

СУМСЬКИЙ ДЕРЖАВНИЙ УНІВЕРСИТЕТ

На правах рукопису

ШАБРАЦЬКИЙ Сергій Володимирович

УДК 66-936.4.021.2(043.5)

**ГІДРОДИНАМІКА ГАЗОРІДИННИХ СИСТЕМ В РЕАКТОРАХ З
САМОУСМОКТУЮЧИМИ ПЕРЕМІШУЮЧИМИ ПРИСТРОЯМИ**

05.17.08 – процеси та апарати хімічних технологій

Дисертація на здобуття наукового ступеня
кандидата технічних наук

Науковий керівник:
Кандидат технічних наук, професор
Стороженко Віталій Якович

Суми 2017

ЗМІСТ

ПЕРЕЛІК УМОВНИХ ПОЗНАЧЕНЬ, СИМВОЛІВ, ОДИНИЦЬ, СКРОРОЧЕНЬ І ТЕРМІНІВ	4
ВСТУП.....	6
РОЗДІЛ 1. ГІДРОДИНАМІЧНІ ПРОЦЕСИ ТА РЕАКТОРИ ДЛЯ ГАЗОРІДИННИХ СИСТЕМ З САМОУСМОКТУЮЧИМИ ПЕРЕМІШУЮЧИМИ ПРИСТРОЯМИ	12
1.1. Апарати об'ємного типу з перемішуючими пристроями для проведення газорідинних реакцій.....	12
1.2. Газовміст перемішуючого середовища в апаратах з мішалками.....	21
1.3. Потужність, споживана при перемішуванні в апаратах об'ємного типу.....	30
1.4. Висновки, постановка задачі дослідження.....	33
РОЗДІЛ 2. ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНА УСТАНОВКА ДЛЯ ДОСЛІДЖЕННЯ ГІДРОДИНАМІКИ В ГАЗОРІДИННИХ АПАРАТАХ З САМОУСМОКТУЮЧИМИ МІШАЛКАМИ.....	35
2.1. Експериментальна установка для проведення гідродинамічних випробувань самоусмоктуючих мішалок в апаратах об'ємного типу.....	36
2.2. Методика дослідження насосної продуктивності самоусмоктуючих мішалок.....	42
2.3. Методика дослідження середнього та локального газовмісту в апаратах.....	44
2.4. Методика дослідження потужності, що витрачається самоусмоктуючими перемішуючими пристроями	46
2.5. Оцінка похибки методики досліджень та похибок експериментальних вимірів.....	49
2.6. Висновки до другого розділу.....	50
РОЗДІЛ 3. МЕХАНІЗМ УСМОКТУВАННЯ ГАЗОВОГО ПОТОКУ САМОУСМОКТУЮЧИМИ ЕЖЕКЦІЙНИМИ МІШАЛКАМИ.....	51

3.1. Задачі експериментального дослідження	51
3.2. Початкова частота обертання самоусмоктуючих ежекційних мішалок та коефіцієнт гідравлічного опору порожнистих лопатей.....	52
3.3. Гідродинаміка руху усмоктуемого газу порожнистими лопатями ежекційних самоусмоктуючих мішалок.....	66
3.4. Насосна продуктивність самоусмоктуючих ежекційних мішалок з плоскими порожнистими лопатями.....	93
3.4. Висновки до третього розділу.....	109
РОЗДІЛ 4. ДОСЛІДЖЕННЯ ГАЗОВМІСТУ ТА ПОТУЖНОСТІ НА ПЕРЕМІШУВАННЯ В АПАРАТІ З САМОУСМОКТУЮЧИМИ ЕЖЕКЦІЙНИМИ МІШАЛКАМИ.....	111
4.1. Дослідження газовмісту в апараті з самоусмоктуючою мішалкою.....	111
4.2. Розрахунок поверхні крапель та площі контакту фаз в апараті.....	117
4.3. Потужність на перемішування самоусмоктуючими перемішувальними пристроями для газорідних систем.....	125
4.4. Висновки до четвертого розділу.....	135
РОЗДІЛ 5. РОЗРОБКА МЕТОДИКИ РОЗРАХУНКУ АПАРАТІВ З САМОУСМОКТУЮЧИМИ ПЕРЕМІШУЮЧИМИ ПРИСТРОЯМИ.....	137
5.1. Алгоритм інженерного розрахунку апаратів з самоусмоктуючими ежекційними мішалками	137
5.2. Висновки та рекомендації до інженерного проектування об'ємних газорідних апаратів з самоусмоктуючими перемішувальними пристроями	142
ВИСНОВКИ.....	144
СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ.....	146
ДОДАТКИ.....	161

ПЕРЕЛІК УМОВНИХ ПОЗНАЧЕНЬ, СИМВОЛІВ, ОДИНИЦЬ, СКОРОЧЕНЬ І ТЕРМІНІВ

- D – діаметр апарату, м;
- d – діаметр самоусмоктуючої мішалки, м;
- d_c – діаметр маточини мішалки, м;
- d_o – діаметр лопаті, м;
- d_n – середній діаметр пухирця газу, м;
- z – число лопатей мішалки;
- b, b_o – висота лопаті мішалки, ширина каналу лопаті, м;
- n_o, n_{zc}, n – початкова частота обертання мішалки, гідростатична і робоча частота обертання мішалки, 1/с;
- $H, H_{ж}, \Delta H, H_{z-ж}$ – висота апарату, глибина заповнення апарату, приріст висоти шару рідини за рахунок газовмісту, висота газорідинного шару, м;
- h, h_b, h_{zc} – глибина занурення мішалки, середня висота газорідинного шару над мішалкою, відстань від рівня рідини до нижньої крапки каналу лопаті, м;
- ω – кутова швидкість обертання мішалки, рад/с;
- ω' – приведена швидкість газу, м/с;
- R, r – радіус мішалки, довільний, м;
- α – кут нахилу лопаті по відношенню до площини обертання, град;
- β – кут скосу вхідної кромки в порожнисту лопать, град;
- ζ – коефіцієнт опору мішалки;
- $\bar{\varphi}$ – середній газовміст в апараті, од.;
- $\bar{\varphi}_0$ – середній газовміст в кільцевому обсязі, що ометається лопатю мішалки, од.;
- $\bar{\varphi}_l$ – середній газовміст в каналі лопаті од.;
- $\bar{\varphi}_{II}$ – середній газовміст в площині вихідного отвору лопаті од.;
- F_{num} – питома поверхня контакту фаз, 1/м;

f_z – площа перетину апарата, зайнята газом, м²;

f_{cm} – площа вільного перетину апарата, зайнята газорідинною сумішшю, м²;

f, f_o – площа вихідного отвору лопаті, сумарна площа перетину газових каналів, м²;

ρ, ρ_n, ρ_z – щільність води; суміші в апараті та каналі лопаті; газу; кг/м³

μ, μ_n, μ_z – в'язкість води; суміші в апараті та каналі лопаті; газу; Па·с;

ν_z, ν – кінематичний коефіцієнт в'язкості повітря, води, м²/с;

σ – поверхневий натяг, Н/м;

g – прискорення вільного падіння, м/с²;

V_Γ – обсяг повітря усмоктуваного мішалкою, м³;

V_P – обсяг рідини в апараті, м³;

$\beta_{об}$ – об'ємний коефіцієнт масовіддачі, з⁻¹;

N – потужність, Вт;

Re – число Рейнольдса.

ВСТУП

У 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. Ці процеси відрізняються фізико-хімічними властивостями речовин, складом взаємодіючих компонентів і фаз, швидкістю реакції, інтенсивністю тепловиділення. 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. Підвищення ефективності роботи масообмінних апаратів залежить від гідродинаміки газорідинної суміші в перемішуємому об'ємі. Особливість таких процесів, що супроводжуються хімічною реакцією, наприклад, хлорування, сульфування, окислення та ін. дуже часто визначається раціональним вибором апаратного оформлення технологічних схем, серед яких в якості основних апаратів є реактори об'ємного типу з перемішувачами. У класичних апаратах такого типу газовий реагент зазвичай подається під перемішувачем 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. Найбільш ефективними перемішувачами 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. 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.

Актуальність теми. У сучасній хімічній, нафтохімічній і мікробіологічній промисловості існують масообмінні та реакційно-дифузійні процеси в гетерогенних системах газ-рідина, які здійснюються в плівкових, барботажних, газліфтних апаратах та апаратах об'ємного типу з перемішувачами пристроями. Ці процеси розрізняються фізико-хімічними властивостями речовин, складом взаємодіючих фаз, швидкістю реакції та інтенсивністю тепловиділення. Інтенсифікація хіміко-технологічних процесів та підвищення ефективності технологічного обладнання є одним із пріоритетних завдань розвитку науки і техніки. У класичних апаратах об'ємного типу газоподібний реагент зазвичай подається під мішалку через барботер різних конструкцій. Основним показником, що характеризує ефективність цих реакторів є поверхність контакту фаз, яка досягається ефективними перемішувачами пристроями, серед яких використовуються відкриті турбінні мішалки стандартного типу. Процеси, що супроводжуються хімічною реакцією, наприклад, процеси хлорування, сульфування, окислення і інші дуже часто залежать від раціонального вибору апаратурного оформлення. Якість продуктів цих реакцій залежить від засобу вводу газового реагенту в зону реакції та загальної гідродинаміки в реакторі. Останнім часом для цієї мети використовуються самоусмоктуючі мішалки, які, крім перемішування реакційної маси, використовуються в якості барботеру, що обертається. Останні дозволили спростити технологічні схеми виробництва, пов'язані з підтримкою надмірного тиску на лініях подачі газового реагенту. Для класичних газорідних апаратів відомі гідродинамічні розрахунки, описані в літературі, проте вони неприйнятні або недостатні для розрахунків апаратів з самоусмоктуючими мішалками.

Зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами. Дисертаційна робота виконувалася в Сумському державному університеті за

планом держбюджетної науково-дослідної роботи кафедри процеси та обладнання хімічних та нафтопереробних виробництв на 2015-2019р.р. по темі «Розробка та дослідження високоефективних апаратів для процесів масообміну, кристалізації та класифікації» (номер державної реєстрації 0110U001953), термін виконання – 2010–2014рр., а також держбюджетної тематики «Дослідження гідродинаміки та процесів тепломасообміну в апаратах з дисперсною фазою» (номер державної реєстрації №0115U002551), термін виконання – 2015-2019рр. Замовник – Міністерство освіти і науки України). Також робота була апробована на ТОВ «Завод органічного синтезу», ТОВ «Агросервіс», Науково-промисловому центрі «Перспектива» Української технологічної академії, на всі результати наукових випробувань отримані акти впровадження.

Мета і задачі дослідження. Мета і завдання дослідження. Мета роботи полягає в теоретичному та експериментальному дослідженні гідродинаміки процесу перемішування газорідного середовища в апараті об'ємного типу, визначення насосної продуктивності самоусмоктуючих ежекційних мішалок, середнього і локального газовмісту та потужності при перемішуванні газорідного середовища в залежності від гідродинамічних та конструктивних параметрів і створення науково обґрунтованої методики розрахунку реакторів об'ємного типу з самоусмоктуючими мішалками.

Для досягнення поставленої мети необхідно провести такі дослідження:

- аналіз існуючих теоретичних описів процесу отримання газорідної суміші та огляд сучасних конструкцій перемішуючих пристроїв та самоусмоктуючих мішалок і газорідних апаратів;

- визначити коефіцієнт витрат самоусмоктуючих мішалок від профілю поперечного перетину порожнистих лопатей та узагальнити отримані результати у вигляді рекомендацій для впровадження їх в апаратах об'ємного типу;

- визначити насосну продуктивність самоусмоктуючих мішалок окремо по газовій фазі та рідині в залежності від частоти обертання та геометричних параметрів мішалки, визначення початкової частоти обертання;

- визначити вплив ежекційної перегородки та її розташування на насосну продуктивність самоусмоктуючих мішалок по газовій фазі та рідині;
- визначити середній та локальний газовміст перемішуємого середовища;
- визначити залежність потужності самоусмоктуючих ежекційних мішалок при перемішуванні однорідного і газорідинного середовища.

Об'єктом дослідження є апарат об'ємного типу з самоусмоктуючою мішалкою для проведення газорідинних реакцій.

Предмет дослідження – гідродинаміка, газовміст і потужність в апараті об'ємного типу з самоусмоктуючими мішалками.

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. 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. Опрацювання та узагальнення експериментальних даних виконували за допомогою комп'ютерної техніки та прикладних програмних пакетів, визначення похибок проведено методом математичної статистики.

Наукова новизна отриманих результатів роботи.

На основі виконаних теоретичних і експериментальних досліджень отримані наступні наукові результати:

- дістали подальшого розвитку фізична та математична моделі гідродинамічних процесів перемішування газорідинних систем в апаратах об'ємного типу з турбоежекційними перемішуючими пристроями;
- вперше отримані аналітичні залежності коефіцієнту опору порожнистої плоскої лопаті від діаметру мішалки та кута нахилу лопаті відносно площини обертання;

- вперше одержано аналітичні рівняння з визначення насосної продуктивності турбоежекційних перемішуючих пристроїв по газовій фазі та рідині залежно від розташування ежекційної перегородки;

- удосконалено аналітичні залежності з визначення витрат потужності на перемішування в апаратах об'ємного типу, які враховують особливості внутрішніх турбоежекційних перемішуючих пристроїв і газовміст газорідинних систем;

Практичне значення одержаних результатів.

- на основі отриманих залежностей для визначення гідродинамічних характеристик розроблена інженерна методика розрахунку газорідинних апаратів об'ємного типу з турбоежекційними перемішуючими пристроями;

- розроблені нові високоефективні конструкції турбоежекційних перемішуючих пристроїв для проведення газорідинних реакцій в апаратах об'ємного типу, які захищені патентами України;

- результати досліджень та методика розрахунку газорідинних апаратів з турбоежекційними перемішуючими пристроями рекомендуються до використання в технологічних схемах таких виробництв, як наприклад, сульфування алкілбензолів, озонування та хлорування пасивних вуглеводнів.

- наукові результати дисертаційної роботи впроваджено при виконанні, промислових випробувань на ТОВ «Завод органічного синтезу», ТОВ «Агросервіс», Науково-промислового центрі «Перспектива» Української технологічної академії, що підтверджено отриманими актами впровадження.

Особистий внесок здобувача. Особистий внесок здобувача полягає у розробці конструкцій самоусмоктуючих мішалок, підборі та апробації методик експериментальних досліджень з гідродинаміки і газовмісту в апаратах об'ємного типу, проведенні експериментів по визначенню продуктивності мішалок в режимі самоусмоктування, середнього і локального газовмісту, визначенні витрат потужності на перемішування газорідинної суміші та обробці отриманих результатів.

Всі результати, що складають зміст дисертаційної роботи, особисто доповідалися на науково-технічних та науково-практичних конференціях. В співавторстві винайдено та захищено деклараційними патентами України [131,132] нові конструкції самоусмоктуючих мішалок і реакторів для проведення газорідинних апаратів.

В наукових статтях і працях за темою дисертації, написаних у співавторстві, особистий внесок здобувача полягає у наступному:

- у роботі [120] проведений аналіз наукових та патентних даних по гідродинаміці об'ємних реакторів для проведення газорідинних реакцій, в тому числі апаратів з самоусмоктуючими мішалками, виявлені основні проблеми по створенню методики розрахунку таких апаратів;

- у роботі [121] виконано дослідження витратних характеристик руху транзитного потоку в самоусмоктуючих мішалках;

- у роботі [122] визначені характеристики відцентрово-ежекційних мішалок газорідинних апаратів, які необхідні для розрахунку насосної продуктивності;

- у роботі [136] приділена увага насосній продуктивності мішалок, встановлений характер залежності насосної продуктивності мішалок з різним профілем лобової частини порожнистих лопатей в залежності від діаметра мішалок, розмірів отворів лопатей, числа лопатей і частоти обертання мішалок;

- у роботі [137] було проведено дослідження залежності середнього питомого газовмісту в робочому середовищі газорідинних апаратів з самоусмоктуючими мішалками в залежності від діаметра мішалок, розмірів отворів лопатей, числа лопатей і частоти обертання мішалок.

- у роботі [138] були проведені дослідження насосної продуктивності самоусмоктуючих мішалок, оснащених ежекційною перегородкою в залежності від частоти обертання, глибини занурення та куту скосу вхідної кромки;

- у роботі [139] визначені залежності коефіцієнта витрати від режиму роботи самоусмоктуючої мішалки, запропоноване рівняння для його визначення;

- у роботі [140] виконані дослідження щодо потужності, що використовується на перемішування, визначені залежності потужності від частоти обертання мішалки та газовмісту перемішуваного об'єму.

Апробація результатів дисертації. Основні положення і результати дисертаційної роботи доповідалися і обговорювалися на V Міжнародній науково-технічній конференції студентів, аспірантів та молодих вчених «Хімія та сучасні технології» (м. Дніпропетровськ, 2011 рік), на II Всеукраїнській міжвузівській науково-технічній конференції «Сучасні технології в промисловому виробництві» (м. Суми, 2012 рік), на III Міжнародній конференції молодих вчених «Хімія та хімічні технології» (м. Львів, 2013 рік), на III Всеукраїнській міжвузівській науково-технічній конференції «Сучасні технології в промисловому виробництві» (м. Суми, 2014 рік), на Всеукраїнській науково-технічній конференції «Актуальні проблеми науково-промислового комплексу регіонів» (м. Рубіжне, 2015 рік), на Міжнародній науково-практичній конференції «Актуальні питання розвитку технічних наук в умовах сьогодення» (м. Київ, 2015 рік).

Публікації. Результати дисертаційної роботи опубліковані в 21 наукових працях, в тому числі 8 статей (в наукових фахових виданнях затверджених ВАК України – 6, в закордонних виданнях – 2). Отримано 5 деклараційних патенти України на корисну модель самоусмоктуючих ежекційних мішалок.

Структура та обсяг дисертації. Дисертаційна робота складається з вступу, чотирьох розділів, висновку, списку використаних джерел з 154 найменувань, додатків. Повний обсяг дисертації становить 205 сторінки, з яких 147 сторінок основного тексту, 4 таблиці по тексту і 16 таблиць в додатках, 50 рисунків.

РОЗДІЛ 1

ГІДРОДИНАМІЧНІ ПРОЦЕСИ ТА РЕАКТОРИ ДЛЯ ГАЗОРІДИННИХ СИСТЕМ З САМОУСМОКТУЮЧИМИ ПЕРЕМІШУЮЧИМИ ПРИСТРОЯМИ

1.1. Апарати об'ємного типу з перемішуючими пристроями для проведення газорідних реакцій

У хімічній промисловості в останні роки питання вивчення гідродинамічних закономірностей двохфазних потоків набуло особливої ваги стосовно розрахунку абсорбційних та хемосорбційних масообмінних процесів. 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 перемішуючими пристроями. Конструкції мішалок, поза сумнівом, грають досить важливу роль в роботі цих апаратів. У класичних апаратах об'ємного типу з перемішуючими пристроями газовий реагент безпосередньо подається під мішалку через: трубу [5], трубчатий барботер зігнутий у вигляді тору [3] з перфорацією діаметром 2-3мм, пристроїв для розподілу газу [6], виконаному у вигляді кільцевого трубчатого елемента із пористого металокерамічного матеріалу над яким розташований відбійник у вигляді полутору, або пристрою у вигляді усіченого конусу, вершина якого має отвори для виходу газу [7]. Для запобігання забиванню перфорації барботерів продуктами реакції та зменшення гідравлічного опору, отвори в барботері розташовуються на стороні труби зверненої до центру або вниз. Сумарна площа отворів більша ніж площа поперечного перетину труби, що призначена для подачі газового реагенту. В цих газорідних апаратах найчастіше використовуються стандартні відкриті

турбінні мішалки з шістьма вертикальними лопатями або закриті турбінні мішалки [8,9,10], які крім диспергування газового реагенту або повітря в об'ємі рідини, створюють в апараті два турбулентних контури газорідинної суміші над і під мішалкою. Структура газорідинної суміші в апараті обумовлюється інтенсивністю перемішування та умовами введення газу. При вивченні впливу перемішування на процес хімічного перетворення в системі газ-рідина Павлушенко І.С. і Брагінський Л.Н. [11] установили: енергія, що вводиться в перемішуємий об'єм в залежності від конструктивних особливостей мішалок витрачається на створення циркуляційних потоків і турбулізацію перемішуємого середовища. Основною метою перемішуючих пристроїв є створення розвинутої міжфазної поверхні за рахунок інтенсивного дроблення бульбашок газового реагенту та рівномірного розподілу його по всьому перемішуємому 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 перемішуючому середовищі, виконуючи функції рухомого барботеру. Для доставки газового реагенту в середину перемішувемого об'єму в таких

апаратах використовують порожнистий вал, до якого прикріпляються трубчасті порожнисті [18,53], ежекційно-струменеві [18, 23,24], самоусмоктуючі [2-5, 29] мішалки. Аналізуючи явище масопереносу в апаратах з мішалками Мартинов Ю.В. [45] робить висновок, що одним із розповсюджених варіантів самоусмоктуючих мішалок є мішалки з порожнистим валом і трубчатими лопатями [18,29,85]. Вони досить прості по конструкції і не потребують значних затрат енергії на перемішування та мають не високий коефіцієнт корисної дії. Злокарник М. [29] запропонував розділити самоусмоктуючі мішалки залежно від форми поверхні та кутів конструктивних елементів мішалок, що створюють розрідження на чотири класи: а) - циліндричні, виконані у вигляді циліндра з перфорованого листа різного профілю або з дротяної сітки; б) - турбогазатори, виконані як робочі колеса турбін; г) - призматичні, виконані у вигляді багатобічної плоскої призми, зігнуті або ламані; д) - трубчасті, в яких лопаті мішалок виконані з труб. Проте ця класифікація не враховує усіх особливостей і складності відомих конструкцій самоусмоктуючих мішалок [30-44] та форми усмоктуючих пристроїв, що з'явилися значно пізніше, та не вписуються ні в одну із описаних груп [29], тому що одночасно поєднують ознаки декілька таких груп. В той же час в технічній літературі відсутні надійні методи розрахунку та напрями конструювання таких мішалок, а також параметри оцінки їх ефективності.

Різноманітність конструкцій самоусмоктуючих мішалок свідчить про те, що існує ряд хіміко-технологічних процесів, при проведенні яких звичайні барботажні газорідинні апарати з мішалками не ефективні. Це стимулює розробку нових конструкцій газорідинних апаратів, у тому числі і з самоусмоктуючими мішалками. Відомі публікації про конкретні процеси, для проведення яких використовують газорідинні апарати з самоусмоктуючими мішалками, зокрема автоклави з самоусмоктуючими мішалками в гідрометалургійній промисловості [46], об'ємні апарати для процесів ферментації [47], абсорбції та окислення при культивуванні мікроорганізмів, хлоратори для хлорування пасивних органічних з'єднань [48]. Досліджуючи

усмоктування газу щілинною самоусмоктуючою мішалкою автори [47] знайшли графічні залежності насосної газової продуктивності мішалки від її діаметру, частоти обертання і рівня рідини над мішалкою. В роботі вказані обмеження використання самоусмоктуючих мішалок відповідно до глибини занурення, яка є в деяких випадках основною при впровадженні їх в виробництво. Злокарник М. [29] вважає, що самоусмоктуючі мішалки доцільно використовувати у тих випадках, коли, окрім введення газу в рідину, необхідне інтенсивне перемішування фаз та конче необхідний інтенсивний тепло- масообмін. Незважаючи на невисокий коефіцієнт корисної дії з продуктивності по газовій фазі самоусмоктуючих мішалок, хороше подрібнення бульбашок газу, що забезпечує велику площу поверхневого контакту фаз, ставить самоусмоктуючі мішалки на один рівень з високоефективними диспергуючими пристроями [50].

Газонасосний ефект самоусмоктуючих мішалок [29,49,55] пов'язаний з утворенням всередині у вихідних газових каналах зниженого тиску [51], який утворюється внаслідок обтікання потоком рідини тіла, що обертається. Тому найбільш ефективні є такі самоусмоктуючі мішалки, периферійні елементи яких мають найменше обтікаєму поверхню. Ефективність усмоктування газу самоусмоктуючою мішалкою [52,53] автори пов'язують в основному з ежекційною здатністю радіального потоку, який протікає уздовж лобової частини конструктивних елементів мішалки. При цьому ефективність конструкції самоусмоктуючої мішалки оцінюється, як і у попередньому випадку. В роботах [54-56] також висловлено припущення про те, що переважаючою причиною усмоктуючого ефекту самоусмоктуючих мішалок є розрідження, що виникає внаслідок обтікання перемішуючою рідиною порожнистих лопатей мішалки. Утворення зони розрідження за кормовою частиною тіла, обтікаємого рідиною або тіла, що рухається в такому ж середовищі, є однотипним явищем, яке експериментально і теоретично обґрунтовано [57-59]. Автори вважають, що при обтіканні тіла на його поверхні утворюється прикордонний шар, який тягнеться від передньої кромки лобової частини тіла до лінії відриву. Товщина прикордонного шару є величина достатньо умовна.

При обертанні відкритих турбінних та лопатевих мішалок на рідину, що знаходиться біля лобової поверхні лопатей, діє відцентрова сила, що утворює радіальний потік [60-64], який разом з тангенціальним потоком утворюють зону розрідження біля торцевої частини порожнистих лопатей. За кормою лопаті [65-68] утворюється два циркуляційних вихра, симетричних відносно ширини лопаті з однаковою величиною циркуляції. Турбулентний слід, що утворюється при обтіканні лопаті рідинним потоком складний і є зоною, що заповнена вихорами з центрами обертання та пониженого тиску [69-74]. При великих швидкостях потоку через зниження тиску за тілом, яке обтікає рідина, внаслідок кавітації виникає велика кількість бульбашок (каверн), які вибухають після переміщення їх в зону високого тиску. Досліджуючи витрату газу через порожнисті лопаті трубної мішалки і витрати потужності на перемішування, автори [72] встановили залежність критерію потужності та насосної газової продуктивності мішалки від числа Рейнольдса. Вивчаючи вплив різних конструкцій самоусмоктуючих мішалок на усмоктуючу продуктивність по газовій фазі Злокарник М. [29, 49] висуває пропозицію, що до їх використання: порожнисті мішалки вигідно використовувати там, де подача газу в рідину супроводжується певними труднощами. Це технологічні процеси з використанням агресивних газів або в випадках, коли в рідині, що підлягає аерації знаходяться дрібнозернисті тверді речовини, що легко забивають вихідні отвори газорозподільчих пристроїв. Він також висунув пропозицію, що критерій потужності має більш коректний зв'язок з критерієм Фруда при інтенсивному перемішуванні тобто при турбулентному режимі, відмічаючи слабкий вплив числа Рейнольдса на насосну газову продуктивність самоусмоктуючих мішалок. На базі узагальнення експериментальних даних автором пропонується для масштабування лабораторних випробувань в виробництво використовувати залежність критерію Ейлера від критерію Фруда. Критерій Фруда в процесах перемішування враховує вплив завихрення рідини та утворення вирви в апараті з мішалкою, на споживану при перемішуванні потужність. Для апаратів з відбивними перегородками або іншими технологічними пристроями, що

запобігають утворенню вирви рідини, вплив критерію Фруда нівелюється. В той же час при турбулентному режимі в апараті відбувається усмоктування газу самоусмоктуючою мішалкою в автотельному режимі, критерій Ейлера, що залежить від геометричних розмірів і деяких інших характеристик системи, не залежить від числа Рейнольдса і критерію Фруда [4,68-70]. Рішення цієї задачі пов'язане з розглядом механізму, що забезпечує усмоктування газу і виявлення розрахункових залежностей цього параметру від особливостей мішалки і апарату. Газонасосний ефект самоусмоктуючих мішалок [29,49,55,85] пов'язаний з утворенням всередині пристрою для перемішування та у вихідних газових каналах виникає за рахунок зниження тиску, який утворюється при обтіканні тіла, що обертається, потоком рідини. Тому найбільш ефективними є такі самоусмоктуючі мішалки, периферійні елементи яких мають найменше обтікаєму поверхню. Одним з недоліків такого підходу є відсутність надійного обґрунтування фізичної моделі процесу і, отже, правомірності застосування відповідних критеріїв подібності. Зокрема, не дивлячись на формальний доказ залежності насосної газової продуктивності, точніше критерію Ейлера від критерію Фруда, у роботі [29] відсутні дані, що відображають фізичний сенс таких залежностей.

