті.

**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.
4. Соколов В.Н., Доманский И.В. Газожидкостные реакторы. Л.: Машиностроение, 1976. 216 с.
5. А. с. 1303178 СССР. Турбинная мешалка./ Васельцов Э.А., Клипиницер В.А. и др. Оpubл. 1987, Бюл. №14.
6. А. с. 993969 СССР. Теплообменник аппарат./ Шишкин А.В. и др. Оpubл. 1983. Бюл. №5.
7. А. с. 1165442 СССР. Устройство для аэрации и перемешивания жидкости. / Агафонов Ю.В. Чегодаев Ф.Н. и др. Оpubл. 1985. Бюл. №25.
8. А. с. 1299613 СССР. Устройство для диспергирования газа в жидкости./ Васельцов Э.А., Мороз Т.А. и др.. Оpubл. 1987. Бюл. №12.
9. А. с. 1357061 СССР. Газожидкостный реактор./ Шишкин А.В. и др. Оpubл. 1987, Бюл. №45.
10. А. с. 814429 СССР. Устройство для смешения газа с жидкостью./ Стронгин Г.М. и др. Оpubл. 1981 Бюл. № 11.
11. А. с. 1318271 СССР. Устройство для смешения жидкости с газом./ Голубев А.Р., Марков В.А. и др. Оpubл. 1987, Бюл. №23.
12. А. с. 1299613 СССР. Устройство для диспергирования газа в жидкости./ Васельцов Э.А. и др. Оpubл. 1987, Бюл. № 12.
13. А. с. 253756 СССР. Устройство для насыщения жидкостей газами. / М. Я. Розкин, Г. Ф. Слезко. Оpubл. 1969, Бюл. № 31.

14. А.С. 398265 СССР. Устройство для смешения гидкостей./ Парафенко Н.И., Розкин М.Я. Оpubл. 1973, Бюл.№38.
15. А.С.1606168 СССР. Устройство для перемешивания гидких сред./ Шабрацкий В.И., Барвин В.И. и др.. Оpubл. 1990, Бюл. №42
16. А.С. 771089 СССР. Способ получения алкиларилсульфокислот или киcлiх алкилсульфатов и устройство для его осуществления./ Стороженко В.Я., Барвин В.И., Шабрацкий В.И. и др.. Оpubл. 1980. Бюл. №38.
17. А. с. 1462552 СССР. Устройство для перемешивания. / В. И. Шабрацкий, В. Н. Галич, В. Н. Пономарев и др. – 1988 (не публикуется).
18. 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.
19. А. с. 1637106 СССР. Перемешивающее устройство. / Д. И. Белкин, В. И. Шабрацкий, В. А. Носач и др. - 1991 (не публикуется).
20. Zlokarnik M. Auslegung vor Hohlruhreru sur Flussig keits begasung - Chem.-Ius.-Techu. 1966. Ig. 38. № 3, s.357-366.
21. 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.
22. Патент 1173254 Великобритания. Improvements in or relating to the Surface Aeration of Liquids Mills. A. C., Sandersan F., опубл. 3.12.69 МКИ СО2 еНКИ.
23. Патент 3479017 США. Apparatus for Charging Liquids with Gases - Thikotter K. N., опубл. 18.11.69 МКИ В01F.
24. Патент 1104032 Великобритания. Methods of Mixing Liquids and Apparatus therefor - Eastman Kodak Company, опубл. 21.02.68 МКИ В01F.
25. 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.

26. 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.

27. 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.

28. 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.

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

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

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

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

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

34. 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.

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

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

37. А. с. 127246 СССР. Способ аэрирования жидкостей. / А. А. Иванов. Оpubл. 1960, Бюл. №7.