Розглядаючи насосну газову продуктивність, як функцію різниці частоти обертання самоусмоктуючої мішалки і початкової частоти її обертання, автори [75-79] знайшли залежність продуктивності від глибини занурення мішалки. Під початковою частотою обертання мішалки розуміють ту частоту, при якій вирва газу досягає кромки середнього диска турбінної мішалки [75]. Vesterp [74] для розрахунку мішалок газорідних систем вводить поняття швидкості перемішування, як добуток числа обертів та діаметру мішалки. Якщо швидкість обертання перевищує критичне значення добутку початкової частоти обертання та діаметру, в статті [74] було доказано, що поверхня газорідного контакту в сосуді з мішалкою не залежить від продуктивності по газу і зростає лінійно від швидкості перемішування. Дослідження впливу на газову продуктивність щільної самоусмоктуючої мішалки від діаметру мішалки, частоти обертання та

глибини занурення представлено у вигляді графічних залежностей [47] використовували при проектуванні промислових апаратів з самоусмоктуючими мішалками в Іркутському НДХіммаші. Для розрахунку початкової частоти і насосної газової продуктивності самоусмоктуючої мішалки використовують в приведених залежностях емпіричні коефіцієнти [78,79]. Визначення початкової частоти обертання мішалки, називаючи її мінімальною частотою, використовували в роботі [54], розглядаючи її зв'язок тільки з глибиною занурення мішалки. Запропоновані методи розрахунку насосної газової продуктивності [47,54,78] можуть бути використані тільки в тих умовах, для яких були визначені емпіричні коефіцієнти і графічні залежності.

Крім стандартних турбінних самоусмоктуючих мішалок заслуговують на увагу перемішувачі пристрої роторно-струменевого типу [19,23-25], 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]. Вище 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 перемішувачого середовища. Сульфуратор [23], в якому самоусмоктуюча мішалка призначена для проведення газорідинних реакцій представляє складну конструкцію, яка складається з об'ємної та плівкової частин. Інші самоусмоктуючі мішалки [23] такого типу відрізняються тільки незначним удосконаленням окремих елементів конструкції.

В роботах [52-56] були розглянуті перші спроби складання енергетичного балансу в площині вихідного отвору порожнистої лопаті за рахунок визначення залежності початкової або мінімальної частоти обертання самоусмоктуючої мішалки. Проведені експериментальні дослідження по визначенню локального газовмісту в об'ємі, що знаходиться поблизу мішалки та визначена залежність локального і середнього газовмісту в апараті. Більш детально розглянутий

фізичний стан процесу усмоктування перемішувачами і експериментально обґрунтований механізм усмоктування газового реагенту самоусмоктуючою мішалкою через порожнисті циліндричні лопаті [54-56], який ґрунтується на механізмі утворення зони розрідження за циліндричною лопатою мішалки при обтіканні її перемішувачом рідиною. Автором [55] 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.

При обертанні самоусмоктуючих перемішувачів 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 [1-5,65,66]. Гідродинаміка руху рідини при обтіканні перешкод дуже добре описана в фундаментальних підручниках [60-70]. Автори [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.

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 [108] 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. 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. Вона є основним параметром при розрахунках та конструюванні газорідних апаратів.

Для процесів пов'язаних з проведенням екзо- та ендотермічних реакцій в промисловості використовуються спеціальні мішалки [14-19,23,125,131,132]. Вони виконують роль інтенсивних змішувачів різних хімічних реагентів та диспергують газовий реагент у вигляді бульбашок в реакційний об'єм. Використання їх в реакторах гальмується внаслідок відсутності простого алгоритму розрахунку насосної газової продуктивності.

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

1.2 Газовміст перемішуючого середовища в апаратах 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 компоненту. 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 [73-88] .

Основною характеристикою цієї двофазної системи є середній газовміст [73-84] перемішуємого середовища, величина якого необхідна для розрахунків робочого об'єму апарату і витрат енергії на перемішування та розрахунків з визначення коефіцієнту масообміну. Газовміст в об'ємі апарата за умови механічного перемішування залежить від фізико-хімічних властивостей компонентів, гідродинаміки і геометричних параметрів [80]. В роботі [76] по результатах проведених випробувань самоусмоктуючої мішалки 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. Автори на базі результатів випробувань отримали емпіричну формулу для розрахунку середнього газовмісту

$$\varphi_{CP} = \frac{k(Fr - Fr_{KP})}{1 + k(Fr - Fr_{KP})}, \quad (1-1)$$

де k - коефіцієнт форми лопаті, для циліндричної лопаті дорівнює $k=0,035+0,058(b/d)$, Fr - критерій Фруда.

Зростання газовмісту в об'ємі апарата за умови збільшення частоти обертання механічного пристрою обумовлене зростанням кількості бульбашок газу та терміну їх перебування в інтенсивно перемішуємому об'ємі [88].

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 пазиркового 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. 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]. 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. Автори відмічають, що діаметр бульбашок є фактично постійною величиною. У реальних умовах величина середнього питомого газовмісту в апаратах з механічними перемішувальними пристроями 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 перемішувального пристрою, а також приведену швидкість руху газу в апараті.

Vesterp [74] при випробуваннях об'ємного апарату діаметром 168мм з турбінною мішалкою діаметром 63мм досяг величини середнього газовмісту до 32% при частоті обертання 2200об/хв. Обробка отриманих даних була представлена у вигляді спрощеної залежності

$$\varphi \approx \frac{n}{100} , \quad (1.2)$$

де n - частота обертання турбінної мішалки.

Збільшення частоти обертання мішалки до 3600об/хв. дозволило збільшити середній газовміст до величини 40%. Соїфер Р.Д. і Кафаров В.В. [80] для розрахунку середнього газовмісту запропонували емпіричну залежність, яка враховує співвідношення висоти заповнення апарату рідиною до його діаметру і витрати газу. Вплив в'язкості робочого середовища на величину середнього газовмісту був відображений в роботі [101]. В період випробувань в'язкість рідини змінювалась від 0,001 до 0,0224 Пас. Отримані дані внаслідок випробувань на рідинах 0,001-0,0025 Пас представлені у вигляді рівняння:

$$\varphi = 0,33 \left(\frac{w}{w_{BC}} \right)^{0,55} \left(\frac{N_G}{V} \right)^{0,17} \left(\frac{\mu}{\mu_{BC}} \right)^{-0,3}, \quad (1.3)$$

збільшення в'язкості робочої рідини від 0,0025 до 0,0224 Пас приводить до незначного збільшення середнього газовмісту, яке в приведеній формулі відрізняється коефіцієнтом на 0.1 до 0,43 і додатковим множником $\left(\frac{\mu}{\mu_B} \right)^{-0,2}$.

Інтенсивність процесів масообміну в апаратах з мішалками в системах газ-рідина є середній діаметр бульбашок і величина поверхні контакту фаз, яка пропорційна кількості газових бульбашок в середовищі, що перемішується. У загальному випадку, для апаратів з примусовим введенням газу, що диспергується у перемішуємому шарі рідини звичайними мішалками, дані параметри досліджувалися достатньо детально [87-91]. Залежності газовмісту представлені у вигляді функцій величини дисипації енергії та діаметра мішалки або умовної потужності та приведеної швидкості газу. Автори [92-94] пропонують визначати середній газовміст через питому потужність та приведену швидкість газового реагенту по кореляційній залежності

$$\varphi = C \cdot N_V^m \cdot W_G^n, \quad (1.4)$$

за допомогою якої узагальнені експериментальні дані для різних типів мішалок при випробуваннях на рідинах з різними фізико-хімічними властивостями. В даній залежності показники ступеня коливаються: $m=0,35-0,47$; $n=0,53-0,62$. Приведені розрахункові залежності, за допомогою яких можна визначити частоту обертання мішалки, при якій починається диспергування газу, використовуючи при цьому відомі параметри діаметра мішалки і апарату, відстань мішалки від дна апарату і глибини занурення мішалки. Для деяких технологічних процесів такий показник газовмісту досить низький і потребує значного підвищення, тому в реакторах розміщують перемішуючі пристрої в два і більше рядів або використовують додаткові елементи конструкції, що збільшують кількість газовмісту в перемішуємому середовищі.

У апаратах з відбивними перегородками [83], верхній край яких виступає над поверхнею рідини, під час перемішування відбувається мимовільне захоплення газового середовища, що знаходиться над поверхнею перемішуємої рідини. Для підсилення ефекту поверхневої аерації реактор оснащений додатковим перемішуючим пристроєм, розміщеним у верхній частині валу [80]. Відмічаючи складнощі вимірювання висоти газорідинної суміші в апараті автори [84-89] пропонують для розрахунку середнього питомого газовмісту використовувати метод статистичної оцінки, який до речі є досить складним і недостатньо якісним. Разом із середнім питомим газовмістом для характеристики структури газорідинної суміші запропоновано використовувати показники локального газовмісту [48,50]. Для розрахунку середнього газовмісту запропоновані емпіричні кореляції, що зв'язують газовміст безпосередньо з діаметром мішалки і частотою її обертання, які в основному ґрунтуються на результатах лабораторних досліджень [95-104].

Сойфер Р.Д., Кафаров В.В. [95] випробовуючи турбінні мішалки в апараті об'ємного типу отримали графічні залежності та емпіричні рівняння, що зв'язують газовміст в апараті безпосередньо з характеристикою перемішуючого пристрою – її діаметром та частотою обертання. Газовміст найчастіше представляють у вигляді функції середнього значення дисипації енергії при

даній частоті обертання діаметра мішалки або питомої потужності та приведеної швидкості газу, а також враховується вплив фізико-хімічних властивостей фаз. Цирлін А.М. [67] запропонував використовувати залежність питомого газовмісту від питомої потужності та швидкості газу, що відповідає руху бульбашок, віднесеної до повного перетину апарату.

Останнім часом в промисловості виникла потреба в широкому використанні об'ємних апаратів з самоусмоктуючими мішалками [46, 97-101], які в більшості випадків позбавлені тих вад, що властиві апаратам з турбінними мішалками.

Початок диспергування газу самоусмоктуючими мішалками відповідає деякій мінімальній швидкості перемішування [52,54-56,82,100,101], яка залежить від геометричних розмірів мішалки і апарату, частоти обертання перемішуючого пристрою і властивостей взаємодіючих фаз. Коли інтенсивність перемішування в апараті перевищує мінімальну швидкість перемішування, основна маса газу, що подається в апарат, диспергується у вигляді дрібних бульбашок і практично розподіляється у верхній частині перемішуємого об'єму апарату. Збільшення частоти обертання мішалки приводить до порушення стійкого розподілу газового реагенту в певних зонах апарату [72] та утворення умов для рівномірного розподілу газу або газового реагенту в перемішуємому об'ємі апарату тобто для збільшення газовмісту в перемішуємому об'ємі. Враховуючи, що в апаратах з самоусмоктуючими мішалками витрата газу жорстко пов'язана з конструктивними характеристиками мішалки, апарату та гідродинамікою перемішуємого середовища, слід чекати більш простого зв'язку газовмісту, середнього діаметру бульбашок та питомої поверхні контакту фаз від витрати газу, чим для апаратів зі звичайними мішалками та примусовою подачею газу в зону реакції через нерухомі пристрої або барботер. Злокарник М. [29] відзначає, що зміна вмісту бульбашок газу в рідині істотно впливає на щільність і в'язкість перемішуємого середовища, які відносно ускладнюють емпіричні залежності витрати газу від цих властивостей.

Для розрахунку масообміну, терміну контакту фаз і питомої поверхні розподілу фаз S необхідно знати середній діаметр бульбашок газу d_{II} , газовміст φ та швидкість w впливання бульбашок. Ці параметри необхідні для визначення по формулах [107, 109] терміну контакту τ і умовної міжфазної поверхні S :

$$\tau = \frac{H}{w}, \quad (1.5)$$

де, H - висота газорідного шару;

w – швидкість впливання бульбашки газу,

$$S = \frac{6\varphi}{d_{II}}. \quad (1.6)$$

Механізм подрібнення бульбашок газу в турбулентному потоці представляється [105,106] в основному аналогічним механізмом подрібнення крапель. Максимальний розмір бульбашок газу в турбулентному потоці рідини визначається відношенням сил динамічного тиску, що мають намір їх подрібнити, і сил поверхневого натягу, що визиває зворотну дію. Тому в апараті з перемішувачем відбувається інтенсивне подрібнення бульбашок на краях лопаті мішалки [108-110]. Розглядаючи подрібнення і стійкість бульбашок на основі теорії локальної однорідної та ізотронної турбулентності, як результат дії динамічних напорів в турбулентному потоці, автори [4,110,111] пропонують рівняння для визначення діаметру бульбашок газу d_{II} в турбулентному потоці рідини

$$d_{II} \approx 0,155 \left(\frac{\sigma}{\rho} \right)^{0,6} \left(\frac{\rho}{\rho_{\Gamma}} \right)^{0,2} \varepsilon^{-0,4}, \quad (1.7)$$

де ε - величина дисипації енергії в зоні обертання мішалки.

В апаратах об'ємного типу, при введенні потужності на перемішування газорідинної суміші в 1 кВт/м^3 і більше, діаметр бульбашок в зоні мішалки становить 1,5-2мм, а середній діаметр в основному об'ємі апарату складає 5-6мм, тобто в 2-4 рази більший, чим в зоні мішалки. Це обумовлено коагуляцією бульбашок біля внутрішньої поверхні обичайки апарату та під час їх спливання.

При випробуваннях газорідинного апарату об'ємного типу з відбійними перегородками і турбінною мішалкою, в який газовий компонент подається через барботер [112] автори установили, що при збільшенні частоти обертання мішалки з 10 до 25 с^{-1} , в перемішуємому об'ємі середній діаметр бульбашок газу знаходиться в діапазоні 2,1-2,4мм. Досліди проводилися при середній швидкості газу в перетині апарату 1,4-3,1м/с.

Аналізуючи роботу газорідинних апаратів, які використовуються при абсорбції важкорозчинних газів, автор [109] визначає, що за допомогою механічних перемішуючих пристроїв досягається:

- збільшення міжфазної поверхні фаз, за рахунок подрібнення бульбашок під впливом тангенційних напрямків;
- збільшення часу контакту фаз внаслідок зменшення швидкості впливання дрібних бульбашок;
- рівномірний розподіл бульбашок газу в усьому об'ємі рідини.

Режим роботи самоусмоктуючих мішалок такий, що початок виходу газу з каналів лопаті мішалки та його диспергування в барботажному шарі проходить при інтенсивній турбулентності перемішуємого об'єму, таким чином режим проскоку або захлинання в апаратах з самоусмоктуючими мішалками відсутній. Узагальнених або достатніх для такого узагальнення даних, що характеризують такий зв'язок, в літературі не виявлено.

Порівняння приведених в літературі даних по витратах газової фази і газовмісту для апаратів об'ємного типу з самоусмоктуючими мішалками з аналогічними даними для інших газорідинних апаратів з механічними перемішуючими пристроями свідчить про те, що в об'ємних апаратах з

мішалками середній питомий газівміст є функцією швидкості усмоктуємого газу, діаметру мішалки, діаметру апарату та фізико-хімічних властивостей рідини. Ці наукові роботи практично вичерпують літературні джерела, що стосуються визначення поверхні контакту фаз, питомого газівмісту барботажного шару і розмірів бульбашок газу для апаратів з механічними перемішувачами пристроями, в той же час їх недостатньо для апаратів з самоусмоктуючими ежекційними мішалками.

1.3 Потужність, споживана при перемішуванні в апаратах об'ємного типу

Одним із важливих робочих параметрів мішалок є витрата енергії, що вводить в перемішуємий об'єм, в залежності від конструктивних особливостей мішалок витрачається на створення циркуляційного потоку та турбулізацію перемішуємого середовища. Для перемішування рідин з достатньо високим діапазоном в'язкості рекомендовані турбінні та пропелерні мішалки [2,4,78,99-102], для яких за класичною методикою потужність N може бути розрахована

$$N = k_N \rho n^3 d_M^5, \quad (1.8)$$

де: k_N - критерій потужності;

ρ - щільність перемішуємого середовища, кг/м³;

n - частота обертання мішалки, об/с;

d_M - діаметр мішалки, м.

Коефіцієнт k_N в роботі [112] розглядається, як аналог критерію Ейлера, який у загальному випадку є змінною величиною, що залежить від типу мішалки, розмірів і конструкції апаратів та фізико-хімічних властивостей середовища. На критерій потужності впливають також розташовані на внутрішній стороні обичайки апарату відбійні перегородки, призначені для призупинення частоти обертання перемішуємого середовища. Зменшення кількості числа перегородок [77] приводить до зменшення числа Ейлера на 10-20%. В літературі [4,113] приведені експериментальні залежності критерію потужності k_N від відцентрового числа Рейнольдса, який в залежності від конструктивних відмінностей мішалок є змінною величиною [2-4,114]. У зв'язку з цим пропонується використовувати метод розрахунку потужності, як величину кутової швидкості валу мішалки помноженої на момент, що крутить, який діє на лопаті [115-117]

$$N = M\omega = \rho Vrw, \quad (1.9)$$

де: N - момент, що крутить на валу мішалки, Нм;

ω - кутова швидкість мішалки, рад/с;

V - витрата рідини через мішалку, м³/с;

r - зовнішній радіус мішалки, м;

w - складова колової швидкості рідини на виході з мішалки, м/с.

Введення газу за допомогою спеціальних пристроїв в апарати об'ємного типу з перемішувачами, наприклад, мішалками турбінного типу та їх удосконалені конструкції [8,99-101] і отримання у них газорідинної суміші призводить до зниження потужності, споживаної на перемішування, унаслідок зменшення щільності перемішуваного газорідинного середовища в апараті та особливо в зоні лопатей мішалки [118-124]. Це прийнято враховувати виразом

$$\frac{N_G}{N} = f\left(\frac{V_G}{nd_M^3}\right), \quad (1.10)$$

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

В об'ємних апаратах з перемішувачами [122,124] при турбулентному режимі перемішування, потужність, що витрачається на перемішування газорідинної суміші не залежить від способу вводу газу: через самоусмоктуючі мішалки або через нерухомий барботер, розташований під швидкообертовою мішалкою.

Під час визначення конструкції апарату об'ємного типу для проведення газорідинних реакцій виникає необхідність оцінки ефективності або оптимальності перемішувачів за допомогою критерію ефективності або оптимальності. Для радіально-лопатевих мішалок [125] рекомендовано використовувати в якості критерію ефективності формулу

$$\Theta = \frac{N V_{ж}}{Q Q}, \quad (1.11)$$

де: N – потужність перемішуючого пристрою, кВт; Q – об’ємна витрата рідини відкиданої лопатями мішалки, м³/с; $V_{ж}$ – перемішуємий об’єм рідини, м³.

За цією формулою прості і складні по конструкції радіально-лопатеві мішалки однаково ефективні. 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.

Критерієм ефективності для апаратів об’ємного типу з самоусмоктуючими мішалками [100] запропоновано враховувати питому поверхню фаз відносно співвідношення між діаметрами мішалки і апарату. У роботі [55] для певного типу самоусмоктуючих мішалок проведені дослідження з визначення середнього та локального газовмісту, за отриманими результатами приводиться формула

$$\frac{K_{N(\Gamma-P)}}{K_{N(P)}} = 1 - \varphi, \quad (1.12)$$

де: $K_{N(\Gamma-P)} = \frac{N_{(\Gamma-P)}}{\rho_p n^3 d_M^5}$ - критерій потужності для двофазної газорідинної

системи, який залежить тільки від середнього газовмісту;

K_p - критерій потужності при перемішуванні однофазного середовища.

Ця формула добре корелюється з експериментальними даними приведеними в роботах [104,125].

З розглянутого літературного огляду виходить, що розроблені і впроваджені в виробництво в хімічній, гідрометалургійній, біохімічній, харчовій і інших технологіях самоусмоктуючі мішалки представляють собою різні по

конструкції механічні пристрої, механізм усмоктування газу якими вимагає більш досконалого експериментального вивчення і теоретичного обґрунтування.

1.4 Висновки, постановка задачі дослідження

Згідно літературних джерел та огляду патентів питанню гідродинаміки в газорідинних апаратах з перемішувачами та конструкціям масообмінних апаратів приділяється достатньо уваги, а газорідинні апарати з механічними перемішувачами в останній час отримали широке розповсюдження в хімічній та нафтопереробній промисловості при проведенні ряду хімічних процесів абсорбції або хемосорбції. В них найчастіше всього використовуються стандартні відкриті турбінні мішалки з шістьма вертикальними прямими лопатями з подачею газового реагенту в зону реакції через газорозподільчі пристрої, що розташовані під мішалкою. Для таких цілей використовуються також апарати об'ємного типу з самоусмоктуючими мішалками різних конструкцій, які володіють рядом переваг в порівнянні із звичайними барботажними апаратами, забезпечуючи багаторазове використання газового субстрату в замкнутому об'ємі апарату та більший газовміст перемішувачої рідини за рахунок значної турбулентності та ретельного подрібнення бульбашок газу. Ці апарати мають перспективу використання для процесів ферментації, абсорбції. Значна кількість публікацій з гідродинаміки та масообміну в цих апаратах свідчить про актуальність таких досліджень в той же час їх недостатньо для проведення і використання в процесах хемосорбції, окислення, сульфурвання та хлорування вуглеводнів.

Основними параметрами апаратів з самоусмоктуючими мішалками є продуктивність по газовій фазі, газовміст та витрати потужності на перемішування, для визначення яких запропоновані емпіричні залежності отримані на основі лабораторних випробувань. Запропоновані розрахункові критеріальні рівняння, що базуються на методах масштабування, не враховують фізичний процес усмоктування газового реагенту.

Ефективність роботи газорідних апаратів, по можливості, повинна досягатися за рахунок поліпшення гідродинамічних засобів, що поєднують сукупність відомих теоретичних та експериментальних даних, яких на цей час для самоусмоктуючих мішалок недостатньо. Вивчення гідродинамічних особливостей роботи в апаратах об'ємного типу з самоусмоктуючими мішалками та розробка оптимального методу розрахунку насосної продуктивності, газовмісту та поверхні контакту фаз, потужності в апаратах з самоусмоктуючими мішалками є метою даної роботи.

Досягнення поставленої мети стає можливим при послідовному вирішенні експериментальних і теоретичних досліджень, зокрема:

- проведення експериментальних випробувань самоусмоктуючих мішалок з різними конфігураціями поперечного перетину порожнистих лопатей з метою виявлення і обґрунтування механізму процесу усмоктання газу або повітря;
- вивчення умов та механізму формування газорідної системи;
- впровадження нових підходів при конструюванні самоусмоктуючих мішалок, які підвищують ефективність їх роботи в режимі самоусмоктання;
- вивчення структури газорідної суміші в вертикальному перерізі апарату, залежності насосної продуктивності, середнього та локального газовмісту від геометричних параметрів апарату та мішалки;
- проведення випробування нових конструкцій самоусмоктуючих мішалок та виявлення і пошук детермінованого зв'язку між насосною газовою продуктивністю мішалки та гідродинамікою руху газової фази;
- вивчення впливу газовмісту на критерій потужності.
- розробка інженерної методики конструктивного розрахунку об'ємних газорідних реакторів з надійним методом оцінки стану адекватності;
- дослідно-промислова апробація на реальних системах з метою впровадження розроблених конструкцій в промисловість;

РОЗДІЛ 2

ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНА УСТАНОВКА ДЛЯ ВИВЧЕННЯ ГІДРОДИНАМІКИ В ГАЗОРІДИННИХ АПАРАТАХ З САМОУСМОКТУЮЧИМИ МІШАЛКАМИ

Проведений огляд та аналіз устаткування та гідродинаміки газорідинних апаратів показав, що на сьогоднішній день в промисловості для проведення газорідинних реакцій в масообмінних та реакційно-дифузійних процесах, доволі часто, використовують апарати об'ємного типу з перемішуючими пристроями з подачею газового реагенту через барботер або реактори об'ємного типу з самоусмоктуючими мішалками. Останні апарати є більш перспективними внаслідок того, що самоусмоктуючі ежекційні мішалки, крім впровадження інтенсивної турбулізації перемішуємого об'єму, здатні одночасно виконувати функцію пристрою, що приводить до руху газового реагенту і подачу його безпосередньо в зону реакції, виконуючи роль рухомого барботеру. Самоусмоктуючі ежекційні мішалки представляють собою порожнистий ротор, на утворюючій поверхні якого розташовані прорізи з привареними порожнистими лопатями. В середині ротору мішалки може розміщатися ежекційний диск, що поділяє внутрішній простір ротору на дві частини, а також вхідний канал в порожнисті лопаті з певною пропорцією. Такі конструкції самоусмоктуючих ежекційних мішалок дозволяють проводити процеси пов'язані з поглинанням газів рідиною і масообмінні процеси, що супроводжуються хімічною реакцією, наприклад: сульфування, хлорування, озонування та ін.

Випробовування гідродинаміки газорідинних систем в апаратах з самоусмоктуючими мішалками є метою визначення насосної продуктивності по газу і рідині в залежності від особливостей конструкції мішалок, середнього та локального газовмісту і умовної поверхні контакту фаз в перемішуємому середовищі апарату та розробка методики гідродинамічного розрахунку об'ємних апаратів з самоусмоктуючими ежекційними мішалками.

Експериментальні зразки самоусмоктуючих ежекційних мішалок досліджені в науково-дослідній лабораторії на кафедрі процеси та обладнання хімічних та нафтопереробних виробництв (Сумський державний університет).

2.1 Експериментальна установка для проведення гідродинамічних випробувань самоусмоктуючих мішалок в апаратах об'ємного типу

Для визначення впливу основних геометричних форм та параметрів самоусмоктуючих ежекційних мішалок на їх насосну продуктивність по газовій фазі та рідині на експериментальних стендах, схема і фото яких представлена на (рис. 2.1) і (рис. 2.2), були проведені гідродинамічні випробування самоусмоктуючих ежекційних мішалок з різними геометричними формами лопаті мішалки від частоти обертання в апаратах об'ємного типу різного діаметру з відбійними перегородками (рис. 2.2а,б) та статором (рис. 2.2в). Схема експериментального стенду (рис. 2.1) включає в себе апарат об'ємного типу 1 (рис. 2.3) з самоусмоктуючою ежекційною мішалкою (рис. 2.3б), 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 газорідинної 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 ежекційної мішалки 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.

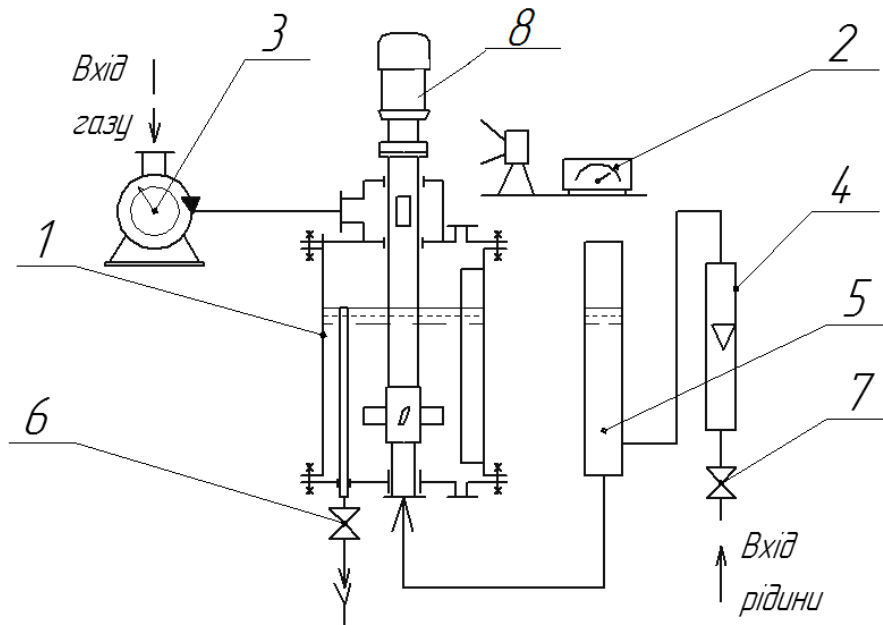


Рисунок 2.1 – Схема експериментального стенда для проведення гідродинамічних випробувань в апараті об'ємного типу з самоусмоктуючими ежекційними мішалками: 1 – апарат об'ємного типу з самоусмоктуючою мішалкою; 2 – електронний стробоскопічний тахометр; 3 – газовий лічильник; 4 – ротаметр для рідини; 5 – проміжний прозорий стакан; 6 – кран; 7 – регулюючий вентиль; 8 – електродвигун.

При збільшенні частоти обертання мішалки, внаслідок самоусмоктуючого ефекту, рідина, що надходить з проміжного стакану 5 в порожнину нижньої частини мішалки потрапляє через щілинні отвори в порожнисті лопаті і далі в перемішуємий об'єм. Зменшення висоти рівня рідини в проміжному стакані 5 компенсувалося відкриттям регулюючого вентиля 7 і контролювали за допомогою ротаметру 4. Продуктивність мішалки по газовій фазі контролювали за допомогою газового лічильника 3 і секундоміру.



а)



б)



в)

Рисунок 2.2 – Фото експериментальних стендів для проведення випробувань самоусмоктуючих ежекційних мішалок

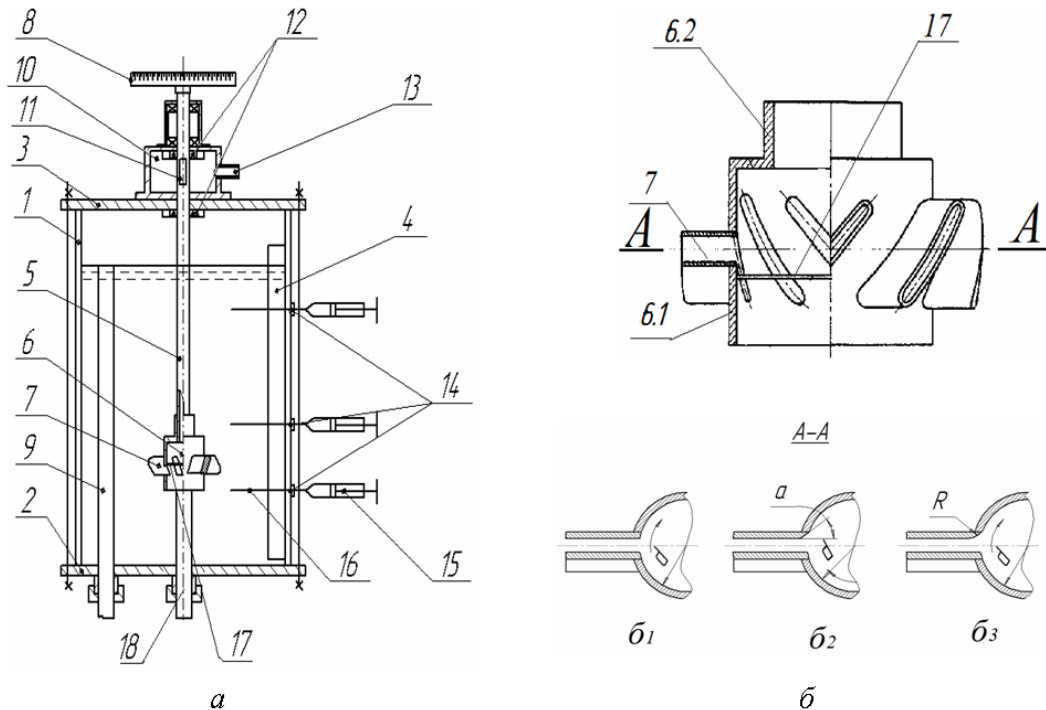


Рисунок 2.3 – Лабораторна модель апарату об'ємного типу (а); самоусмоктуюча ежекційна мішалка (б): 1 – вертикальна циліндрична обичайка із органічного скла; 2 – днище; 3 – кришка; 4 – відбивна перегородка; 5 – порожнистий вал; 6 – самоусмоктуюча ежекційна мішалка; 6.1 – ротор самоусмоктуючої мішалки; 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.

Експериментальний стенд включає в себе апарат об'ємного типу, параметри якого виготовлені відповідно таблиці 2.1, з самоусмоктуючою ежекційною мішалкою, зображений на рисунку 2.3а. На прозорому циліндричному корпусі апарату 1, виготовленому із органічного скла закріплені на кутовій відстані 120° три відбійні перегородки 4 шириною 0,1 діаметра апарату. Циліндричний корпус обмежений плоским металевим днищем 2 і плоскою металевою кришкою 3. Герметичність з'єднань днища та кришки з циліндричним корпусом забезпечується гумовими прокладками при затягуванні

шпильками. В апараті вздовж його осі розташований консольний вал 5 виготовлений із безшовної нержавіючої трубки з умовним діаметром 25 мм та цільнометалевого хвостовика. На торці порожнистої частини валу закріплюється самоусмоктуюча ежекційна мішалка 6, конструкція якої зображена на рисунку 2.3б.

Таблиця 2.1 – Діапазон параметрів апарату об'ємного типу та самоусмоктуючих мішалок

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_0 , м	0,008 – 0,016
Висота плоскої лопаті мішалки, h , м	0,02
Ширина плоскої лопаті мішалки, a , м	0,004 – 0,008
Число лопатей мішалки, z , шт.	2; 3; 6
Кут скосу вхідної кромки в порожнисту лопать, α , град.	45, 60, 90 ⁰
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

Самоусмоктуючі мішалки представляють собою перемішуючі пристрої виконані у вигляді циліндричного порожнистого ротору 6.1 (рис. 2.3б), на утворюючій поверхні якого профрезировані циліндричні отвори певного діаметру або щілинні канали, виконані з співвідношенням сторін 1:4. З зовні до поверхні ротору 6.1 припаяні або приварені порожнисті лопаті 7 відповідного профілю, виліт яких визначає діаметр мішалки d_M . Зверху циліндрична частина

мішалки обмежена плоским кільцем з маточиною 6.2 призначеною для закріплення мішалки на порожнистому валу. В середині циліндричного ротору 6.1 розміщена ежекційна перегородка 17, яка має можливість переміщуватися в вертикальному напрямку, змінюючи при цьому співвідношення площ вхідного каналу в пропорції $1/3$, $1/2$, $2/3$ (рис. 2.3) для газової фази та рідини відповідно.

В період проведення лабораторних випробувань було виготовлено два типа роторів, які відрізнялися конфігурацією вхідного каналу в порожнисті лопаті: з прямими вхідними кромками та зі зміненою конфігурацією вхідної кромки, що прилягає до лобової поверхні порожнистої лопаті.

Ці мішалки, в разі необхідності, можуть працювати в режимі самоусмоктування по газовій фазі, по рідині або в режимі газ-рідина, для цього в самоусмоктуючих мішалках перекривалися газовий або рідинний канали за допомогою гумової пробки. За період експериментальних випробувань використовувалися самоусмоктуючі мішалки з 2-6 порожнистими лопатями, поперечний перетин яких виготовлений відповідно таблиці 2.1.

В конструкції лабораторної моделі апарату (рис. 2.3б) передбачено також установку статора в зоні обертання самоусмоктуючої мішалки, в даному випадку відбивні перегородки були демонтовані. Змонтований статор представляє собою два кільця з внутрішнім та зовнішнім діаметром відповідно $1,1d_m$ і $1,5d_m$, що з'єднуються між собою вертикальними пластинами. Статор, висота якого дорівнює $0,4d_m$, монтується в апараті таким чином, що площа обертання мішалки поділяє його навпіл.

Під час випробувань кількість пластин статора змінювалась 4, 6, 8. Закріплена на кришці апарату 3 (рис. 2.3а) розподільча коробка 10 має штуцер 13, призначений для підключення з газовим лічильником 3 (рис. 2.1), за допомогою якого вимірюється витрата повітря в режимі самоусмоктування через порожнисті лопаті 7 самоусмоктуючих мішалок 6. По центру днища 2 апарату (рис. 2.3а), розташований штуцер 18, який має можливість переміщення вертикально по осі апарату, призначений для подачі рідини безпосередньо в нижню частину порожнистого ротору самоусмоктуючої мішалки.

2.2 Методика дослідження насосної продуктивності самоусмоктуючих мішалок

В апаратах об'ємного типу з перемішувачами пристроями призначених для проведення газорідних реакцій основною характеристикою є середній газоміст перемішуваного середовища, який залежить від умов введення газового реагенту та інтенсивності перемішування газорідної суміші. В період проведення експериментальних випробувань використовувалися самоусмоктуючі ежекційні мішалки з порожнистими лопатями з формою поперечного перетину у вигляді кола та щілини, виготовлені з геометричними розмірами відповідно таблиць 2.1 і 3.1.

Для визначення найбільш ефективну конструкцію самоусмоктуючого пристрою в лабораторії були виготовлені дві серії самоусмоктуючих ежекційних мішалок з різною формою обтікання порожнистих лопатей, які відрізняються між собою конфігурацією вхідного каналу (рис. 2.3б) з порожнини ротору в порожнину лопаті.

Плоскі порожнисті лопаті самоусмоктуючих ежекційних мішалок на роторі були розташовані вертикально або під кутом до осі обертання. В експериментальних випробуваннях використовувалися мішалки першої серії з щілинними каналами без обробки кромки вхідного каналу (рис. 2.3б, переріз А-А, вид б₁) та другої серії з обробленою кромкою зі сторони лобової поверхні порожнистої лопаті у вигляді кутового спряження (рис. 2.3б, переріз А-А, вид б₂) або округленням (переріз А-А, вид б₃).

Для роботи лабораторної установки у періодичному або безперервному режимах у плоскому днищі апарату розміщений штуцер 18 (рис. 2.3) призначений для подачі рідини і штуцер з вмонтованою переливною трубкою 9 (рис. 2.3), яка оснащена краном 6 (рис. 2.1). Переливна трубка 9 має можливість переміщатися в вертикальному напрямку для регулювання висоти рівня рідини або газорідної суміші в апараті. Штуцер 18 також має можливість переміщення по осі апарату в вертикальному напрямку і, при необхідності, може

мати ущільнення, яке дозволяє проводити визначення насосної продуктивності мішалки по рідині в режимі самоусмоктування.

Таке конструктивне виконання лабораторної моделі апарату (рис. 2.3) дає можливість швидко проводити заміну дослідних самоусмоктуючих ежекційних мішалок та проводити випробування по визначенню продуктивності самоусмоктуючої мішалки окремо по газовій фазі або рідині, або одночасно по газовій фазі та рідині в режимі самоусмоктування. Експерименти проводилися в об'ємних апаратах діаметром 0,25-0,4м з самоусмоктуючими мішалками діаметром 0,065-0,13м. В період випробувань частоту обертання валу мішалки змінювали від 3,0 до 30,0 об/с. Об'єм усмоктуємого газу під час випробувань визначали по газовому лічильнику ГСБ-400, а рідини – за допомогою ротаметру РС-5. Рівень рідини або газорідинної суміші в апараті визначали за допомогою трьох лінійок з міліметровою шкалою рівномірно розмішених по колу прозорі обичайки і закріплених з зовнішньої сторони або установлені висоти переливної трубки 9 (рис. 2.3).

Під час лабораторних випробувань в періодичному режимі по рідині в апараті (рис. 2.3) закривали переливну трубку, воду або водно-гліцеріновий розчин заливали в об'єм апарату на попередньо визначену висоту, яку відміряли від верхньої кромки порожнистої лопаті самоусмоктуючої мішалки.

Для проведення випробувань в безперервному режимі подачі рідини в об'ємному апараті 1 (рис. 2.1) на переливній трубці відкривався кран 6, патрубок подачі рідини 18 (рис. 2.3) забезпечувався торцевим ущільненням, яке дозволяло потрапляння рідини з проміжного стакану 5 (рис. 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 (рис. 2.1) 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 (рис. 2.3).

В самоусмоктуючих мішалках з плоскими порожнистими лопатями типу 8 (таблиця 3.1) (рис. 2.3) в порожнині ротору розміщали ежекційну перегородку 17, яка призначена для одночасного усмоктування газової фази із порожнини полого валу і рідини із перемішуючого об'єму або рідини, що подається в об'єм апарату через патрубок 18 (рис. 2.3). Для цього самоусмоктуючі ежекційні мішалки були виготовлені двох серій: у мішалок першої серії порожнисті лопаті приєднувалися до отворів на утворюючій поверхні ротору в радіальному напрямку, в них кромки вхідного отвору спрямовані під прямим кутом; другої серії – кромка вхідного отвору із сторони лобової поверхні лопаті має округлу поверхню або поверхню з певним кутом скосу (45° або 60°) по відношенню до лобової поверхні порожнистої лопаті.

Заміну експериментальних моделей самоусмоктуючих мішалок в апараті об'ємного типу проводили шляхом від'єднання днища апарату разом з обичайкою від кришки.

Під час лабораторних випробувань в якості рідини використовували воду при періодичному та безперервному режимах подачі та водно-гліцеринові розчини з динамічною в'язкістю до $5 \cdot 10^{-3}$ Па·с при періодичному режимі.

2.3 Методика проведення дослідження середнього та локального газовмісту в апаратах

Основною характеристикою масообмінних апаратів з механічними перемішуючими пристроями для процесів в системі газ-рідина є газовміст перемішуючого середовища, величина якого необхідна для визначення об'єму апарату та розрахунку витрат потужності на перемішування. Незважаючи на значну кількість літературних джерел з емпіричними рівняннями по визначенню

газовмісту в об'ємних апаратах, при використанні самоусмоктуючих ежекційних мішалок в якості барботеру, який обертається, в газорідинних апаратах відомі рівняння неприйнятні. Тому виникає необхідність для вивчення структури перемішуемого середовища, середнього та локального газовмісту в апаратах з самоусмоктуючими ежекційними мішалками.

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 см³.

На експериментальному стенді (рис. 2.1) проводили випробування самоусмоктуючих ежекційних мішалок з продуктивності по газовій фазі. Для цього лабораторну модель апарату (рис. 2.3) заповнювали водою або розчином гліцерину в воді на певну висоту. Вмикали електродвигун і далі поступово збільшували частоту обертання мішалки з певним інтервалом та визначали насосну продуктивність самоусмоктуючої мішалки по газовій фазі та рідині в режимі самоусмоктування за показниками газового лічильника і висоту зростання газорідинної суміші в перемішуємому об'єму апарату по відношенню до висоти початкового рівня рідини H_p в апараті. При певній частоті обертання самоусмоктуючої ежекційної мішалки проводили 5-7 замірів висоти газорідинної суміші, далі середньозважені дані заносили в таблиці та визначали середній газовміст $\bar{\varphi}$ перемішуючого середовища в апараті по формулі [1]

$$\bar{\varphi} = \frac{\Delta H}{\Delta H + H_p}. \quad (2.1)$$

В період випробувань при фіксованій частоті обертання мішалки також проводили замір локального газовмісту φ_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 (рис. 2.3) за допомогою медичного шприцу 11 об'ємом 20 см^3 , сполученого із зондом. Зонд представляє собою трубку діаметром 3мм з внутрішнім діаметром 1,8 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. При визначенні локального газовмісту φ_0 використовували середнє значення об'єму повітря в шприці V_p^{III} із 3-5 проб та визначали за формулою

$$\varphi_0 = \frac{20 - V_p^{III}}{20}, \quad (2.2)$$

де V_p^{III} - об'єм рідини в середині шприця, см^3 .

Дані експериментальних випробувань середнього та локального газовмісту в апаратах з самоусмоктуючими ежекційними мішалками та результати з продуктивності мішалки, записували в таблицю 2.3. В період випробувань відхилення частоти обертання валу від середнього значення складало не більше 3-5%.

2.4 Методика дослідження потужності, що витрачається самоусмоктуючими перемішуючими пристроями

Вимірювання потужності, що витрачається на перемішування самоусмоктуючими мішалками, проводили безпосередньо на валу мішалки за допомогою спеціальної муфти 8 (рис. 2.3), яка одночасно дозволяє визначати крутний момент на валу мішалки для подальшого розрахунку витрат енергії на перемішування рідини та газорідинної суміші. Конструкція пружинної муфти зображена на рисунку 2.4.

На вихідному валу 8.1 електродвигуна закріплена верхня напівмуфта 8.2, циліндрична зовнішня поверхня якої ззовні має паз 8.3 для навивки троса, яким

здійснювали тарування спіральної пружини 8.4. Швидкість обертання електродвигуна передається валу мішалки 8.6 за допомогою плоскої сталеві пружини. Пружина розміщена в просторі, що обмежений горизонтальною і циліндричною поверхнями напівмуфти 8.2 та горизонтальною напівмуфтою 8.5, яка закріплена на хвостовику вала мішалки 8.6. Спіральна пружина приєднується по внутрішньому діаметру до нижньої напівмуфти 8.5, а по зовнішньому діаметру – до верхньої напівмуфти 8.2. На зовнішній циліндричній поверхні напівмуфти 8.2 по колу нанесена градусна шкала 8.7 в межах 0-360° для визначення кута закручування спіральної пружини. Для цього на нижній напівмуфті 8.5 закріплена стрілка-індикатор 8.8 призначена для зняття кута закручування металеві спіральної пружини. Передача крутного моменту муфти забезпечується шпонками 8.9. Після проведеного тарування спіральної пружини [2] були складені таблиці та побудований графік залежності кута повороту вала від навантаження (рис. 2.5).

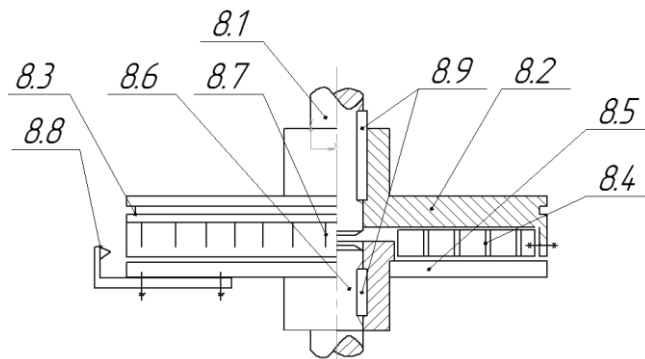


Рисунок 2.4 – Пристрій для вимірювання потужності перемішуючого пристрою: 8.1 – вал електродвигуна; 8.2 – верхня частина кільця з поділом на кути; 8.3 – паз для тарування пружини; 8.4 – пружина; 8.5 – нижнє кільце; 8.6 – вал мішалки; 8.7 – вимірювальна шкала; 8.8 – стрілка-індикатор; 8.9 – шпонки;

Експерименти по визначенню потужності на перемішування були проведені в об'ємному апараті з відцентрово-ежекційними самоусмоктуючими мішалками діаметром $d_M = 0,063-0,18\text{м}$. Спочатку в моделі апарату порожнистий

вал закривали гумовою пробкою таким чином позбавляли відцентрово-ежекційні самоусмоктуючі мішалки властивості усмоктування газового середовища, тобто перемішування проводилося в однорідному рідинному середовищі.

Під час обертання мішалки опір перемішуємого середовища сприймає лобова частина лопаті, величина якого вирівнювалася за рахунок закручування плоскої пружини на певний кут. Вимірювання кута повороту проводилося оптичним засобом за допомогою стробоскопу фіксували положення стрілки-індикатора та її кут відносного повороту. Далі були проведені випробування потужності самоусмоктуючих мішалок в режимі самоусмоктування газової фази. Під час випробувань при сталій частоті обертання мішалки проводили

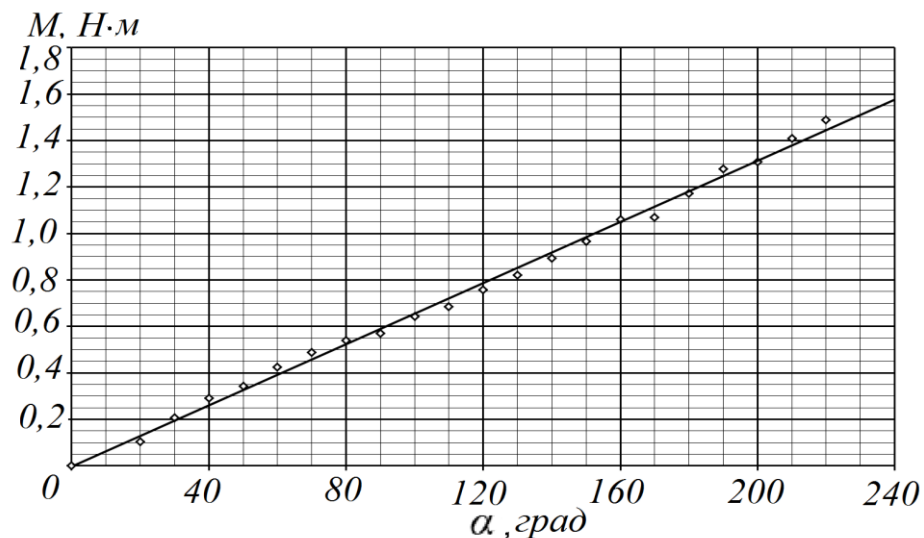


Рисунок 2.5 – Графік залежності крутного моменту від кута повороту вала

вимірювання продуктивності по газовій фазі, середнього та локального газовмісту і потужність. Багаторазові визначення величини потужності та швидкості обертання мішалки під час випробувань не перевищує 5%. Отримані дані заносилися в таблиці які представлені у вигляді графічних залежностей.

2.5 Оцінка похибки методики досліджень та похибок експериментальних вимірів

Для визначення оптимальної кількості експериментів та підвищення їх достовірності були використані загально відомі методи математичної статистики [126-129].

Усі помилки, що виникають в період проведення експериментальних досліджень є сумою випадкових та систематичних помилок. Тому для уникнення систематичних помилок під час експерименту використовувалися прилади, що пройшли метрологічну перевірку та були відкалібровані по зразкових приладах. Похибка вимірів визначалась класом точності засобів виміру.

В період проведення експериментальних випробувань визначення певного параметру проводилося при збереженні однакових умов експерименту. Опиту повторювали кілька разів, а для вилучення випадкових помилок в період експерименту визначали середнє зважене значення, яке і заносилося до таблиць, використовуючи залежність

$$\bar{x} = \frac{x_1 + x_2 + \dots + x_n}{n} \quad (2.3)$$

де x_1, x_2, \dots, x_n – результати повторних вимірювань;

n – число однакових вимірів.

Для оцінки випадкової помилки визначали дисперсію для кожної серії паралельних випробувань [127]:

$$S_i = \frac{1}{n-1} \left(\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2 \right) \quad (2.4)$$

Найбільшу вірогідну помилку в окремому вимірі визначали за правилом трьох сігм [126,129]:

$$\Delta = 3\sigma \quad (2.5)$$

де $\sigma = \sqrt{S}$ - середньоквадратичне відхилення.

Точність отриманих рівнянь регресії визначали за методом найменших квадратів [130].

2.6 Висновки до другого розділу

Обґрунтований вибір об'єкту експериментальних досліджень – апарат об'ємного типу з різними конструкціями самоусмоктуючих ежекційних мішалок, які конструктивно складається з циліндричного ротору з циліндричними або щілинними отворами на утворюючій поверхні, до яких з зовнішньої сторони припаяні відповідного профілю порожнисті лопаті. Для моделювання гідродинаміки газорідинних систем у об'ємних апаратах виникає необхідність встановлення характеру процесу усмоктування газового потоку і рідини самоусмоктуючими мішалками.

Змонтована на експериментальному стенді лабораторна модель апарату об'ємного типу призначена для випробування серії самоусмоктуючих ежекційних мішалок з метою визначення насосної продуктивності по газовій фазі та рідині. Розроблені методики проведення експериментів з визначення насосної продуктивності самоусмоктуючих ежекційних мішалок, середнього і локального газовмісту в апараті та потужності на перемішування однорідної рідини і газорідинної суміші.