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

39. А. с. 398265 СССР. Устройство для смешения жидкостей. / Н. И. Парафенко, М. Я. Розкин. Опубл. 1973, Бюл. № 38.
40. 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.
41. А. с. 814429 СССР. Устройство для смешивания газа с жидкостью. / Г. М. Стронгин, А. С. Матвеев, Ю. А. Гришин. Опубл. 1981, Бюл. № 11.
42. 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.
43. А. с. 332127 СССР. Устройство для аэрации жидкости./ Чечура А.А. Опубл. 1972, Бюл. № 10.
44. А. с. 1122347 СССР. Аппарат с самовсасывающей мешалкой./ Лосик В.И., Невелич В.В., Антонов В.Н. и др. Опубл.1984, Бюл.№ 41.
45. А. с. 1606168 СССР. Устройство для перемешивания жидких сред./ Шабрацкий В.И., Барвин В.И., Барвин А.И. и др.Опубл.1990, Бюл. № 42.
46. 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.
47. 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. Zlokarnik M. Rour-und Scheibeurhrer rwei leisthu-gefahige Ruhrer ruz Flussigheits Legasung. Chem.-Ing.-Tech. 1967. Ig. 39. № 10, s. 1163-1168.
49. Zlokarnik M. Rehrhrer rum Ausangen und Dispergieren grosser Gasdurchsatre in Flussig-keiten. Chem.-Ing.-Tech. 1970. Ig.
50. 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.



51. Зайцев В. А., Гусева Г. П. Исследование гидродинамики в аппаратах с аэрирующими устройствами. Химическое и нефтехимическое машиностроение. - 1983. - № 10. - С. 13-14.
52. 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.
53. Аржаников Н. С., Мальцев В. Н. Аэродинамика. - М.: Оборонгиз, 1956. - 370 с.
54. Краснов Н. Ф. Аэродинамика тел вращения. - М.: Машиностроение, 1964. - 410 с.
55. 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.
56. 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 автоматики». – 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. Соффер 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. End. 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.
109. Патент України № 60097 Пристрій для перемішування рідин./ Шабрацький В.І., Белкін Д.І., Барвін В.І., Шабрацький С.В. Опубл. 2011р., Бюл. № 11.
110. Патент України № 71183 Пристрій для перемішування./ Белкін Д.І., Стороженко В.Я., Шабрацький В.І., Барвін В.І., Шабрацький С.В. Опубл. 2012р., Бюл. № 13.

## ДОДАТОК

Таблиця 1 - Експериментальні та розрахункові дані для визначення коефіцієнта витрати щілинних вертикальних отворів

| 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 |

Таблиця 2 – Експериментальні та розрахункові дані продуктивності самоусмоктуючих мішалок

| Діаметр мішалки 0,18м  |                                       |                |                               |        |
|------------------------|---------------------------------------|----------------|-------------------------------|--------|
| n, с <sup>-1</sup>     | Q·10 <sup>5</sup> , м <sup>3</sup> /с | φ <sub>0</sub> | n <sup>2</sup> d <sup>2</sup> | ΔP     |
| 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, с <sup>-1</sup>     | Q·10 <sup>5</sup> , м <sup>3</sup> /с | φ <sub>0</sub> | n <sup>2</sup> d <sup>2</sup> | ΔP     |
| 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 |

## Продовження таблиці 2

| $d_b=0,006$ м, $b=0,008$ м, $d_m=0,18$ м<br>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      |



Таблиця 3 Експериментальні та розрахункові дані для визначення коефіцієнта витрати щілинних вертикальних отворів

| 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 |        |                      |        |          |          |       |
| 0,0015  | 0,02   | 0,00002              | 0,25   | 4,7088   |          | 8000  |
| 0,015   | 0,032  | 0,000032             | 0,4    | 3,310875 | 0,549577 | 12800 |
| 0,028   | 0,045  | 0,000045             | 0,5625 | 2,480356 | 0,634955 | 18000 |
| 0,038   | 0,06   | 0,00006              | 0,75   | 2,16256  | 0,680011 | 24000 |
| 0,045   | 0,073  | 0,000073             | 0,9125 | 2,167809 | 0,679187 | 29200 |
| 0,0505  | 0,086  | 0,000086             | 1,075  | 2,275029 | 0,662989 | 34400 |
| 0,058   | 0,1    | 0,0001               | 1,25   | 2,297894 | 0,659683 | 40000 |
| 0,065   | 0,114  | 0,000114             | 1,425  | 2,289906 | 0,660832 | 45600 |
| 0,068   | 0,128  | 0,000128             | 1,6    | 2,322211 | 0,65622  | 51200 |
| 0,07  | 0,14   | 0,00014              | 1,75   | 2,351197 | 0,652162 | 56000 |