Основні наукові результати розділу опубліковані в працях [133,134,149-152]

РОЗДІЛ 3

МЕХАНІЗМ УСМОКТУВАННЯ ГАЗОВОГО ПОТОКУ САМОУСМОКТУЮЧИМИ ЕЖЕКЦІЙНИМИ МІШАЛКАМИ

3.1 Задачі експериментального дослідження

Проведений літературний огляд свідчить про те, що питанню гідродинаміки в об'ємних апаратах з ежекційними самоусмоктуючими мішалками недостатньо приділяється уваги, незважаючи на потреби хімічної та нафтопереробної промисловості в таких апаратах, проте актуальність і необхідність їх впровадження в виробництва, які супроводжуються ендотермічними хімічними реакціями між газовими реагентами і рідиною, наприклад: окислення, озонування, сульфування та хлорування, диктується вимогами державних та міжнародних організацій з охорони навколишнього середовища. Поява новітніх вдосконалених розробок реакторів з самоусмоктуючими ежекційними мішалками безпосередньо призначених для проведення певних технологічних процесів уповільнюється у впровадженні в технологічне виробництво в наслідок відсутності теоретичного обґрунтування процесу усмоктування газового реагенту мішалками та алгоритму розрахунку таких апаратів.

Тому виникає необхідність в проведенні гідродинамічних випробувань вище зазначених самоусмоктуючих ежекційних мішалок в апаратах об'ємного типу з метою визначення: початкової частоти обертання, коефіцієнту опору і продуктивності тільки по газовій фазі та сукупної продуктивності по газовій фазі та рідині самоусмоктуючої мішалки, середнього та локального газовмісту перемішуючого середовища в об'ємі апарату та потужності на перемішування газорідинної суміші в залежності від частоти обертання, конструктивних особливостей і геометричних параметрів самоусмоктуючих ежекційних мішалок.

3.2 Початкова частота обертання самоусмоктуючих ежекційних мішалок та коефіцієнт гідравлічного опору порожнистих лопатей

На експериментальному стенді (рис. 2.1) в апараті об'ємного типу (рис. 2.3) були проведені гідродинамічні випробування самоусмоктуючих ежекційних мішалок (таблиця 2.1) з метою визначення початкової частоти обертання та коефіцієнтів опору порожнистих лопатей з різною поперечною конфігурацією. Для цього в лабораторній моделі апарату об'ємного типу (рис. 2.3) на порожнистому валу закріплювали досліджувану самоусмоктуючу ежекційну мішалку, установлювали прозору циліндричну обичайку, плоске днище апарату і з'єднували їх з кришкою апарату з розподільчим пристроєм, забезпечуючи герметичність.

Далі об'єм апарату заповнювали водою або водно-гліцериним розчином на певну висоту, яку контролювали за допомогою міліметрової лінійки. При цьому робоча рідина, крім об'єму апарату, заповнювала внутрішні пустоти самоусмоктуючої мішалки та порожнину валу на таку ж саму висоту, відтворюючи гідродинамічну рівновагу системи. При нерухомій мішалці рідина, що знаходиться в середині апарату врівноважується з рідиною в порожнистому валу, енергетичний стан її може бути описаний рівнянням

$$\Delta P_B + \Delta P_{\text{Ц}} + \Delta P_{\text{Л}} - \Delta P_{\text{ГС}} - \Delta P_{\text{Г}} = 0, \quad (3.1)$$

де ΔP_B - тиск стовпа рідини в порожнистому валу мішалки, Па;

$\Delta P_{\text{Ц}}$ - перепад тиску за рахунок відцентрової сили, Па;

$\Delta P_{\text{Л}}$ - 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.

Вмикання електродвигуна та поступове збільшення частоти обертання валу самоусмоктуючої мішалки приводить до зміни енергетичного стану

системи, який можна розбити на декілька етапів та пояснюється певними режимами роботи відповідно до рисунку 3.1. Збільшення частоти обертання самоусмоктуючої мішалки приводить до відтворення відцентрової сили, яка діє на рідину в порожнині лопатей, та створення певної величини розрідження, що виникає внаслідок обтікання поверхні порожнистої лопаті перемішуємою рідиною.

Внаслідок дії цих сил у середині самоусмоктуючої мішалки та порожнистих лопатях зростає перепад тиску, який приводить до руху рідини від осі обертання до периферії порожнистих лопатей мішалки і, як наслідок, до зниження висоти стовпа рідини всередині порожнистого валу. При певній частоті обертання мішалки система стабілізується за рахунок зменшення висоти стовпа рідини h_B в порожнистому валу (рис. 3.1а).

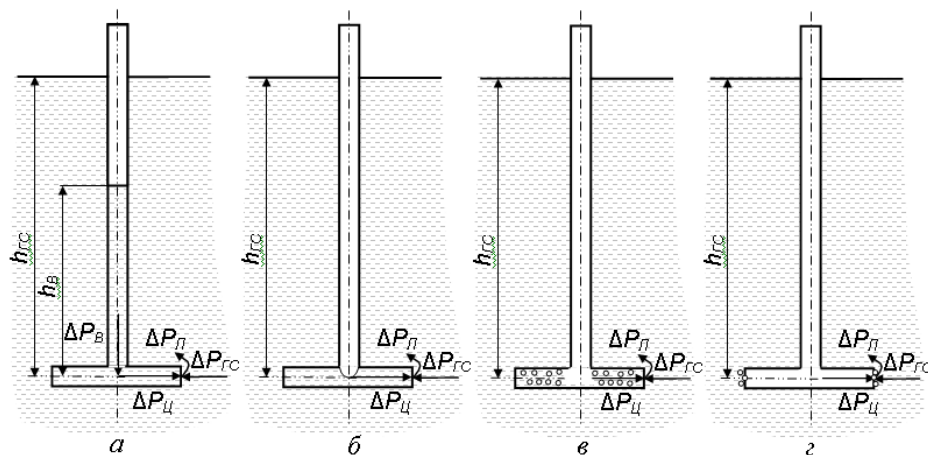


Рисунок 3.1 – Характерні режими роботи відцентрово-ежекційної мішалки: мішалка обертається з частотою при якій: *а* - рідина в порожнині валу мішалки опускається на певний рівень h_B ; *б* - рідина в порожнині валу мішалки опускається на рівень осі порожнистої лопаті $h_{ГС}$; *в* - газ починає змішуватись з рідиною у порожнині лопаті; *г* - газ починає виходити з лопаті в апарат.

Подальше збільшення частоти обертання самоусмоктуючої мішалки приводить до того, що рідина в порожнистому валу знову знижується, і при певній частоті обертання лінія розподілу між повітрям і рідиною досягає рівня

порожнистих лопатей $h_B = 0$ (рис. 3.1б), при цьому гідростатичний стовп рідини в порожнині валу дорівнює $\Delta P_B = 0$ та виникає можливість для проникнення газу в порожнину лопатей мішалки. В даному випадку рівняння (3.1) приймає вигляд

$$\Delta P_{\text{Ц}} + \Delta P_{\text{Л}} - \Delta P_{\text{ГС}} - \Delta P_{\text{Г}} = 0. \quad (3.2)$$

Починаючи із цього моменту збільшення частоти обертання мішалки приводить до змішування бульбашок газу з рідиною в порожнині лопаті та до зміни перепаду тиску за рахунок дії відцентрової сили (рис. 3.1в)

$$\Delta P_{\text{Ц}} = 0,5\pi^2 d^2 n^2 \xi_{\text{Ц}} [\rho_B(1 - \varphi_{\text{Л}}) + \rho_{\text{Г}}\varphi_{\text{Л}}] , \quad (3.3)$$

де $d_{\text{М}}$ - діаметр мішалки, м; n - частота обертання мішалки, с^{-1} ;

ρ_B - щільність води, $\text{кг}/\text{м}^3$;

$\rho_{\text{Г}}$ - щільність газу, $\text{кг}/\text{м}^3$;

$\varphi_{\text{Л}}$ - питомий газовміст в порожнині лопаті, м^3 газу/ м^3 суміші;

$\xi_{\text{Ц}}$ - коефіцієнт, що враховує гідравлічний опір і нерівномірність рідини у лопаті.

При певній частоті обертання мішалки газ заповнює усю порожнину лопаті ($\varphi_{\text{Л}} \approx 1$) і починає виходити з неї (рис. 3.1г) у вигляді поодиноких бульбашок в перемішуємий об'єм апарату (рис. 3.2а,б). Цю частоту обертання самоусмоктуючої мішалки називають початковою n_0 [49-51]. Враховуючи значну різницю між щільністю газу і робочою рідиною при гідродинамічних розрахунках в середині порожнистої лопаті відцентровим тиском газу або повітря можна зневажити. Тоді початкове надходження газу з порожнини лопаті в перемішуємий об'єм рідини апарату відбувається за умови

$$\Delta P_{\text{Л}} \approx \Delta P_{\text{ГС}} + \Delta P_{\text{Г}}. \quad (3.4)$$

Перепад тиску (розрідження) в середині самоусмоктуючої мішалки при обертанні мішалки виникає в результаті швидкого руху потоку рідини або газорідинної суміші вздовж лобової поверхні порожнистої лопаті в радіальному напрямку. Згідно з енергетичного балансу такий перепад тиску на радіусі мішалки складає

$$\Delta P_{\text{л}} = 0,5 \rho_B (\varepsilon w_M - w_B)^2, \quad (3.5)$$

де: w_M - окружна швидкість руху лопаті мішалки, м/с;

w_B - окружна швидкість обертання води, м/с;

ε - коефіцієнт, що враховує середню швидкість.

Якщо виразити значення окружної швидкості лопаті мішалки та окружної швидкості обертання рідини в зоні мішалки через діаметр мішалки і частоти обертання мішалки і рідини

$$w_M = \pi n d_M, \quad (3.6)$$

$$w_B = \pi n_B d_M, \quad (3.7)$$

де n - частота обертання мішалки, с⁻¹;

n_B - частота обертання рідини в зоні мішалки, с⁻¹.

та позначити відношення цих частот обертання рідини і мішалки через коефіцієнт пропорційності $k = \frac{n_B}{n}$, тоді рівняння (3.5) набуває вигляду

$$\Delta P_{\text{л}} = 0,5 \pi^2 n^2 d_M^2 \rho_B (\varepsilon - k)^2 = 0,5 \pi^2 n^2 d_M^2 \rho_B \zeta_0 \quad (3.8)$$

Виражаючи в рівнянні (3.1) тиск через висоти стовпа рідини $\Delta P_B = \rho_B g h_B$, $\Delta P_{\text{ГС}} = \rho_B g h_{\text{ГС}}$ і $\Delta P_{\text{Г}} = \rho_B g h_{\text{Г}}$ та нехтуючи тиском, викликаним відцентровою силою на газ, з рівнянь (3.3) і (3.8) знаходимо залежність, що описує систему від початку обертання самоусмоктуючої мішалки до частоти обертання, при якій

починають виходити бульбашки газу з порожнини лопаті в перемішуємий об'єм апарату

$$0,5\pi^2 n^2 d_M^2 [(1 - \varphi_L) \xi_{II} + \xi_0] + gh_B = gh_{GC} + gh_{\Gamma}, \quad (3.9)$$

де: h_B - висота рідини у порожнині валу, м;

h_{GC} - висота рідини над віссю лопаті, м;

h_{Γ} - висота рідини, що відповідає гідравлічному опору валу і мішалки, м.

При певній частоті обертання, коли рідина з порожнини валу та ротору мішалки опускається до рівня осі порожнистої лопаті $h_B = 0$ (рис. 3.1б), цю частоту обертання мішалки позначаємо - n_{GC} і називаємо гідростатичною частотою обертання мішалки, а в цей час в порожнині лопаті ще знаходиться рідина, тобто $\varphi_L \approx 0$, тоді гідродинамічну рівновагу системи описує рівняння

$$0,5\pi^2 n_{GC}^2 d_M^2 (\xi_{II} + \xi_0) = 0,5\pi^2 n_{GC}^2 d_M^2 \xi_{GC} = gh_{GC} + gh_{\Gamma}, \quad (3.10)$$

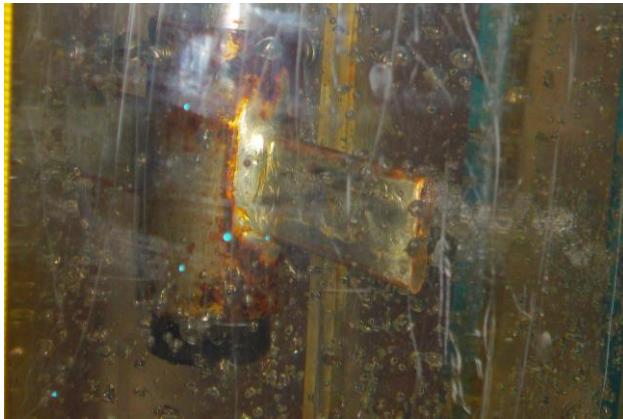
де $\xi_{GC} = (\xi_{II} + \xi_0)$ - гідростатичний коефіцієнт опору мішалки, який відповідає пониженьню рівня рідини в порожнистому валу до рівня порожнистої лопаті мішалки.

Подальше збільшення частоти обертання мішалки n до початкової частоти n_0 приводить до ситуації, коли газ з порожнини валу та ротору самоусмоктуючої мішалки потрапляє в порожнину лопаті та повністю заповнює її, тобто $\varphi_L \approx 1$ і $h_B = 0$ (рис. 3.1г). При цій частоті обертання самоусмоктуючої мішалки з порожнистої лопаті відбувається вихід газу у вигляді одиночних бульбашок в перемішуємий об'єм рідини апарату, при цьому рівняння (3.10) приймає вигляд

$$0,5\pi^2 n_0^2 d_M^2 \xi_0 = gh_{GC} + gh_{\Gamma}, \quad (3.11)$$

а початкова частота обертання мішалки n_0 , при якій починається витік газових бульбашок в перемішувемий об'єм апарату (рис. 3.2а) з порожнистої лопаті визначається

$$n_0 = \sqrt{\frac{2g(h_{TC} + h_F)}{\pi^2 d_M^2 \xi_0}} \quad (3.12)$$



а)



б)



в)



г)

Рисунок 3.2 – Фото початку диспергування бульбашок повітря за допомогою самоусмоктуючої ежекційної мішалки в перемішувемому рідину

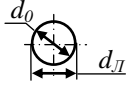
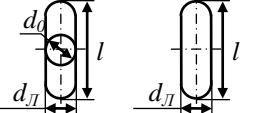
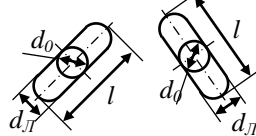
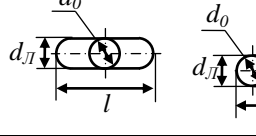
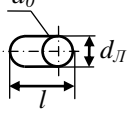
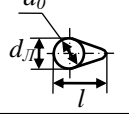
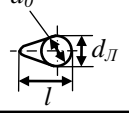
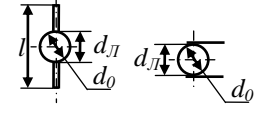
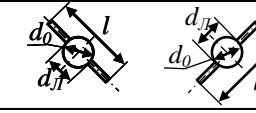
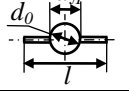
Експериментальні випробування проводилися на самоусмоктуючих ежекційних мішалках діаметром $d_M = 0,065, 0,10, 0,128, 0,168, 0,180$ м з числом порожнистих лопатей 2-8 з формою та розмірами поперечного перерізу порожнистих лопатей відповідно з таблицею 3.1. Залежність глибини занурення

самоусмоктуючої мішалки $h_{ГС}$ від комплексу $n^2 d_M^2$ та результати розрахунків рівнянь (3.10) і (3.11) приведені у вигляді графічних залежностей рис. 3.3. Значення коефіцієнтів $\xi_{ГС}$, ξ_0 , і $\xi_{Ц}$ для самоусмоктуючих ежекційних мішалок з різною формою лобового обтікання порожнистих лопатей зосереджені у другій частині таблиці 3.1. Точність визначення коефіцієнтів $\pm 0,05$. Представлені експериментальні дані на рисунку 3.3 для самоусмоктуючих мішалок з різною геометрією поперечного перерізу порожнистих лопатей свідчать про лінійний характер залежностей, прогнозований рівняннями (3.10) і (3.11), а коефіцієнти $\xi_{ГС}$ і ξ_0 не залежать від окружної швидкості самоусмоктуючої мішалки та зовнішнього діаметру порожнистої циліндричної лопаті (рис. 3.3а, тип 2-4, таблиця 3.1) або висоти плоскої порожнистої лопаті (тип 8, 14-18, таблиця 3.1) та конфігурації вхідної кромки в порожнисті лопаті.

Порівняння випробувань звичайних самоусмоктуючих ежекційних мішалок діаметром $d_M = 0,1$ м з циліндричними лопатями (тип 2-4, таблиця 3.1) і прямими вхідними кромками (рис. 2.3б₁) з мішалками, в яких вхідна кромка в порожнисту лопать зі сторони лобової поверхні лопаті у вигляді скосу під кутом 45^0 , 60^0 , або з округленою кромкою (рис. 2.3б_{2,3}) показали, що кут скосу або радіус округлення вхідної кромки не впливає на коефіцієнти $\xi_{ГС}$ і ξ_0 . Це пов'язано з тим, що процес усмоктування відбувається у автотельному режимі, при якому діє закон Ньютона та критерій Ейлера і на нього не впливають критерії Фруда і Рейнольдса.

При збільшенні діаметру самоусмоктуючої мішалки від $d_M = 0,065$ до $0,18$ м з циліндричними лопатями внутрішнім діаметром $0,006$ м (таблиця 3.1, тип 1, 2, 5-7) отримані результати (рис. 3.3б) свідчать про зменшення коефіцієнтів $\xi_{ГС}$, ξ_0 і особливо $\xi_{Ц}$. Зменшення коефіцієнту $\xi_{Ц}$ свідчить про зростання гідравлічного опору на шляху руху транзитного потоку у порожнині лопаті за рахунок збільшення її довжини, а зменшення коефіцієнту ξ_0 , може бути викликано зростанням співвідношення окружних швидкостей рідини і порожнистої лопаті мішалки, яке визначається коефіцієнтом k , при збільшенні діаметру мішалки.

Таблиця 3.1 - Характеристики мішалок

Напря́м руху \longrightarrow Тип лопаті	d , м	d_L , м	d_0 , м	l , м	$\zeta_{ГС}$	ζ_0	$\zeta_{Ц}$
1	0,068	0,008	0,006	-	1,72	0,92	0,80
2		0,008	0,006	-			
3 	0,100	0,016	0,014	-	1,59	0,84	0,75
4		0,045	0,043	-			
5	0,128	0,008	0,006	-	1,30	0,72	0,60
6	0,168	0,008	0,006	-	0,85	0,55	0,30
7	0,180	0,008	0,006	-	0,65	0,50	0,15
8 	0,100	0,008	0,006	0,045	1,70	0,9	0,80
	0,130	0,004	-	0,020	1,60	0,80	0,80
9 	0,100	0,008	0,006	0,045	1,3	0,5	0,80
10 	0,100	0,008	0,006	0,045	1,1	0,4	0,70
11 	0,100	0,008	0,006	0,045	1,60	0,85	0,75
12 	0,100	0,008	0,006	0,012	1,00	0,45	0,55
	0,128	0,008	0,006	0,012	0,91	0,36	0,55
13 	0,100	0,008	0,006	0,012	1,59	0,84	0,75
14	0,068	0,008	0,006	0,026	1,77	0,97	0,80
15	0,100	0,008	0,006	0,014	1,60	0,92	0,80
16 	0,100	0,008	0,006	0,053	1,60	0,92	0,80
17	0,128	0,008	0,006	0,014	1,72	0,90	0,80
18	0,128	0,008	0,006	0,053	1,72	0,90	0,80
19 	0,100	0,008	0,006	0,053	1,3	0,5	0,80
20 	0,100	0,008	0,006	0,053	1,35	0,65	0,70

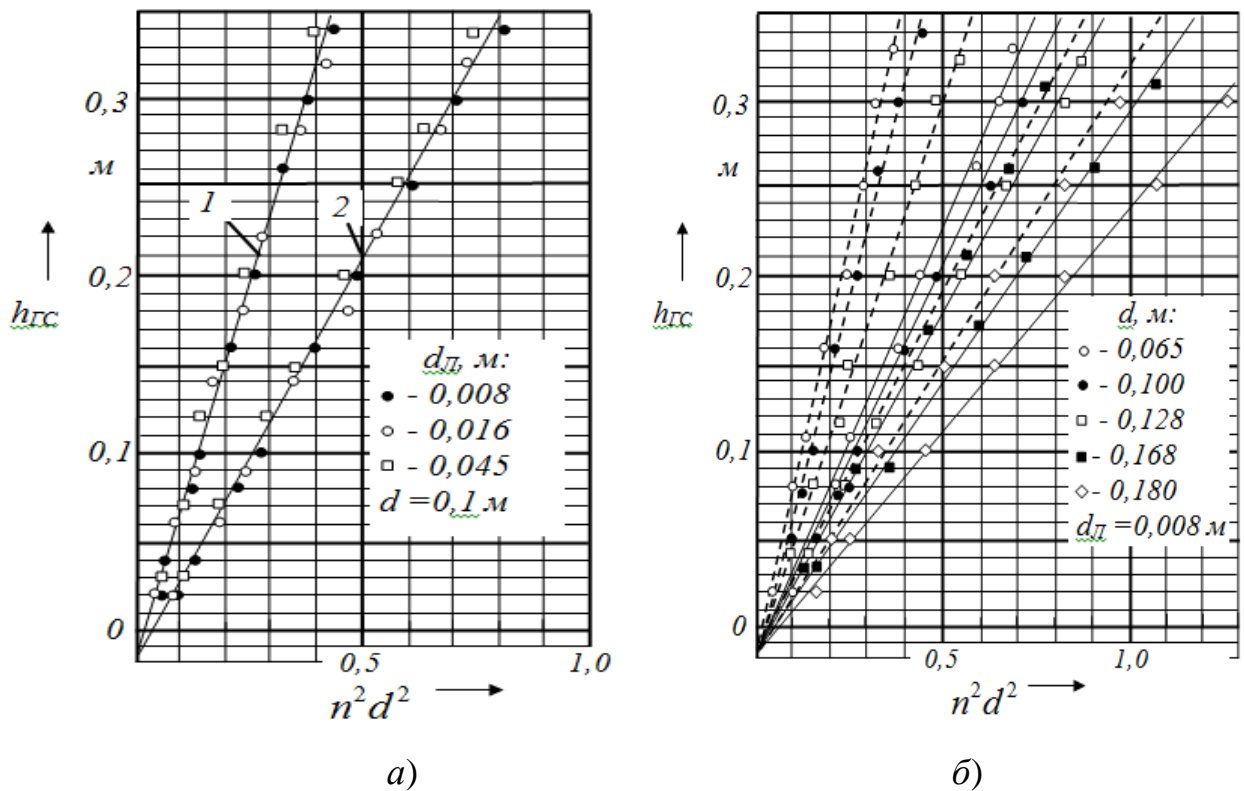


Рисунок 3.3. – Залежність рівня рідини в порожнистому валу і апараті від множника $n^2 d^2$ та графічні рішення рівнянь (3.10) і (3.11): Число лопатей $z = 2-8$; робоча рідина – вода; а) 1 - рівняння (3.10) $\varphi_L = 0$; 2 - рівняння (3.11) $\varphi_L \approx 1$; б) - - - рівняння (3.10) $\varphi_L = 0$; — - — - рівняння (3.11) $\varphi_L \approx 1$.

Експериментальні випробування самоусмоктуючих мішалок (таблиця 3.1, тип 10,11) показали, що коефіцієнти $\zeta_{ГС}$ і ζ_0 залежать від відстані між отвором порожнистої лопаті і її лобовою поверхнею, яка при обертанні мішалки утворює радіальний потік рідини. При збільшенні цієї відстані коефіцієнти $\zeta_{ГС}$ і ζ_0 зменшуються. Зменшення величини коефіцієнтів $\zeta_{ГС}$, ζ_0 і $\zeta_{Ц}$ спостерігається у самоусмоктуючих мішалок з порожнистими лопатями, що мають лобову поверхню у вигляді гострого кута (таблиця 3.1, тип 12).

Значення коефіцієнтів $\zeta_{ГС}$, ζ_0 збільшуються у самоусмоктуючих мішалок з циліндричними порожнистими лопатями з вертикальними ребрами або з горизонтальними пластинами на лобовій частині (таблиця 3.1, тип 14-18), це свідчить про зростання величини поперечного перетину радіального потоку біля відкритого торця отвору порожнистої лопаті у порівнянні з самоусмоктуючими

мішалками зі звичайними циліндричними лопатями (таблиця 3.1, тип 2-4). При цьому висота ребер практично не впливає на значення цих коефіцієнтів внаслідок того, що величина поперечного перетину радіального потоку біля торця отвору порожнистої циліндричної лопаті не змінюється при зростанні висоти ребер. В той же час зміна конфігурації вхідної кромки самоусмоктуючих мішалок (таблиця 3.1, тип 8) у вигляді скосу або округлення при вході в порожнину лопаті зі сторони лобової поверхні не впливає на зміну коефіцієнтів $\zeta_{ГС}$, ζ_0 і $\zeta_{Ц}$. Установка ежекційної перегородки та її співвідношення також не впливають на коефіцієнти $\zeta_{ГС}$, ζ_0 і $\zeta_{Ц}$.

Збільшення числа порожнистих лопатей мішалки від двох до восьми приводить до незначного збільшення коефіцієнтів $\zeta_{ГС}$, ζ_0 і $\zeta_{Ц}$, яке відповідно до отриманих даних, практично знаходиться у межах помилки їх визначення.

Таблиця 3.2 – Порівняння експериментальних і розрахункових (3.13) значень коефіцієнта ζ_0 для мішалок з циліндричними лопатями

Діаметр мішалки d_M , м	Робоча рідина μ , Па·с	ζ_0	
		експеримент	розрахунок
0,180	$1 \cdot 10^{-3}$	0,50	0,51
	$100 \cdot 10^{-3}$	0,32	0,33
0,168	$1 \cdot 10^{-3}$	0,55	0,55
	$100 \cdot 10^{-3}$	0,39	0,36
0,128	$1 \cdot 10^{-3}$	0,72	0,70
	$100 \cdot 10^{-3}$	0,42	0,44
0,100	$1 \cdot 10^{-3}$	0,84	0,82
	$100 \cdot 10^{-3}$	0,53	0,53
0,068	$1 \cdot 10^{-3}$	0,92	0,93
	$100 \cdot 10^{-3}$	0,60	0,60

Поступове підвищення в'язкості робочої рідини з $1 \cdot 10^{-3}$ до $100 \cdot 10^{-3}$ Па/с приводить до зменшення коефіцієнтів $\zeta_{ГС}$, ζ_0 і $\zeta_{Ц}$, про що свідчать приведені

графічні залежності впливу в'язкості робочої рідини на коефіцієнт ξ_0 для мішалки діаметром $d_M = 0,168$ мм з циліндричною порожнистою лопатю діаметром $d_O = 0,008$ м (рис. 3.4а). Аналогічні випробування самоусмоктуючих мішалок діаметром $d_M = 0,065, 0,10, 0,128, 0,168$ мм з використанням в якості робочої рідини води та водного розчину гліцерину в'язкістю $100 \cdot 10^{-3}$ Па/с підтверджують також зменшення коефіцієнтів $\xi_{ГС}, \xi_0$ і $\xi_{Ц}$ (рис. 3.4б).

Аналіз отриманих даних під час експериментальних випробувань самоусмоктуючих мішалок з циліндричними порожнистими лопатями типу 1-7 відповідно таблиці 3.1 показав достатню ефективність їх при диспергуванні газової фази в перемішуємій об'єм та дозволив отримати емпіричну формулу для розрахунку коефіцієнта ξ_0 при турбулентному режимі

$$\xi_0 = 1,2 - 3,75d_M - 10(0,35 - 5,56d_M^2)(\mu - 1 \cdot 10^{-3}) , \quad (3.13)$$

де μ – динамічна в'язкість робочої рідини, Па·с.

В той же час отримані дані лабораторних випробувань самоусмоктуючих ежекційних мішалок з іншою конфігурацією порожнистих лопатей показали, що найбільш ефективними є самоусмоктуючі мішалки з плоскими порожнистими лопатями (рис. 3.3) типу 8,9 (таблиця 3.1). Схема руху перемішуємої рідини або газорідинної суміші в апараті об'ємного типу з відбійними перегородками під час обертання самоусмоктуючих ежекційних мішалок з плоскими порожнистими лопатями представляє собою тривимірний нестационарний турбулентний потік з вихровою структурою [1,3]. Рідина, що знаходиться в зоні обертання мішалки, отримує від останньої кінетичну енергію, яка створює зовнішній відцентровий потік рідини, що має радіальну і тангенціальну складові. Тангенціальна складова потоку приводить до обтікання рідиною порожнистої лопаті та утворення за її тильною стороною вихрового турбулентного сліду. Радіальний потік, що утворюється біля лобової поверхні лопаті самоусмоктуючої мішалки досягає свого максимального значення на краю лопаті. При сході радіального потоку з лобової поверхні плоскої

порожнистої лопаті утворюється макровихровий турбулентний потік, який поєднується з вихровою системою турбулентного сліду, що утворюється за тильною стороною лопаті. Далі цей потік направляється до периферії апарату і біля внутрішньої стінки пригальмовує та розділяється на два потоки, які міняють напрям руху обабіч внутрішньої поверхні обичайки апарату вниз і вгору, утворюючи замкнуті циркуляційні петлі.

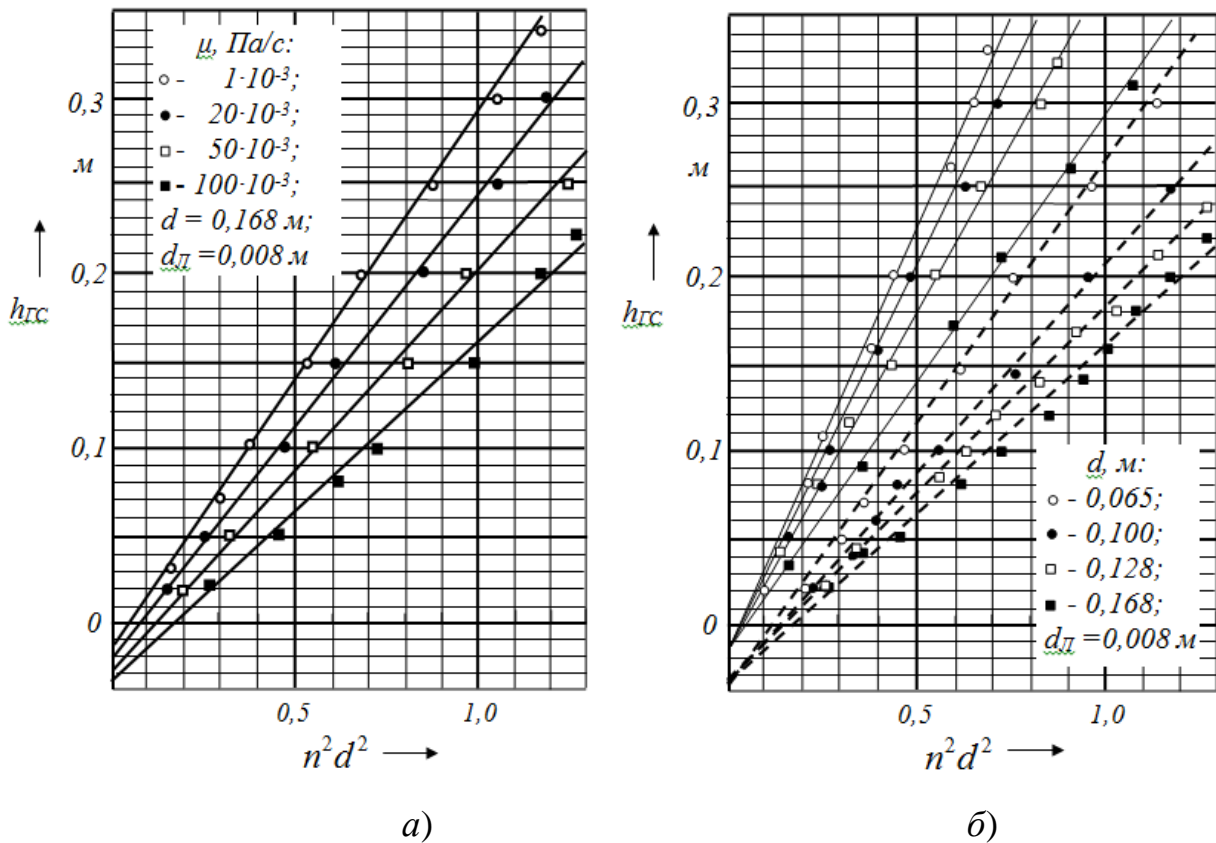


Рисунок 3.4. – Залежність рівня рідини в порожнистому валу і апараті від множника $n^2 d^2$ та графічні рішення рівняння (3.11) при $\varphi_{fl} \approx 1$ з використанням експериментальних даних: число лопатей $z = 2-8$; а) – в'язкість робочої рідини збільшується поступово з $1 \cdot 10^{-3}$ до $100 \cdot 10^{-3}$ Па/с; б) – робоча рідина: вода — $1 \cdot 10^{-3}$ Па/с; розчин гліцерину у воді - - - $100 \cdot 10^{-3}$ Па/с.

Таким чином в перемішуємому об'ємі рідини самоусмоктуючою мішалкою створюється відносно стабільна вимушена циркуляція рідини. Структура турбулентного сліду досить складна і представляє собою зосередження безлічі вихрів з центрами обертання, в яких створюється певна

різниця тиску по відношенню до рідини, що знаходиться перед лопатю на глибині розміщення мішалки в перемішуємому об'ємі [61]. Це явище і забезпечує ефективне диспергування газової фази самоусмоктуючими мішалками у вигляді бульбашок та їх перемішування в об'ємі апарату (рис. 3.2) і представляє найбільший практичний інтерес для промисловості. Суттєвий вплив на величину коефіцієнтів $\xi_{ГС}$, ξ_0 мають умови формування радіального потоку рідини уздовж лобової поверхні плоскої порожнистої лопаті. Максимальні значення коефіцієнтів $\xi_{ГС}$, ξ_0 відповідно експериментальних досліджень мають самоусмоктуючі мішалки з вертикально розташованими плоскими порожнистими лопатями (тип 8, таблиця 3.1). Зміна кута нахилу лобової поверхні порожнистої лопаті по відношенню до площини обертання мішалки зменшує значення коефіцієнтів $\xi_{ГС}$, ξ_0 (тип 9, таблиця 3.1). При зменшенні кута нахилу плоскої порожнистої лопаті по відношенню до площини обертання мішалки величина ξ_0 також зменшується і досягає мінімального значення при куті рівному 0^0 (тип 10, таблиця 3.1). При цьому коефіцієнт ξ_{II} практично не змінюється. Збільшення довжини вильоту порожнистої плоскої лопаті приводить до зменшення коефіцієнту ξ_0 . Для самоусмоктуючих ежекційних мішалок з порожнистими плоскими лопатями початкова частота обертання, окрім вищезазначених параметрів, залежить і від кута нахилу порожнистих лопатей.

Обробка експериментальних даних для самоусмоктуючих ежекційних мішалок з плоскими порожнистими лопатями дозволила отримати емпіричну формулу для розрахунку коефіцієнта ξ_0 при турбулентному режимі

$$\xi_0 = 1,3 \cdot \sin \alpha - 3,75d_M - 10(0,35 - 5,56d_M^2)(\mu - 1 \cdot 10^{-3}), \quad (3.14)$$

де: μ – динамічна в'язкість робочої рідини, Па·с;

$\sin \alpha$ - синус кута нахилу плоскої порожнистої лопаті.

Подальше порівняння експериментальних і розрахованих по рівняннях (3.13 і 3.14) значень коефіцієнта ξ_0 приведено у таблицях 3.2 і 3.3.

Величини коефіцієнта ξ_0 (3.14) мають досить незначні розбіжності між експериментальними і розрахунковими значеннями, вони можуть бути використані для розрахунку насосної продуктивності та потужності самоусмоктуючих ежекційних мішалок.

Випробування самоусмоктуючих мішалок з широким діапазоном геометричних параметрів та різною формою лобового обтікання порожнистих лопатей показали, що початкова частота обертання самоусмоктуючих мішалок n_0 залежить від діаметра, глибини занурення мішалки та форми обтікання лобової поверхні лопаті.

Таблиця 3.3 – Порівняння експериментальних і розрахункових (3.14) значень коефіцієнта ξ_0 для мішалок з плоскими порожнистими лопатями

Діаметр мішалки d_M , м	Кут нахилу лопаті мішалки α	Робоча рідина μ , Па·с	ξ_0	
			експеримент	розрахунок
0,100 (8,9)	$\alpha=90^0$	$1 \cdot 10^{-3}$	0,94	0,925
	$\alpha=60^0$		0,75	0,751
	$\alpha=45^0$		0,53	0,544
	$\alpha=90^0$	$100 \cdot 10^{-3}$	0,64	0,634
	$\alpha=60^0$		0,44	0,459
	$\alpha=45^0$		0,26	0,259
0,130 (8)	$\alpha=90^0$	$1 \cdot 10^{-3}$	0,83	0,813
	$\alpha=60^0$		0,65	0,638
	$\alpha=45^0$		0,44	0,432
	$\alpha=90^0$	$100 \cdot 10^{-3}$	0,54	0,559
	$\alpha=60^0$		0,36	0,385
	$\alpha=45^0$		0,19	0,178

Аналіз отриманих даних під час випробувань самоусмоктуючих ежекційних мішалок з плоскими порожнистими лопатями відповідно таблиці 3.1 (тип 8,9) показав достатню ефективність їх для диспергування газової фази в

перемішуємий об'єм апарату та дозволив отримати емпіричну залежність для розрахунку початкової частоти обертання, при якій починається усмоктування газового реагенту, в залежності від глибини занурення мішалки та її діаметру

$$n_0 = 7,425 + 30,5h_{ГС} - 61,3d_M, \quad (3.15)$$

де: d_M - діаметр мішалки, м;

$h_{ГС}$ - висота рідини над порожнистою лопатю самоусмоктуючої мішалки, м;

Рівняння (3.15) справедливе для самоусмоктуючих ежекційних мішалок діаметром $d_M = 0,06-0,13$ м з плоскими порожнистими лопатями.

3.3 Гідродинаміка руху усмоктуємого газу порожнистими лопатями самоусмоктуючих ежекційних мішалок

В період експерименту при сталій частоті обертання мішалки проводили 5-7 замірів витрати повітря та газівміст перемішуючого середовища. Експериментальні дані для різних конструкцій самоусмоктуючих ежекційних мішалок зводилися в таблиці та представлені у вигляді графічних залежностей (рис. 3.5, 3.6).

Аналіз отриманих даних свідчить про те, що збільшення частоти обертання самоусмоктуючої ежекційної мішалки понад n_0 приводить до підвищення кількості усмоктуємого повітря та збільшення газівмісту в перемішуємому об'ємі апарату. Продуктивність самоусмоктуючих мішалок залежить від діаметру мішалки d_M , глибини занурення та кількості лопатей. Збільшення глибини занурення та в'язкості перемішуючого середовища приводить до зниження продуктивності по газовій фазі.

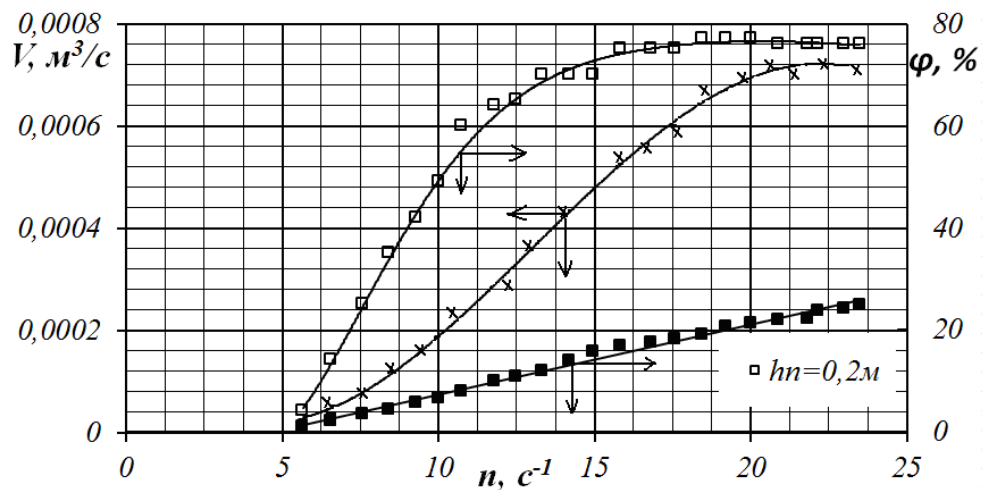


Рисунок 3.5 – Залежність продуктивності самоусмоктуючої мішалки $d_M=0,13$ м по газовій фазі, середнього та локального газовмісту від частоти обертання мішалки при заданій глибині занурення: х – витрата газового реагенту; □ – величина локального газовмісту; ■ – величина середнього газовмісту в апараті.

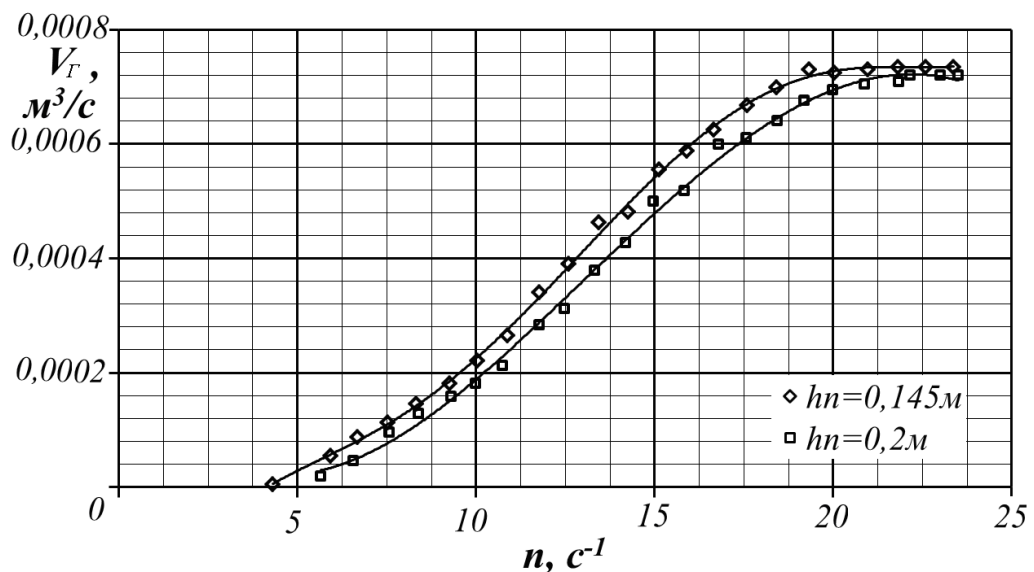


Рисунок 3.6 – Залежність продуктивності самоусмоктуючої мішалки $d_M=0,13$ м по газовій фазі від частоти обертання мішалки при різних глибинах занурення: \diamond - глибина занурення мішалки 0,145 м; \square – глибина занурення мішалки 0,2 м.

Всмоктуване повітря перш ніж потрапити в перемішувемий об'єм повинне подолати опір на шляху руху транзитного потоку в середині порожнистого валу

та порожнині самоусмоктуючої мішалки, баланс енергії руху повітря для даної ситуації описується рівнянням

$$\Delta P_B + \Delta P_{\zeta} + \Delta P_L - \Delta P_{ГC} - \Delta P_{Г} = \Delta P_P, \quad (3.16)$$

де: ΔP_B - тиск стовпа рідини в порожньому валу мішалки, Па;

ΔP_{ζ} - перепад тиску за рахунок відцентрової сили у порожнині лопаті, Па;

ΔP_L - перепад тиску за рахунок кінетичної енергії радіального турбулізованого потоку, Па;

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

$\Delta P_{Г}$ - гідравлічний опір елементів конструкцій мішалки, Па;

ΔP_P - робочий тиск, що відповідає самоусмоктуванню порожнистої лопаті, Па.

Виток повітря з порожнистої лопаті самоусмоктуючої мішалки в перемішувемий об'єм рідини апарату починається при деякій частоті обертання мішалки n , яка перевищує початкову частоту обертання n_0 . У цьому випадку порожнини валу і лопаті заповнені повітрям (рис. 3.1г), тобто $\Delta P_B = 0$, тоді рівняння (3.16) енергетичного балансу приймає вигляд

$$\Delta P_{\zeta} + \Delta P_L - \Delta P_{ГC} - \Delta P_{Г} = \Delta P_P. \quad (3.17)$$

Перепад тиску в порожнині лопаті самоусмоктуючої мішалки за рахунок відцентрової сили складає [1,3]

$$\Delta P_{\zeta} = 0,5\pi^2 d_M^2 n^2 \zeta_{\zeta} \rho_{Г}, \quad (3.18)$$

в той же час перепад тиску за рахунок кінетичної енергії радіального турбулізованого потоку

$$\Delta P_L = 0,5\pi^2 n^2 d_M^2 \rho_{\zeta_0}, \quad (3.19)$$

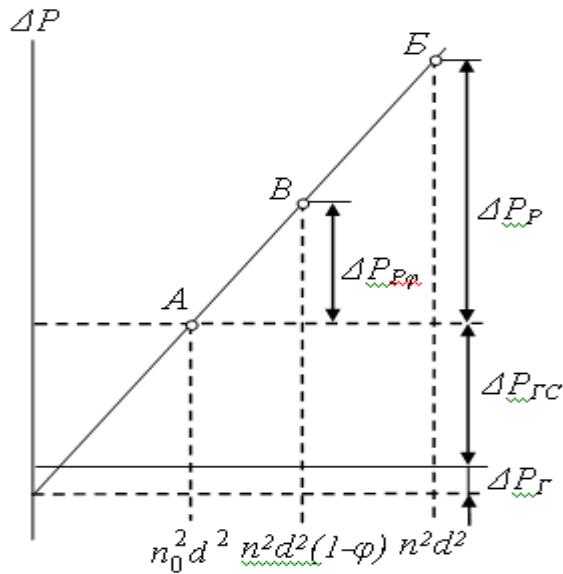


Рисунок 3.7 – Зміни перепаду тиску на виході з порожнистої лопаті мішалки

а гідростатичний тиск дорівнює

$$\Delta P_{GC} = 0,5\pi^2 n_0^2 d_M^2 \rho \xi_0, \quad (3.20)$$

де: d_M - діаметр мішалки, м;

n - частота обертання мішалки, s^{-1} ;

ρ_G - щільність газу, kg/m^3 ;

$\xi_{ц}$ - коефіцієнт, що враховує гідравлічний опір у порожнині лопаті;

ρ - щільність рідини, kg/m^3 ;

n_0 - частота обертання мішалки, при якій починається виток газу з лопаті, s^{-1} .

З урахуванням рівнянь (3.17 - 3.20) виходить, що початкова продуктивність самоусмоктуючих відцентрово-ежекційних мішалок відповідає рівнянню

$$\Delta P_p = 0,5\pi^2 d_M^2 [n^2(\rho \xi_0 + \rho_G \xi_{ц}) - n_0^2 \rho \xi_0]. \quad (3.21)$$

Цей енергетичний стан системи (3.21) відповідає умовам, коли частота обертання самоусмоктуючої мішалки досягає початкової ($n = n_0$), на рисунку 3.7 вона позначається літерою *A*, а при умовах, коли частота обертання мішалки перевищує початкову ($n > n_0$) - літерою *B*.

При збільшенні частоти обертання самоусмоктуючої мішалки витрати газу і питомий газовміст турбулізованого радіального потоку в середині порожнистої лопаті поступово зростають, що приводить до зменшення питомої щільності та кінетичної енергії радіального потоку, це визначає перепад тиску $\Delta P_{\text{л}}$ газорідинної суміші в середині порожнистої лопаті

$$\Delta P_{\text{л}} = 0,5\pi^2 n^2 d_M^2 [\rho(1-\varphi) + \rho_{\text{г}}\varphi]\xi_0, \quad (3.22)$$

де φ - питомий газовміст радіального турбулізованого потоку, м³ газу/м³.

Тоді робочий перепад тиску, що визначає швидкість руху газу у порожнині лопаті складає

$$\Delta P_p = 0,5\pi^2 d_M^2 \{ \{ n^2[\rho(1-\varphi) + \rho_{\text{г}}\varphi]\xi_0 + n^2 \rho_{\text{г}}\xi_{\text{л}} \} - n_0^2 \rho \xi_0 \}. \quad (3.23)$$

Враховуючи велику різницю між щільністю рідини і газу, рівняння (3.23) може бути спрощене, тоді робочий перепад тиску практично складає

$$\Delta P_p = 0,5\pi^2 d_M^2 \rho [n^2(1-\varphi) - n_0^2] \xi_0. \quad (3.24)$$

Такий енергетичний стан системи на рисунку 3.7 позначено літерою *B*.

Тоді швидкість транзитного потоку, що рухається в порожнистій лопаті під впливом перепаду тиску, можна вирахувати скориставшись відомим рівнянням [59]

$$w = \sqrt{\frac{2\Delta P_p}{\rho_{\text{л}}}}, \quad (3.25)$$

де ρ_{Π} – щільність транзитного потоку, що рухається в середині порожнистої лопаті за рахунок перепаду тиску, кг/м³.

Після виходу з порожнини лопаті бульбашки повітря рухаючись до турбулізованого радіального потоку, проходять через шар газорідинної суміші, яка в стаціонарному режимі обертання самоусмоктуючої мішалки має певний постійний питомий газовміст φ_K (рис. 3.8). В перемішуемому об'ємі апарату цей шар має форму кільця з внутрішнім діаметром, який дорівнює діаметру мішалки (рис. 3.8).

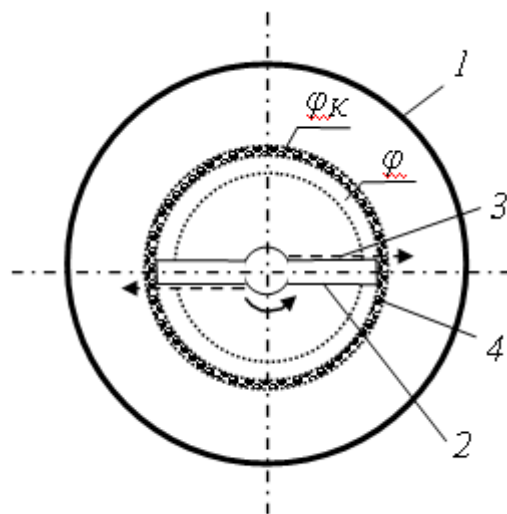


Рисунок 3.8 – Схема розподілу питомого газовмісту біля торця отвору лопаті мішалки: 1 - корпус апарату; 2 – самоусмоктуюча мішалка; 3 - турбулізований радіальний потік; 4 - кільце газорідинної суміші на радіусі мішалки

В сталому режимі обертання самоусмоктуючої мішалки газ, що витікає з порожнистої лопаті, витискає із кільцевого шару частину газорідинної суміші, змішується з нею і потім входить у турбулізований відцентровий потік, газовміст якого φ визначається середнім газовмістом газорідинної суміші в апараті. При обертанні мішалки складається потік, що має тангенціальну і радіальну складові. Біля стінки апарату радіальний потік гальмується і міняє напрям руху на осьовий та розділяється на два потоки: один піднімається вгору,

другий опускається вниз. Далі потоки в нижній та верхній частині перемішуємого об'єму змінюють напрям руху до середини апарату, що примикає до вертикальної осі, біля якої потоки рідини знову змінюють напрям руху і рухаються до лопатей самоусмоктуючої мішалки зверху і знизу, утворюючи два замкнутих циркуляційних потоки, з концентричними центрами обертання в нижній та верхній частинах апарату [1,3]. Таким чином внаслідок обертання мішалки відбувається інтенсивна турбулізація та осереднення газомісту перемішуємого середовища.

Швидкість газу w_{Γ} , м/с з урахуванням (3.24) і (3.25) можна представити

$$w_{\Gamma} = \pi d_M \sqrt{\frac{[n^2(1-\varphi) - n_0^2] \rho \xi_0}{\rho(1-\varphi_K)}}, \quad (3.26)$$

або

$$w_{\Gamma} = \pi d_M \sqrt{\frac{1-\varphi}{1-\varphi_K}} \sqrt{\left(n^2 - \frac{n_0^2}{1-\varphi}\right) \xi_0} = K_{\varphi} \pi d_M \sqrt{\left(n^2 - \frac{n_0^2}{1-\varphi}\right) \xi_0}, \quad (3.27)$$

де: φ_K - питомий газоміст газорідинної суміші в кільці на радіусі мішалки, м³ газу / м³ газорідинної суміші;

φ – середній питомий газоміст турбулізованого потоку на радіусі мішалки, м³ газу / м³ газорідинної суміші.

В рівнянні (3.27) величину $\sqrt{\frac{1-\varphi}{1-\varphi_K}}$ можна визначити, як коефіцієнт K_{φ} , що

враховує середнє співвідношення газомісту в радіальному потоку і в кільці газорідинної суміші на радіусі мішалки. За одержаними експериментальними даними співвідношення питомого газомісту турбулізованого радіального потоку φ і газорідинної суміші в кільці на радіусі мішалки φ_K практично постійне. При різних режимах обертання самоусмоктуючої мішалки це співвідношення дорівнює приблизно 0,5, а максимальне значення питомого газомісту газорідинної суміші в кільці на радіусі самоусмоктуючої мішалки φ_K

не перевищує $0,7 \text{ м}^3/\text{м}^3$, тому значення коефіцієнту $K\varphi$ в рівнянні (3.27) може змінюватись у межах $1,0\text{--}1,47$. При цьому питомий газівміст турбулізованого радіального потоку при контакті з газом, що виходить з отвору порожнистої лопаті самоусмоктуючої мішалки, при вході у газорідинну суміш зростає і становиться рівним питомому газівмісту цієї суміші. Тому максимальне значення коефіцієнту $K\varphi$ практично ще менше вказаного вище значення.

Тоді насосна продуктивність [1,3] по газовій фазі самоусмоктуючої мішалки V_{Γ} , $\text{м}^3/\text{с}$, складає

$$V_{\Gamma} = \gamma K_{\varphi} z S_o \pi d_M \sqrt{\left(n^2 - \frac{n_0^2}{1-\varphi}\right) \xi_0} = \lambda_1 z S_o \pi d_M \sqrt{\left(n^2 - \frac{n_0^2}{1-\varphi}\right) \xi_0} , \quad (3.28)$$

де S_o - площа отвору порожнистої лопаті мішалки, м^2 ;

γ – коефіцієнт гідравлічних витрат в середині порожнистої мішалки;

λ_1 - узагальнений коефіцієнт витрати; z - число лопатей мішалки.

Враховуючи те, що при невеликій витраті газу питомий газівміст турбулізованого радіального потоку незначний, а при підвищеній витраті газу значення частоти обертання самоусмоктуючої мішалки n^2 значно більше значення $n_0^2/(1-\varphi)$, тому при лабораторних випробуваннях мішалок та попередньому аналізі експериментальних даних використовувалися спрощені наступні рівняння

$$w_{\Gamma} \approx K_{\varphi} \pi d_M \sqrt{\left(n^2 - n_0^2\right) \xi_0} , \quad (3.29)$$

$$V_{\Gamma} \approx \lambda_1 z S_o \pi d_M \sqrt{\left(n^2 - n_0^2\right) \xi_0} . \quad (3.30)$$

На рисунку 3.9 показано приклад залежності середньої швидкості руху газу через поперечний перетин порожнистих циліндричних лопатей діаметром d_o ,

при однаковій глибині занурення $h_{ГС}$ самоусмоктуючої мішалки, розрахованої з використанням експериментальних даних від комплексу $\pi d_M \sqrt{(n^2 - n_0^2) \xi_0}$.

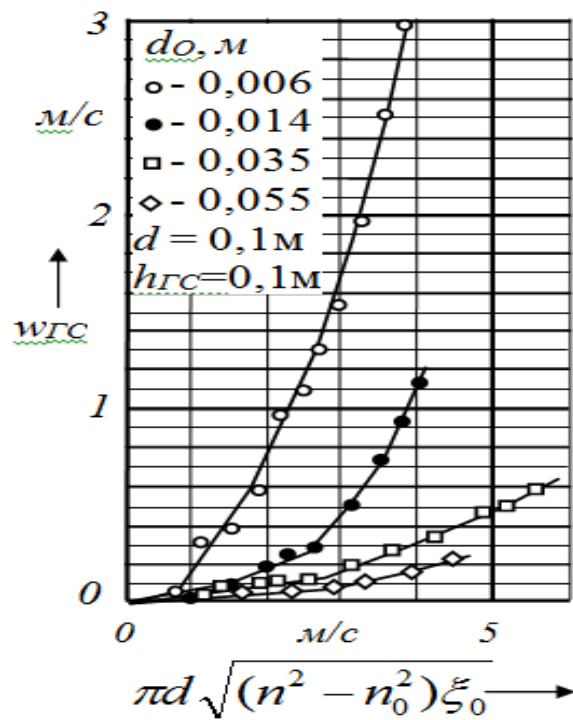
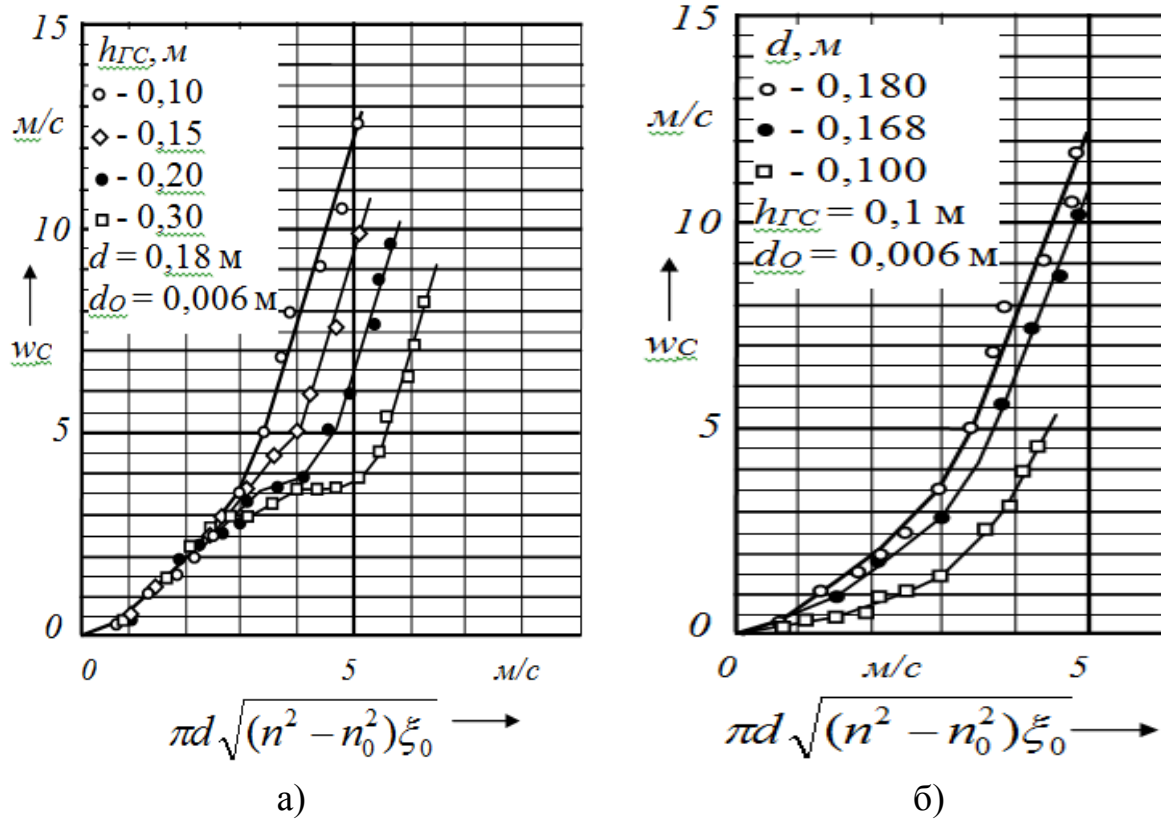
$$w_C = \frac{V_{ГЕ}}{zS_O} = \frac{4V_{ГЕ}}{z\pi d_O}, \quad (3.31)$$

Де: $V_{ГЕ}$ – експериментально визначена витрата газу, м³/с;

d_O – діаметр отвору лопаті мішалки, м.

На рисунку 3.10 представлена залежність експериментальної насосної продуктивності по газовій фазі самоусмоктуючих мішалок від комплексу $z\pi d_M \sqrt{(n^2 - n_0^2) \xi_0}$.

Згідно з отриманих в ході експериментальних випробувань даних, на базі яких побудовані графічні залежності середньої швидкості руху усмоктуємого газу самоусмоктуючою мішалкою, видно певну особливість гідродинамічного процесу. Для самоусмоктуючої мішалки відносно великого діаметру ($d_M = 0,18$ м) спостерігається три періоди гідродинамічного процесу. У першому періоді, коли глибина занурення мішалки не впливає на залежність швидкості газу в порожнині циліндричної лопаті мішалки (рис. 3.9а) і насосну продуктивність самоусмоктуючої мішалки (рис. 3.10а) від швидкості турбулізованого радіального потоку, графічні залежності по швидкості і продуктивності мають практично лінійний характер. У другому періоді при зміні (збільшенні) гідростатичного тиску характер графічних залежностей суттєво змінюється. При третьому періоді знову спостерігається характер графічних залежностей, близький до лінійного, при чому прискорення швидкості газу в середині порожнини лопаті не залежить від глибини занурення мішалки, швидкість газу становиться значно більшою швидкості турбулізованого потоку.



в)

Рисунок 3.9 – Залежність середньої швидкості руху газу у отворах циліндричних лопатей мішалок від швидкості турбулізованого потоку при різних діаметрах отворів порожнистих лопатей

Збільшення в'язкості робочої рідини від $1 \cdot 10^{-3}$ до $5 \cdot 10^{-3}$ Па·с під час проведення випробувань практично не впливає на результати з швидкості по газовій фазі.

Враховуючи, що кожному з зазначених гідродинамічних періодів відповідає певне поєднання питомого газовмісту газорідинної суміші на радіусі мішалки, який залежить від глибини її занурення і швидкості усмоктуемого газу. Ці зміни характеру залежностей можна пояснити існуванням двох режимів процесу витікання газової фази. Перший режим відрізняється тим, що газ, виходячи з отвору порожнистої лопаті мішалки, витісняє газорідинну суміш. В цьому режимі швидкість усмоктуемого газу залежить від щільності газорідинної суміші на радіусі мішалки і може визначатися рівнянням (3.26).

Другий режим відрізняється утворенням в порожнистих лопатях газових каналів, через які частина газу виходить до турбулізованого потоку у вигляді газових струменів. Такий режим можна назвати струменевим. Швидкість струменів газу в даному разі залежить від щільності газу і визначається наступним рівнянням

$$w_{r1} = \pi d_M \sqrt{\frac{[n^2(1-\varphi) - n_0^2] \rho \xi_0}{\rho_r}}. \quad (3.32)$$

Враховуючи це насосна продуктивність самоусмоктуючої ежекційної мішалки при струменевому режимі складає

$$V_r = [\lambda_1(1 - K_s) + \lambda_2 K_s \sqrt{\frac{\rho}{\rho_r}}] S_{oz} \pi d_M \sqrt{\left(n^2 - \frac{n_0^2}{1-\varphi}\right) \xi_0}, \quad (3.33)$$

де K_s - доля площі перетину газового потоку, де газ рухається у струменевому режимі, m^2 ;

λ_2 - коефіцієнт витрати струменевого потоку газу.

З урахуванням прийнятих припущень рівняння (3.33) приймає вигляд

$$V_{\Gamma} \approx [\lambda_1(1 - K_S) + \lambda_2 K_S] \sqrt{\frac{\rho}{\rho_{\Gamma}}} JS_{Oz} \pi d_M \sqrt{(n^2 - n_0^2) \xi_0} = \lambda S_{Oz} \pi d_M \sqrt{(n^2 - n_0^2) \xi_0}, \quad (3.34)$$

де λ – загальний коефіцієнт витрати газу.

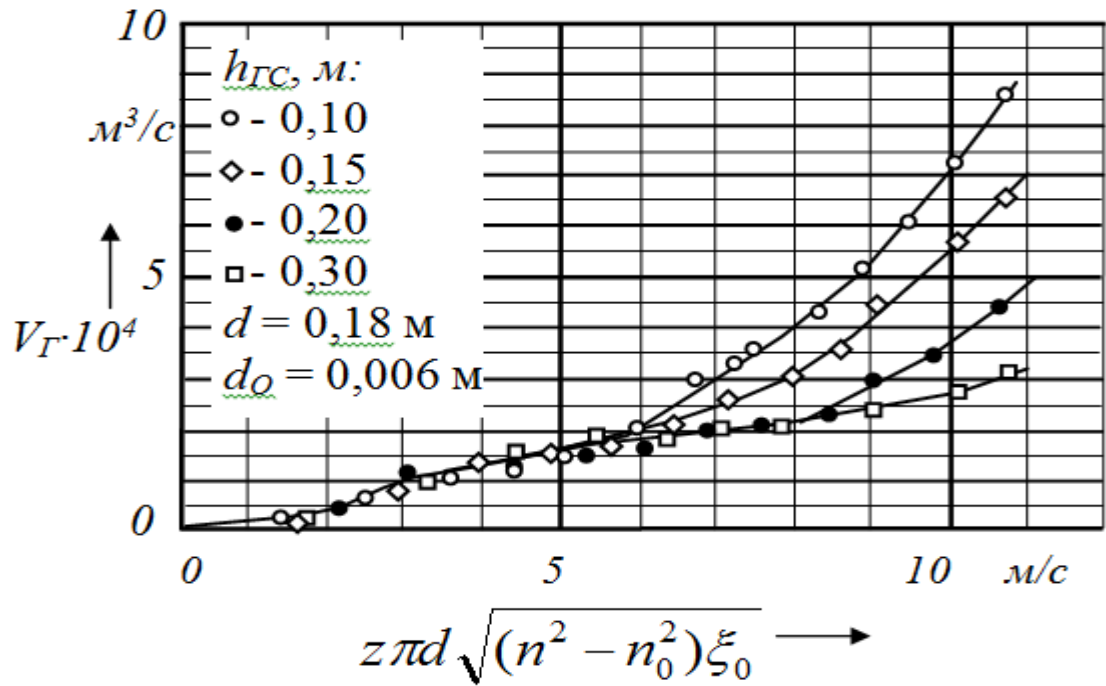
Припускаючи, що доля площі перетину газового потоку, де газ рухається у струменевому режимі, пропорційна питомому газовмісту газорідинної суміші $K_S = k\varphi_K$, одержуємо наступне рівняння

$$V_{\Gamma} \approx [\lambda_1(1 - k\varphi_K) + \lambda_2 k\varphi_K] \sqrt{\frac{\rho}{\rho_{\Gamma}}} JS_{Oz} \pi d_M \sqrt{(n^2 - n_0^2) \xi_0} = \lambda S_{Oz} \pi d_M \sqrt{(n^2 - n_0^2) \xi_0}. \quad (3.35)$$

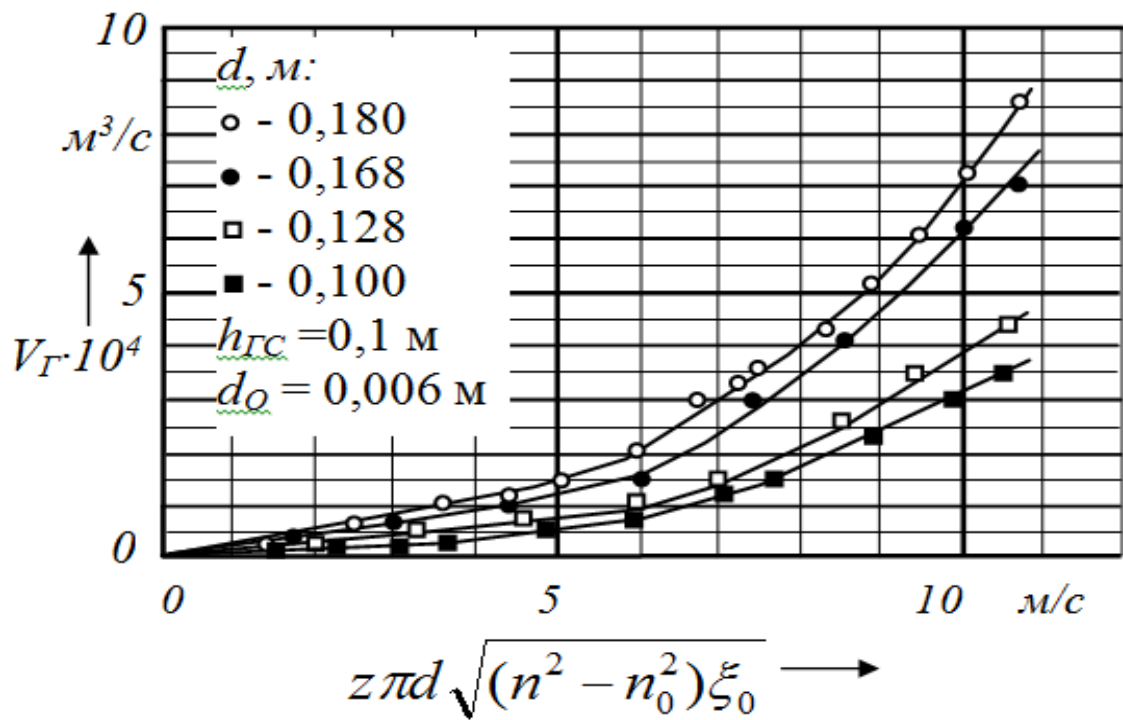
При збільшенні діаметру отвору циліндричної лопаті d_o з 0,006 до 0,055 м спостерігається суттєве падіння швидкості газу (рис. 3.10), що розрахована по рівнянню (3.20), а насосна продуктивність збільшується (рис. 3.10в), при цьому зміна режимів руху газу в середині циліндричної лопаті все ж таки відбувається, як і у мішалок з діаметром отвору лопаті $d_o = 0,006$ м. Збільшення насосної продуктивності мішалки безумовно пов'язане із зростанням площі турбулізованого потоку за рахунок збільшення висоти лопаті. Зміна ж режимів руху газу свідчить, що фактична швидкість руху газу значно більша, ніж розрахована, що може бути тільки у випадку, коли площа перетину потоку газу значно менша площі циліндричного отвору лопаті мішалки. Крім того, судячи по характеру залежностей (рис. 3.8, 3.9 і 3.10), у початковий період процесу площа перетину потоку газу поступово зростає. Тому у рівнянні насосної продуктивності мішалки слід використовувати не внутрішню площу циліндричної лопаті, а площу перетину газового потоку. Враховуючи, що швидкість газу по рівнянню (3.30) є пропорційною величиною середньозваженої швидкості турбулізованого потоку, а також є середньозваженою швидкістю газового потоку по фактичній площі перетину, тоді у рівнянні насосної продуктивності слід використовувати відповідну еквівалентну площу

$$V_{\Gamma} \approx \lambda S_E z \pi d_M \sqrt{(n^2 - n_0^2) \xi_0} \quad , \quad (3.36)$$

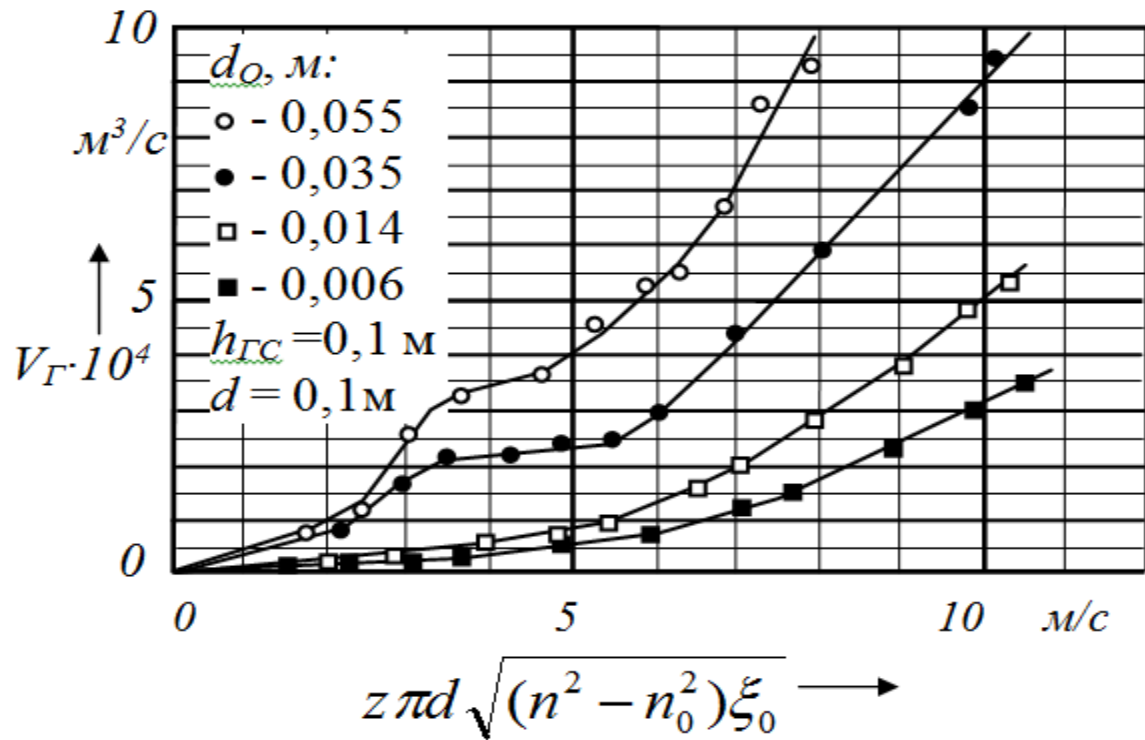
де S_E - еквівалентна площа перетину газового потоку, м^2 .



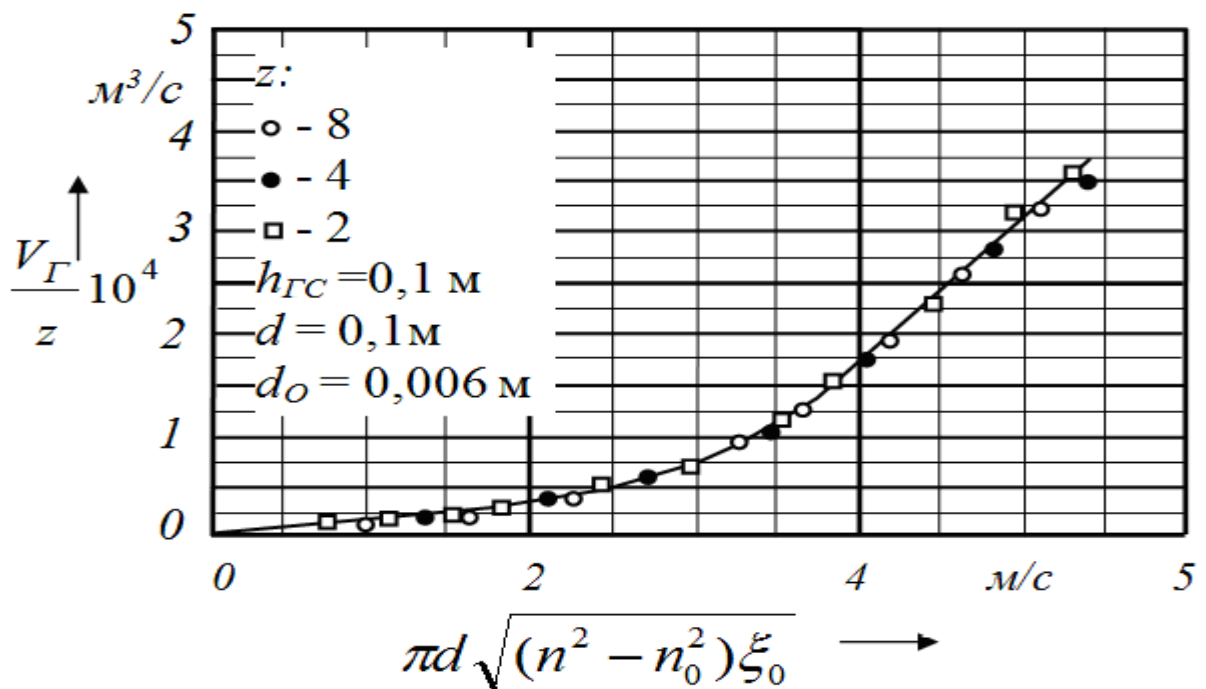
a)



б)



в)



з)

Рисунок 3.10 – Залежність насосної продуктивності по газу самоусмоктуючих мішалок від швидкості турбулізованого потоку: а, б і в - для самоусмоктуючих мішалок з числом лопатей $z = 2$; в'язкість середовища $1 \cdot 10^{-3}$ - $5 \cdot 10^{-3}$ Па·с; з – для самоусмоктуючих мішалок з числом лопатей $z = 2-8$;

Порівняння насосної продуктивності самоусмоктуючої мішалки з числом лопатей $z = 2$ і мішалок з числом лопатей $z = 4$ і $z = 8$ (рис. 3.10 ϵ) показує, що в однакових умовах випробовувань насосна продуктивність мішалок, а значить і інші розглянуті показники розрахунку на одну лопать, практично однакові і визначаються за формулою:

$$V_{\Gamma} \approx \lambda S_0 \sqrt{\frac{2\Delta P_P}{\rho_{\Pi}}} \approx \lambda S_0 z \pi d_M \sqrt{(n^2 - n_0^2)_{\xi_0}} . \quad (3.37)$$

Об'єктивність двох означених особливостей руху газу в порожнині лопаті мішалки підтверджує характер залежності комплексу λS_E від питомого газовмісту газорідинної суміші на радіусі мішалки, визначеного експериментально (рис. 3.11). Значення комплексу λS_E були розраховані з використанням експериментальних даних щодо насосної продуктивності мішалки по рівнянню

$$\lambda S_E \approx \frac{V_{\Gamma}}{z \pi d_M \sqrt{(n^2 - n_0^2)_{\xi_0}}} . \quad (3.38)$$

Для самоусмоктуючих мішалок діаметром $d_M = 0,065$ і $d_M = 0,100$ м з циліндричним отвором порожнистої лопаті діаметром $d_O = 0,006$ м перехід у струменевий режим руху відбувається при еквівалентній площі перетину газового потоку, що менше площі отвору. У мішалок діаметром $d_M = 0,168$ і $d_M = 0,180$ м з таким же діаметром отвору циліндричної лопаті перехід відбувається після того, як еквівалентна площа перетину газового потоку практично порівнюється з площею отвору лопаті ($S_0 = 2,825 \cdot 10^{-5} \text{ м}^2$). При цьому перед зміною режимів руху спостерігаються коливання значень комплексу λS_E навколо величини $\lambda S_E \approx 2,7 \cdot 10^{-5} \text{ м}^2$ в певному діапазоні питомого газовмісту газорідинної суміші (рис. 3.11 a). Причиною цих коливань може бути уповільнене зростання еквівалентної площі газового потоку в наслідок зростання відстані її частин, що

додаються від турбулізованого потоку і відповідного збільшення гідравлічного опору на шляху руху газу від цих частин до потоку.

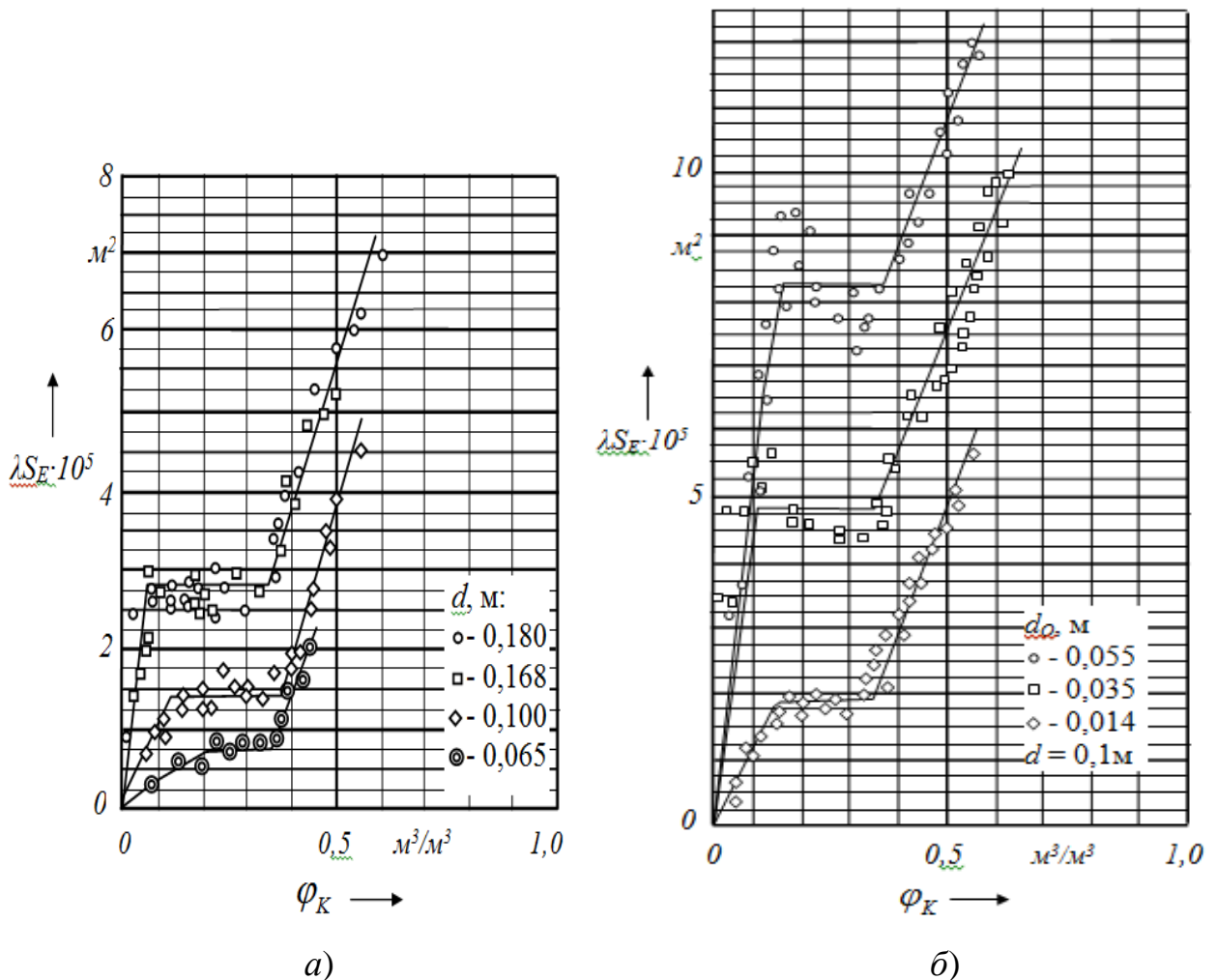


Рисунок 3.11 – Залежність комплексу λS_E від питомого газовмісту в кільці газорідинної суміші на радіусі мішалки: Число лопатей мішалки $z = 2$; $h_{ГС} = 0,04 - 0,35$ м; $n = 2 - 22$ 1/с; в'язкість робочої рідини $1 \cdot 10^{-3} - 5 \cdot 10^{-3}$ Па·с.

У самоусмоктуючих мішалок діаметром $d_M = 0,100$ м з отворами циліндричної лопаті діаметром $d_0 = 0,014-0,055$ м перехід у струменевий режим руху газового потоку відбувається при еквівалентній площі перетину газового потоку меншій від площі отвору. Для мішалок діаметром $d_M = 0,100$ м з отворами циліндричної лопаті діаметром $d_0 = 0,035$ і $d_0 = 0,055$ м еквівалентна площа перетину газового потоку залишається меншою площі отвору лопаті і при струменевому режимі руху потоку газу (рис. 3.11б). У розглядаємих умовах

еквівалентна площа газового потоку зростає до певної межі, коли відстань від неї до турбулізованого потоку, газ вже не може подолати внаслідок гідравлічного опору, що показано на рисунку 3.12. Перед зміною режимів руху газового потоку для цих мішалок також спостерігаються сильні коливання значень комплексу λS_E . Крім розглянутого вище, причиною цих коливань є також значна різниця гідростатичного тиску між верхньою і нижньою точками порожнистої циліндричної лопаті.

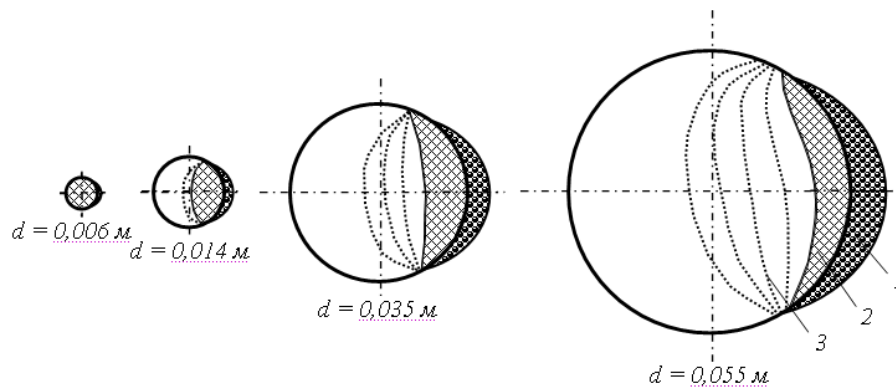


Рисунок 3.12 – Схема формування газового потоку у отворах циліндричних лопатей з отворами різного діаметру: 1 - перетин турбулізованого радіального потоку; 2 - перетин газового потоку, 3 - криві рівного перепаду тиску

Газові канали в середині лопаті утворюються при певному поєднанні швидкості газу і питомого газовмісту газорідинної суміші на радіусі мішалки. З розглянутого виходить, що важливими факторами, від яких залежить режим руху газового потоку з порожнистого циліндричного отвору лопаті мішалки є питомий газовміст газорідинної суміші на радіусі мішалки і швидкість турбулізованого радіального потоку.

Для самоусмоктуючих мішалок діаметром $d_M = 0,168$ і $d_M = 0,180$ м з отвором циліндричної лопаті діаметром $d_O = 0,006$ м відповідно з отриманими, в ході експериментальних випробувань, результатами можна прийняти $\lambda_1 = \lambda_2 = 1$. Тоді рівняння (3.34) для цих мішалок приймає вигляд

$$\lambda S_E = (1 - k\varphi_K + k\varphi_K \sqrt{\frac{\rho}{\rho_G}}) S_E = (1 + 26,84k\varphi_K) S_E, \quad (3.39)$$

де $k\varphi_K S_E$ - еквівалентна площа перетину струменя газу у отворі циліндричної лопаті мішалки, м².

і відповідно з графічним зображенням на рисунку 3.11а

$$\lambda S_E = S_E + 18 \cdot 10^{-5} (\varphi_K - 0,35). \quad (3.40)$$

Із спільного рішення рівнянь (3.39) і (3.40) виходить

$$k = 0,67 \cdot 10^{-5} \frac{\varphi_K - 0,35}{S_E \varphi_K}. \quad (3.41)$$

Як видно, коефіцієнт k зростає при підвищенні питомого газовмісту газорідинної суміші, а еквівалентна площа перетину струменя газу у отворі циліндричної лопаті мішалки $k\varphi_K S_E$ залежить тільки від питомого газовмісту газорідинної суміші на радіусі мішалки і при постійному газовмісту φ_K остається однаковою для транзитних газових потоків з різною площею перетину.

Рівняння (3.37) і (3.40) можна використовувати для розрахунку насосної продуктивності самоусмоктуючих мішалок з циліндричними порожнистими лопатями, але для цього необхідно спочатку визначити питомий газовміст газорідинної суміші на радіусі мішалки.

Продуктивність по газовій фазі самоусмоктуючої мішалки відбувається за умови, коли різниця тиску в середині порожнистої лопаті дорівнює або перевищує гідростатичний тиск стовпа рідини біля торця лопаті та гідравлічний опір на шляху руху потоку газу. При цьому теоретично повна компенсація кінетичної енергії радіального потоку газу, що виходить з порожнистої лопаті самоусмоктуючої мішалки, відбувається за умови

$$\Delta P_{\text{Л}} = 0,5\pi^2 n^2 d_M^2 \rho (1 - \varphi_A) \xi_0 = \rho g (h_{\text{ГС}} + \Delta h) , \quad (3.42)$$

де $\Delta h_{\text{Л}}$ - гідравлічний опір, м (для води $\Delta h = 0,015$ м).

Цій умові відповідає максимально можливий потенційний питомий газовміст радіального потоку при вході у кільце газорідинної суміші на радіусі мішалки

$$\varphi_A = 1 - \frac{2g(h_{\text{ГС}} + \Delta h)}{\pi^2 d_M^2 n^2 \xi_0} . \quad (3.43)$$

Відтворюючи рівняння (3.11) у вигляді

$$\frac{2g(h_{\text{ГС}} + \Delta h)}{\pi^2 d_M^2 \xi_0} = n_0^2 , \quad (3.44)$$

рівняння (3.43) приймає вигляд

$$\varphi_A = 1 - \frac{n_0^2}{n^2} = \frac{n^2 - n_0^2}{n^2} , \quad (3.45)$$

тобто газовміст φ_A виражає співвідношення робочого і повного перепаду тиску та є своєрідним критерієм подібності, що однозначно визначає таке поєднання швидкості газу і питомого газовмісту газорідинної суміші на радіусі мішалки, при якому відбувається перехід процесу у режим струменевого руху газу на виході з отвору порожнистої лопаті мішалки. Залежності комплексу λS_E з рівняння (3.37) від $\varphi_{\text{П}}$ показані на рисунках 3.13 – 3.16. Під час струменевого режиму руху транзитного потоку при всіх розглянутих умовах процесу спостерігається лінійна залежність комплексу λS_E від потенційного питомого газовмісту $\varphi_{\text{П}}$ газорідинної суміші на радіусі мішалки, при чому графічні

залежності $\lambda S_E = f(\varphi_{II})$ (рис. 3.13-3.16) мають практично однаковий тангенс кута нахилу до осі φ_{II} ($32,5 \cdot 10^{-5} \text{ м}^3/\text{м}^2$), який не залежить від діаметру самоусмоктуючих мішалок і конфігурації лобової частини порожнистих циліндричних лопатей.

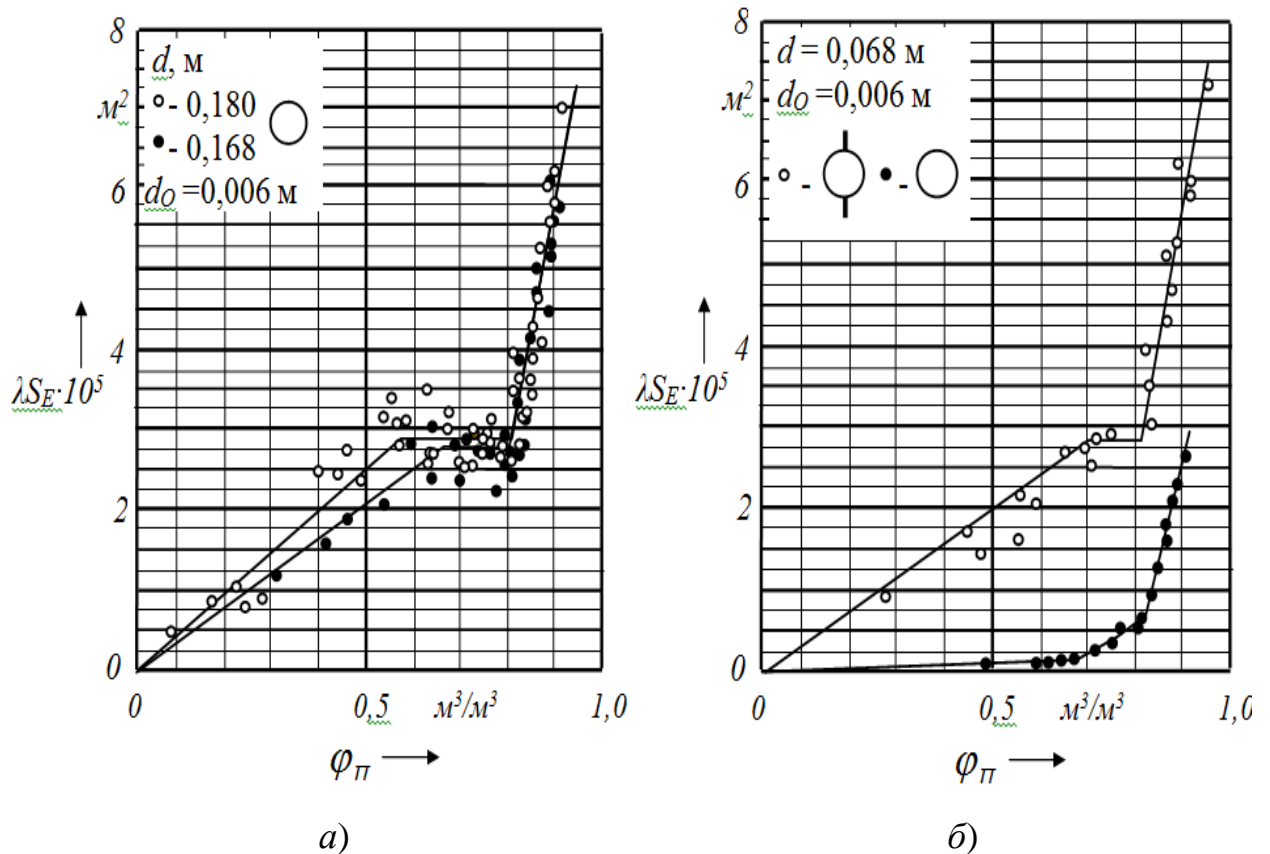


Рисунок 3.13 – Залежність комплексу λS_E від потенційного питомого газомісту газорідинної суміші на радіусі самоусмоктуючої мішалки: $z = 2$; $h_{ГС} = 0,04\text{--}0,35$ м; $n = 2\text{--}22$ 1/с; в'язкість робочої рідини $1 \cdot 10^{-3}\text{--}5 \cdot 10^{-3}$ Па·с;

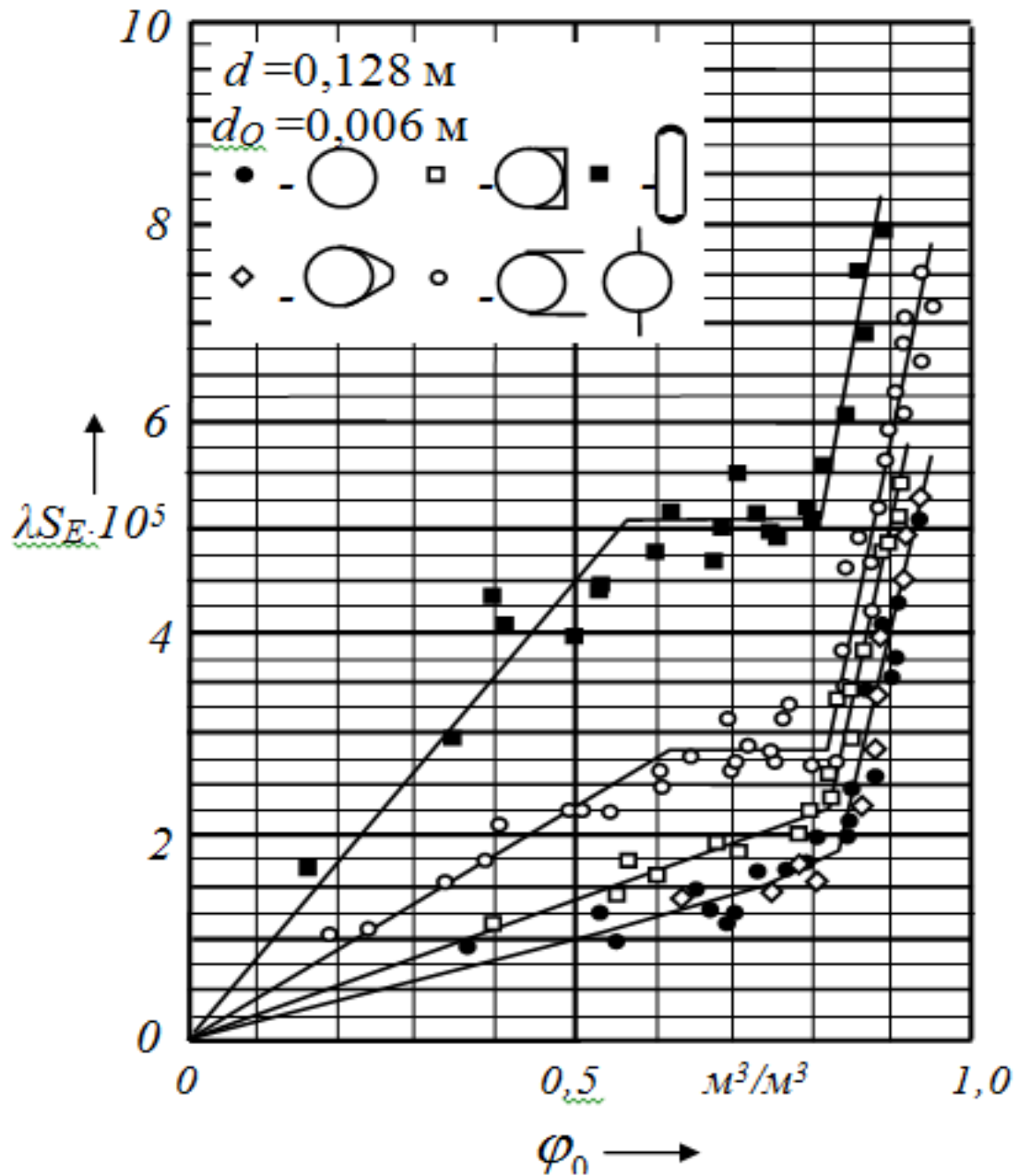


Рисунок 3.14 – Залежність комплексу λS_E від потенційного питомого газовмісту газорідинної суміші на радіусі самоусмоктуючих мішалок з різними конфігураціями лобової поверхні порожнистих лопатей: $z = 2$; $h_{ГС} = 0,04\text{--}0,35 \text{ м}$; $n = 2\text{--}22 \text{ 1/с}$; в'язкість робочої рідини $1 \cdot 10^{-3}\text{--}5 \cdot 10^{-3} \text{ Па} \cdot \text{с}$; висота циліндричних лопатей з вертикальними ребрами $0,012\text{--}0,030 \text{ м}$; висота отвору щілинної лопаті - $0,02 \text{ м}$, ширина - $0,004 \text{ м}$.

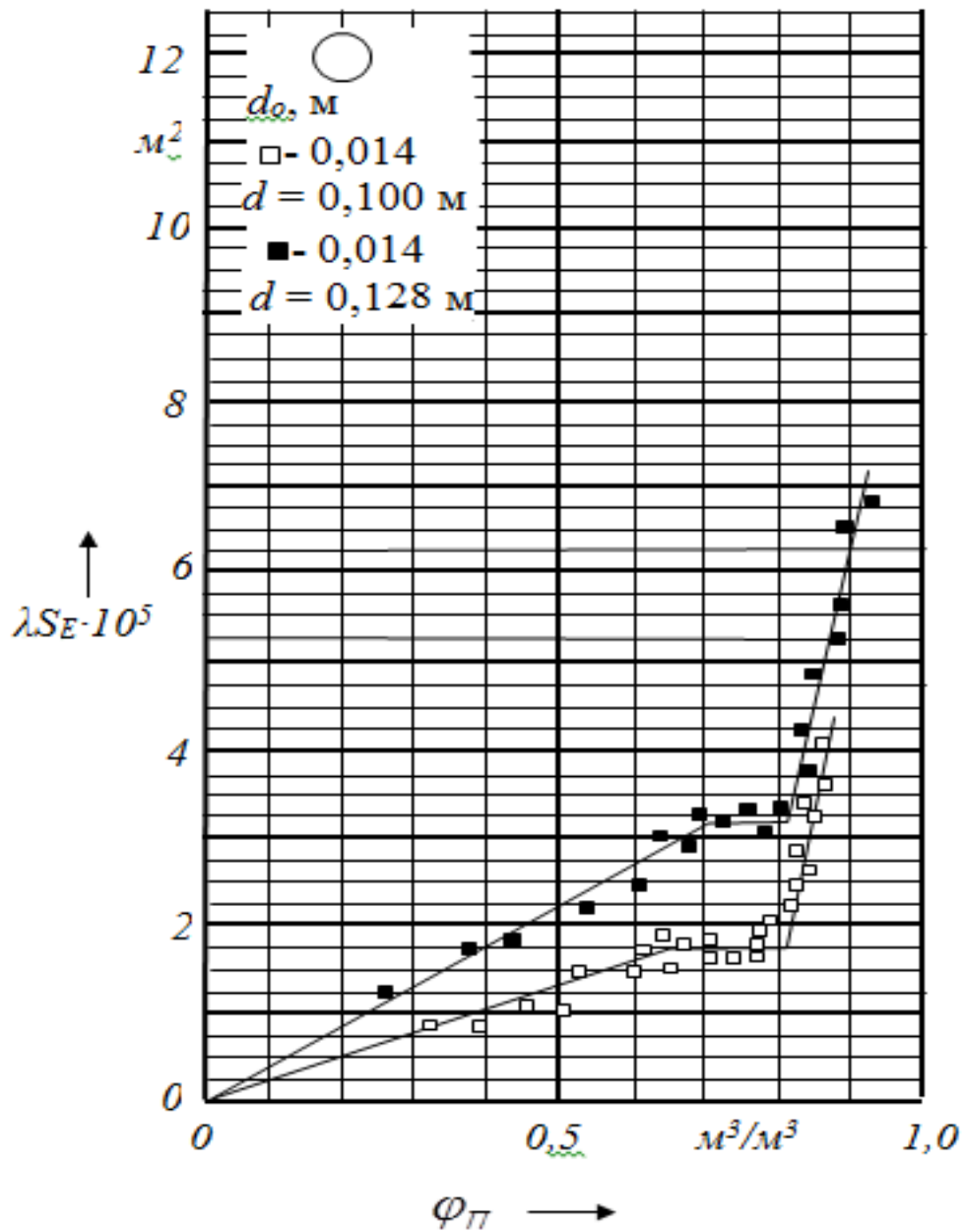


Рисунок 3.15 – Залежність комплексу λS_E від потенційного питомого газовмісту газорідинної суміші на радіусі мішалки від діаметру самоусмоктуючої мішалки: $z = 2$; $h_{TC} = 0,04\text{--}0,35$ м; $n = 2 - 22$ 1/с; в'язкість робочої рідини $1 \cdot 10^{-3}\text{--}5 \cdot 10^{-3}$ Па·с.

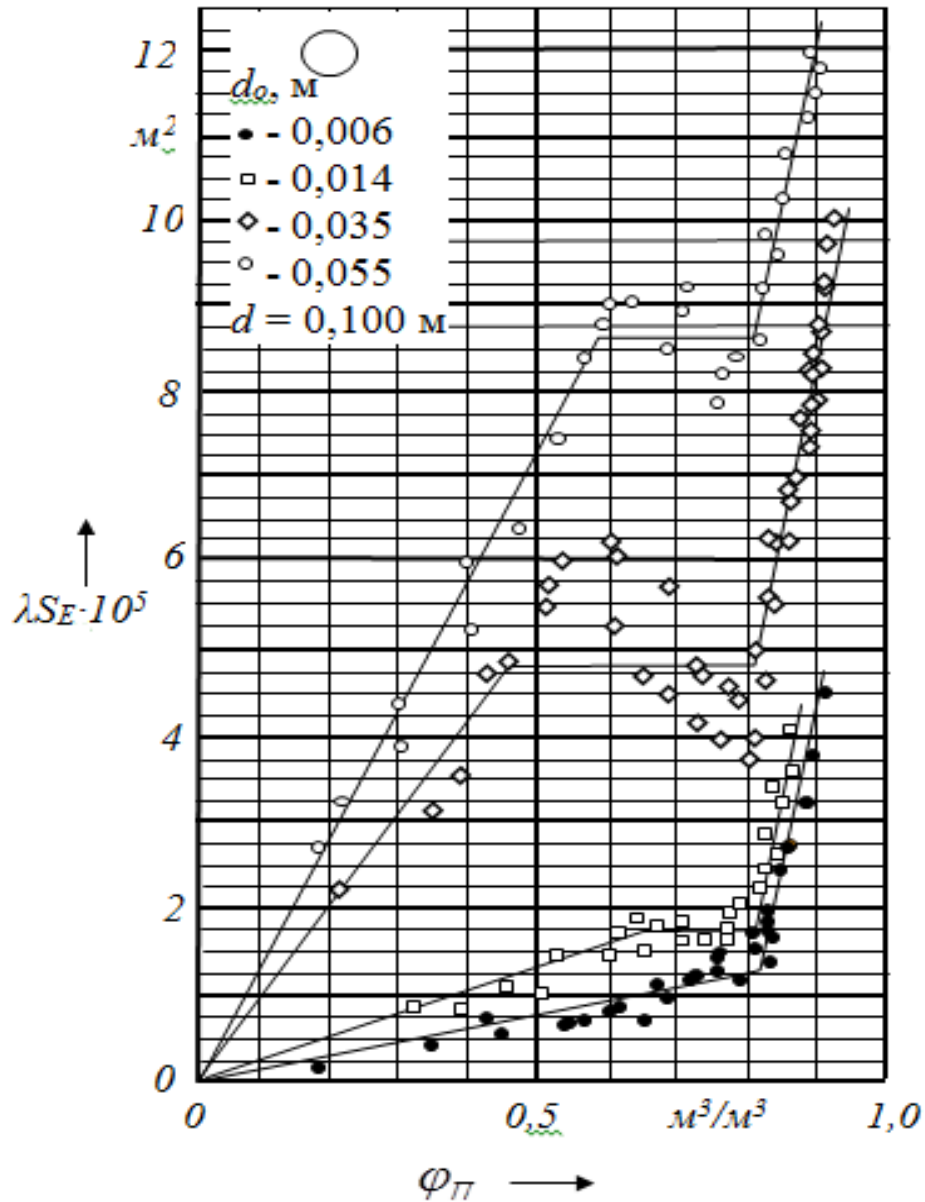


Рисунок 3.16 – Залежність комплексу λS_E від потенційного питомого газовмісту газорідинної суміші на радіусі мішалки від діаметру циліндричних лопатей: $z = 2$; $h_{ГС} = 0,04\text{--}0,35$ м; $n = 2\text{--}22$ 1/с; в'язкість робочої рідини $1 \cdot 10^{-3}\text{--}5 \cdot 10^{-3}$ Па·с;

Установка на циліндричних порожнистих лопатях діаметром $d_0 = 0,006\text{м}$ двох горизонтальних пластин приводить до збільшення приблизно у два рази значення комплексу λS_E (рис. 3.13б) та насосної продуктивності самоусмоктуючої мішалки діаметром $d_M = 0,128\text{ м}$ (рис. 3.18). При цьому довжина пластин практично не впливає на ці показники. Це свідчить про те, що на звичайній циліндричній порожнистій лопаті турбулізований потік формується тільки на частині півкола лобової сторони лопаті (рис. 3.17), а при установці вертикальних (рис. 3.17б) або горизонтальних (рис. 3.17в) пластин турбулізований потік формується практично на всій довжині півкола лопаті ($\approx 0,5\pi d_0$).

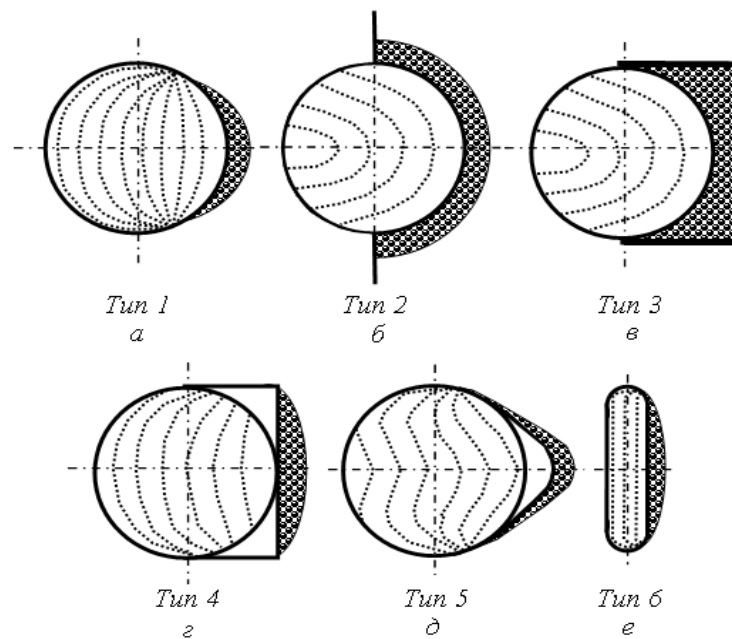


Рисунок 3.17 – Схема формування площі перетину газового потоку у отворах порожнистих лопатей з різною формою лобової частини: *а* - гладка циліндрична (тип 1); *б* - циліндрична з вертикальними ребрами (тип 2); *в* - циліндрична з горизонтальними пластинами у лобовій частини (тип 3); *г* – циліндрична з прямокутною лобовою частиною (тип 4); *д* – циліндрична з краплевидною лобовою частиною (тип 5); *е* - щілинна (тип 6);

Установка вертикальних ребер на циліндричну порожнисту лопать (рис. 3.17б) самоусмоктуючої мішалки діаметром $d_M = 0,068\text{ м}$ аналогічно впливає на значення комплексу λS_E (рис. 3.13б) і відповідно на насосну продуктивність мішалки. При цьому висота вертикальних ребер практично не впливає на насосну газову продуктивність самоусмоктуючої мішалки (рис. 3.18).

Порівняння самоусмоктуючої мішалки з циліндричною лопатю з прямокутною формою лобової поверхні (рис. 3.17з) з аналогічною мішалкою з гладкими циліндричними лопатями (рис. 3.17а) показує певне підвищення значення комплексу λS_E (рис. 3.14) та насосної газової продуктивності (рис. 3.18), що зв'язане певно із зростанням площі перетину радіально-відцентрового турбулізованого потоку.

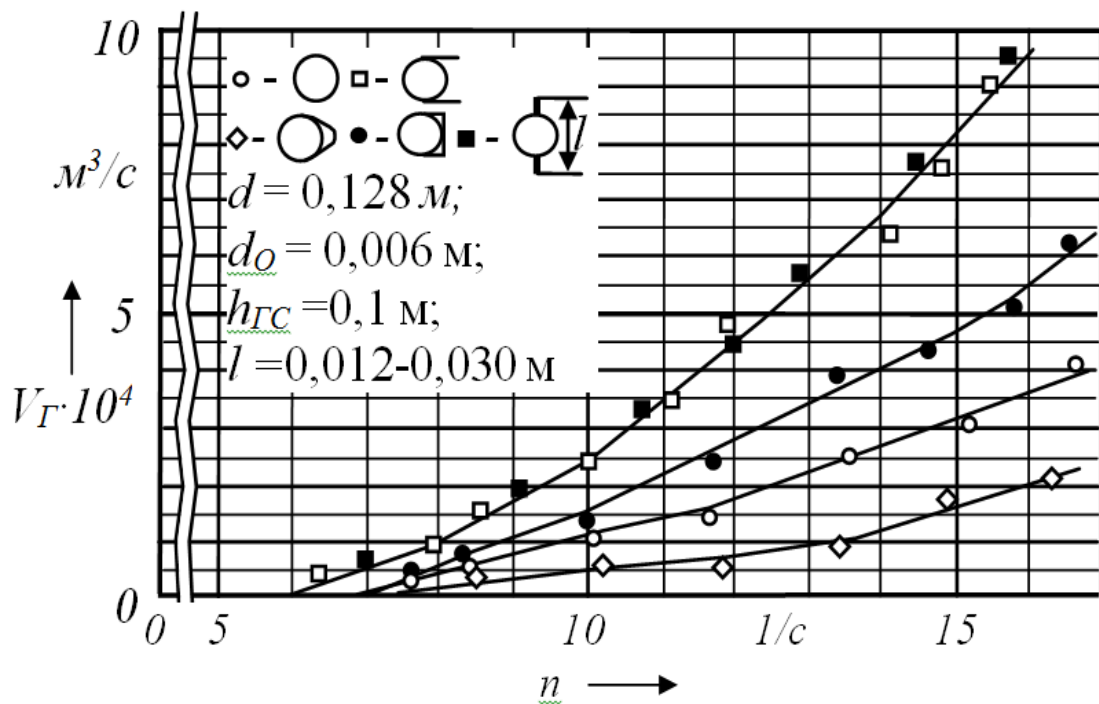


Рисунок 3.18 – Залежність насосної газової продуктивності самоусмоктуючих мішалок з різним профілем лобової частини лопаті від частоти обертання

У самоусмоктуючих мішалок з краплевидною формою лобової частини порожнистої лопаті (рис. 3.17д) спостерігається значне падіння насосної

продуктивності (рис. 3.18) у порівнянні з мішалкою з гладкими циліндричними лопатями (рис. 3.17а), при цьому значення комплексу λS_E таких мішалок практично однакове (рис. 3.13). Така особливість є наслідком того, що висота турбулізованого радіального потоку біля порожнистих циліндричних лопатей для самоусмоктуючих мішалок, що порівнюються, практично однакова, але значення їх коефіцієнтів ξ_0 значно відрізняються: для мішалок з порожнистими лопатями і краплевидною формою лобової частини (рис. 3.17д) $\xi_0 = 0,34$, а для мішалок з лопатями циліндричної форми (рис. 3.17а) $\xi_0 = 0,69$.

При випробуваннях самоусмоктуючих мішалок різних типів по визначенню залежності газової продуктивності (рис. 3.10) спостерігається певна стабілізація значень комплексу λS_E перед переходом процесу усмоктування в струменевий режим. Такий перехід відбувається при $\varphi_{(0)} \approx 0,81 \text{ м}^3/\text{м}^3$, що відповідає співвідношенню частот обертання мішалки $n/n_0 \approx 2,3$.

Для самоусмоктуючих мішалок діаметром $d_M = 0,180$ і $d_M = 0,168\text{м}$ і циліндричними порожнистими лопатями з діаметром отвору $d_O = 0,006\text{м}$ в умовах випробувань значення комплексу дорівнює $\lambda S_E \approx 2,7 \cdot 10^{-5} - 2,9 \cdot 10^{-5} \text{ м}^2$, що відповідає площі отвору циліндричної порожнистої лопаті мішалки при $\lambda_1 = 1$.

З цього виходить, що значення комплексу λS_E можна визначити по формулі

$$\lambda S_E = S_O + 32,5 \cdot 10^{-5} (\varphi_A - 0,81) \quad (3.46)$$

або

$$\lambda S_E = S_E + 32,5 \cdot 10^{-5} (\varphi_A - 0,81) . \quad (3.47)$$

По експериментальним даним для самоусмоктуючих мішалок з циліндричними порожнистими лопатями еквівалентна площа перетину газового потоку перед початком струменевого режиму пропорційна квадрату діаметра мішалки d_M

$$\frac{S_E}{d_o} = K d_M^2, \quad (3.48)$$

де K - коефіцієнт пропорційності.

Звідси

$$S_E = K d_M^2 d_o, \quad (3.49)$$

при $S_E \leq S_o \quad S_E = S_o$.

У самоусмоктуючих мішалках з гладкими порожнистими циліндричними лопатями (тип 1-7, таблиця 3.1) та порожнистими лопатями з краплевидною формою лобової частини (тип 12,13, таблиця 3.1) коефіцієнт пропорційності - $K = 0,135$; у мішалок з циліндричною формою лопатей та горизонтальними пластинами або вертикальними ребрами (тип 14-18, таблиця 3.1) - $K = 1,06$; у самоусмоктуючих ежекційних мішалках з щілинними порожнистими лопатями, що вертикально розташовані по відношенню до площини обертання мішалки (тип 8, таблиця 3.1) коефіцієнт пропорційності дорівнює $K = 0,155$. Аналізуючи результати експериментальних випробувань з продуктивність по газовій фазі та величини коефіцієнта пропорційності K можна зазначити, що найбільш ефективними є самоусмоктуючі ежекційні мішалки з плоскими порожнистими лопатями (рис. 3.17e), які доцільно використовувати в апаратах об'ємного типу, призначених для проведення газорідних реакцій.

Для розрахунку насосної продуктивності самоусмоктуючих ежекційних мішалок по газовій фазі у робочому режимі можна використовувати рівняння (3.36), (3.43) або (3.45), (3.47) і (3.49).

В результаті проведених досліджень встановлено механізм руху газу з отворів порожнистих лопатей самоусмоктуючих ежекційних мішалок працюючих в газорідних апаратах об'ємного типу і розроблені принципові положення методу розрахунку насосної продуктивності таких мішалок.

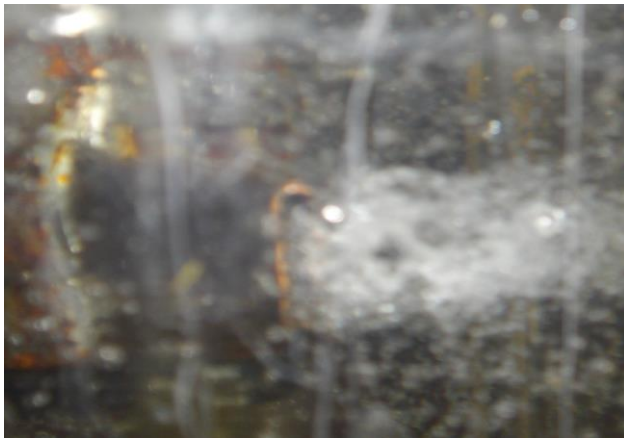
3.4 Насосна продуктивність самоусмоктуючих ежекційних мішалок з плоскими порожнистими лопатями

Вище описаний механізм процесу усмоктування газової фази і результати лабораторних випробувань самоусмоктуючих мішалок в апаратах об'ємного типу показали значну перевагу самоусмоктуючих ежекційних мішалок плоскими порожнистими лопатями (рис. 3.17e) над іншими. Крім того самоусмоктуючі мішалки з плоскими порожнистими лопатями і розміщеною в середині ротору ежекційною перегородкою, що поділяє вхідний канал лопаті та ротор мішалки дві частини, через які під час обертання мішалки проходить усмоктування газової фази одночасно з рідиною. Таке конструктивне виконання самоусмоктуючих ежекційних мішалок дає можливість використовувати їх в реакторах об'ємного типу, створюючи первинний контакт реагуючих фаз в режимі повного витіснення з послідуочим інтенсивним перемішуванням в об'ємі апарату. Особливо актуальним є використання таких апаратів для проведення газорідних швидких екзотермічних реакції, наприклад, сульфування алкілбензолів газоподібним сірчанам ангідридом суміші з повітрям та інших газорідних процесів, що супроводжуються хімічною реакцією. Інформації для впровадження таких процесів в виробництво, згідно літературних даних, недостатньо.

Розроблений експериментальний стенд (рис. 2.1) дозволяє проводити лабораторні випробування самоусмоктуючих ежекційних мішалок по продуктивності, як по газовій фазі та рідині окремо, так і при сумісному усмоктуванні. Експериментальні випробування з визначення насосної продуктивності самоусмоктуючих ежекційних мішалок показали, що збільшення частоти обертання, крім збільшення продуктивності по газовій фазі, приводить до збільшення об'єму усмоктуємої рідини, в наслідок чого в проміжному стакані 5 на схемі (рис. 2.1) відбувалося зниження рівня води від раніше визначеної позначки, яке компенсувалося збільшенням подачі рідини за допомогою регулюючого вентиля 7. Зміну витрати води фіксували за допомогою

ротаметру РС-5. Опити повторювали 3-5 раз і середньозважені результати зводили в таблиці та представлені в вигляді графічних залежностей. Цей метод використовувався при проведенні випробувань з визначення продуктивності самоусмоктуючих ежекційних мішалок з плоскими порожнистими лопатями, як по рідині, так і при одночасному усмоктуванні газової фази та рідини.

Випробування самоусмоктуючих ежекційних мішалок діаметром $d_M = 0,065; 0,1; 0,13\text{м}$ з плоскими порожнистими лопатями висотою $b = 0,020\text{м}$ і шириною плоскої щілини $0,004\text{м}$ в апараті діаметром $D = 0,25\text{м}$ з трьома відбійними перегородками шириною $0,1 D$ при глибинах занурення $h_n = 0,075; 0,1; 0,18\text{м}$ проводили по визначенню насосної продуктивності самоусмоктуючих ежекційних мішалок тільки по газовій фазі або рідині. Для цього в роторі самоусмоктуючої мішалки перекривали газовий або рідинний канали за допомогою гумової пробки.



а)



б)



в)



г)



д)



ж)



з)



и)

Рисунок 3.19 – Фото диспергування повітря в перемішуючу рідину при різних частотах обертання самоусмоктуючої мішалки

Результати випробувань самоусмоктуючої ежекційної мішалки діаметром $d_M = 0,1\text{м}$ з плоскими порожнистими лопатями з насосної продуктивності в режимі усмоктування окремо по газовій фазі та рідині представлені у вигляді графічних залежностей (рис. 3.20). Аналіз лабораторних випробувань свідчить про те, що насосна продуктивність самоусмоктуючих мішалок по газовій фазі (рис. 3.20а) залежить від частоти обертання, діаметру та глибини занурення мішалки, а насосна продуктивність по рідині (рис. 3.20б) – від діаметру та частоти обертання і не залежить від глибини занурення мішалки.

Експериментальні дані з продуктивності по газовій фазі від частоти обертання самоусмоктуючої мішалки з ежекційною перегородкою $d_M = 0,1\text{м}$ і закритим вхідним каналом для рідини показують, що загальна частота

обертання мішалки не співпадає з частотою обертання, при якій спостерігається початок усмоктування повітря. Ця частота умовно називається початковою частотою обертання мішалки n_0 і залежить від конструктивних особливостей, діаметру та глибини занурення мішалки (рис. 3.21). Подальше збільшення частоти обертання приводить до зростання кількості повітря, що усмоктується. Присутність ежекційної перегородки у роторі цієї мішалки, у випадку, коли самоусмоктуюча ежекційна мішалка працює тільки по газовій фазі, незалежно від співвідношення поділу вхідного каналу порожнистої лопаті, не впливає на величину початкової частоти обертання n_0 (рис. 3.20а, 3.21).

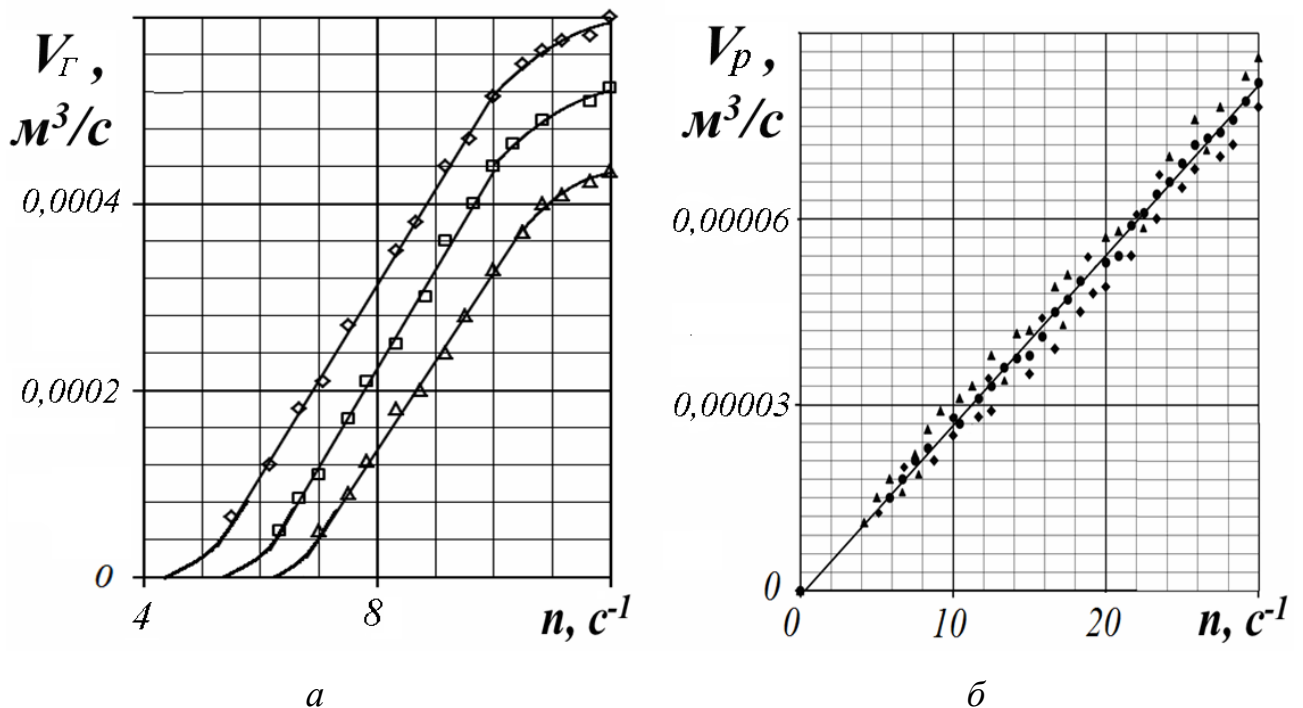


Рисунок 3.20 – Продуктивність самоусмоктуючої ежекційної мішалки діаметром $d_M = 0,1$ м в залежності від глибини занурення та частоти обертання:

a – по газовій фазі; b – по рідині \diamond – $h_3 = 0,075$ м; \square – $h_3 = 0,12$ м; Δ – $h_3 = 0,18$ м

Випробування цієї мішалки з продуктивності по газовій фазі при відкритому каналу для рідини, тобто при одночасному усмоктуванні газу і рідини, показують, що початок усмоктування повітря самоусмоктуючою ежекційною мішалкою відбувається при частоті обертання мішалки де що меншій за початкову n_0 і дорівнює n_{TC} . При обертанні самоусмоктуючої

мішалки на рідину, що знаходиться в середині ротору і порожнистої лопаті діє відцентрова сила, яка змушує її переміщатися від центра обертання до периферії. Це приводить до здійснення циркуляції рідини, що перемішується, через нижню частину ротору самоусмоктуючої мішалки і порожнисті лопаті. Швидкість руху рідини в середині мішалки збільшується пропорційно частоті обертання мішалки. При досягненні частоти обертання мішалки n до рівня гідростатичної частоти обертання $n_{гс}$ верхню частину порожнини ротору самоусмоктуючої ежекційної мішалки заповнює газова фаза, яка захоплюється у вигляді окремих бульбашок циркулюючою рідиною з нижньої частини ротора мішалки в порожнину лопаті.

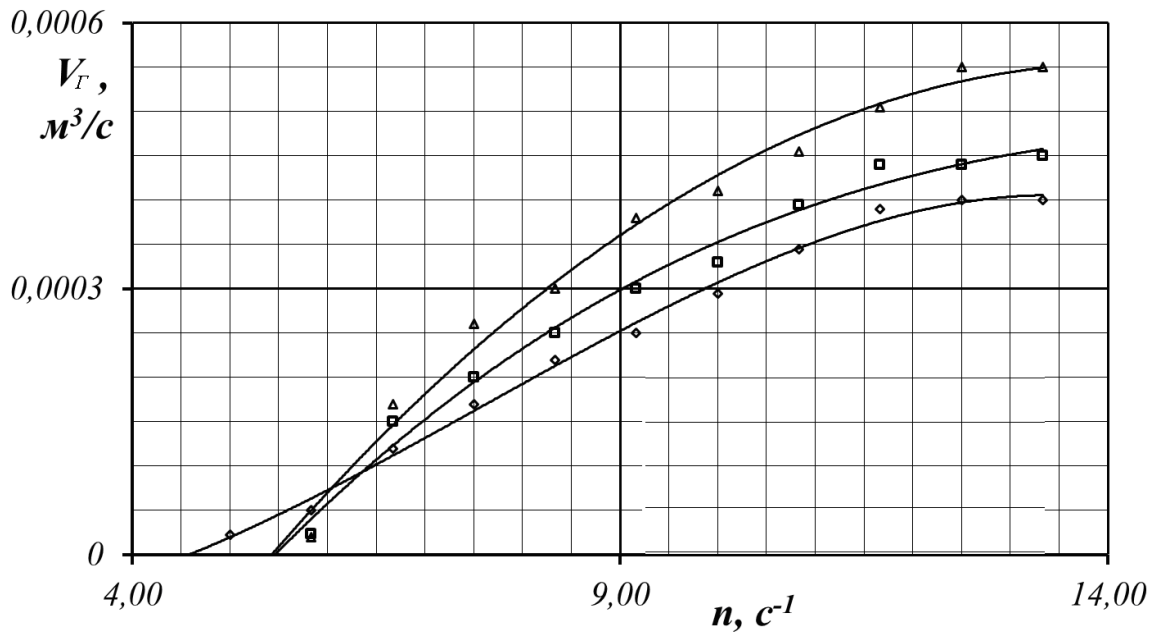


Рисунок 3.21 – Залежність насосної продуктивності самоусмоктуючих мішалок від частоти обертання при постійній глибині занурення $h_3=0,18m$: Δ – мішалка, що працює по газовій фазі; \square – мішалка з ежекційною перегородкою, яка поділяє вхідний канал у співвідношенні 1/3 і працює тільки по газовій фазі; \diamond – мішалка з ежекційною перегородкою, яка поділяє вхідний канал у співвідношенні 1/3 і працює одночасно по газовій фазі та рідині.

Далі рідина з окремими бульбашками повітря переміщається в порожнині лопаті до торця і потрапляє в об'єм апарату. Подальше прискорення частоти обертання самоусмоктуючої мішалки приводить до збільшення продуктивності мішалки, як по газовій фазі так і по рідині. В той же час при одночасному усмоктуванні повітря і рідини, кількість газу, що усмоктується, дещо менша ніж у випадку, коли самоусмоктуюча ежекційна мішалка працює тільки по газовій фазі (рис. 3.21).

Випробування самоусмоктуючої шестилопатевої мішалки діаметром $d_M = 0,065\text{ м}$ з ежекційною перегородкою 17 (рис. 2.3) представлено у вигляді графічної залежності продуктивності по газовій фазі та рідині залежно від частоти обертання та глибини занурення (рис. 3.22).

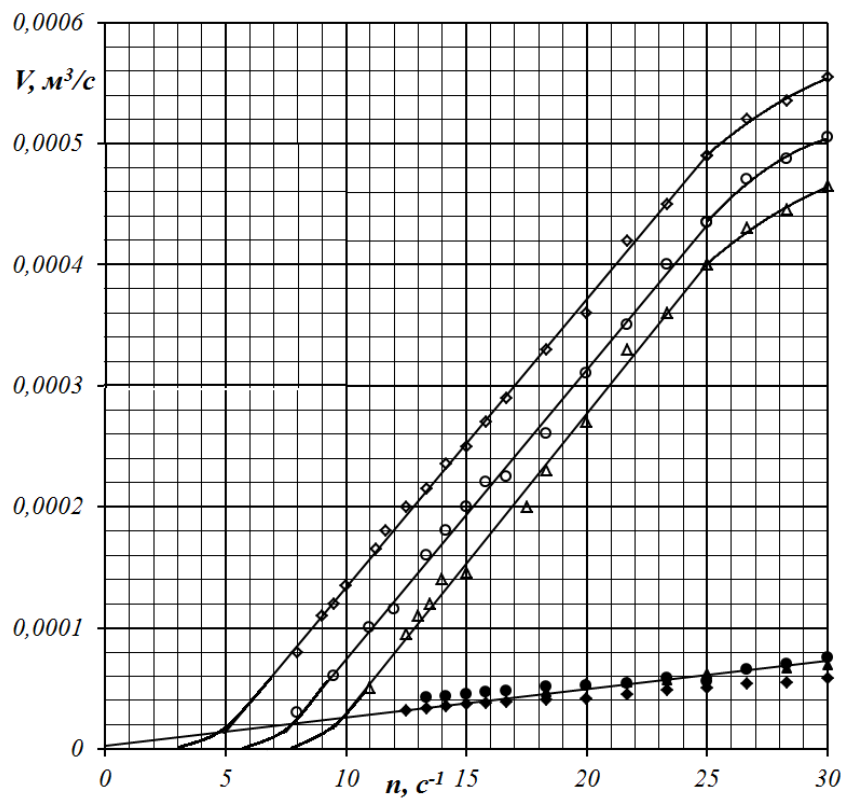


Рисунок 3.22 – Продуктивність самоусмоктуючої ежекційної мішалки діаметром $d_M = 0,065\text{ м}$ по газовій та рідинній фазах від глибини занурення та частоти обертання мішалки: по газовій фазі: \diamond – $h_3=0,06\text{ м}$; \circ – $h_3=0,1\text{ м}$; \triangle – $h_3=0,14\text{ м}$; по рідині: \blacklozenge – $h_3=0,06\text{ м}$; \bullet – $h_3=0,1\text{ м}$ \blacktriangle – $h_3=0,14\text{ м}$.

Графічна залежність з насосної продуктивності самоусмоктуючої мішалки з вертикальними порожнистими лопатями в апараті (рис. 3.22) свідчать про те, що при одночасній роботі мішалки по газовій фазі та рідині, продуктивність по газовій фазі залежить від глибини занурення мішалки, а продуктивність по рідині в режимі самоусмоктуванні практично не залежить від глибини занурення мішалки. В той же час зміна конфігурації вхідної кромки порожнистої лопаті приводить до збільшення продуктивності самоусмоктуючих мішалок, як по газовій фазі (рис. 3.23) так і по рідині.

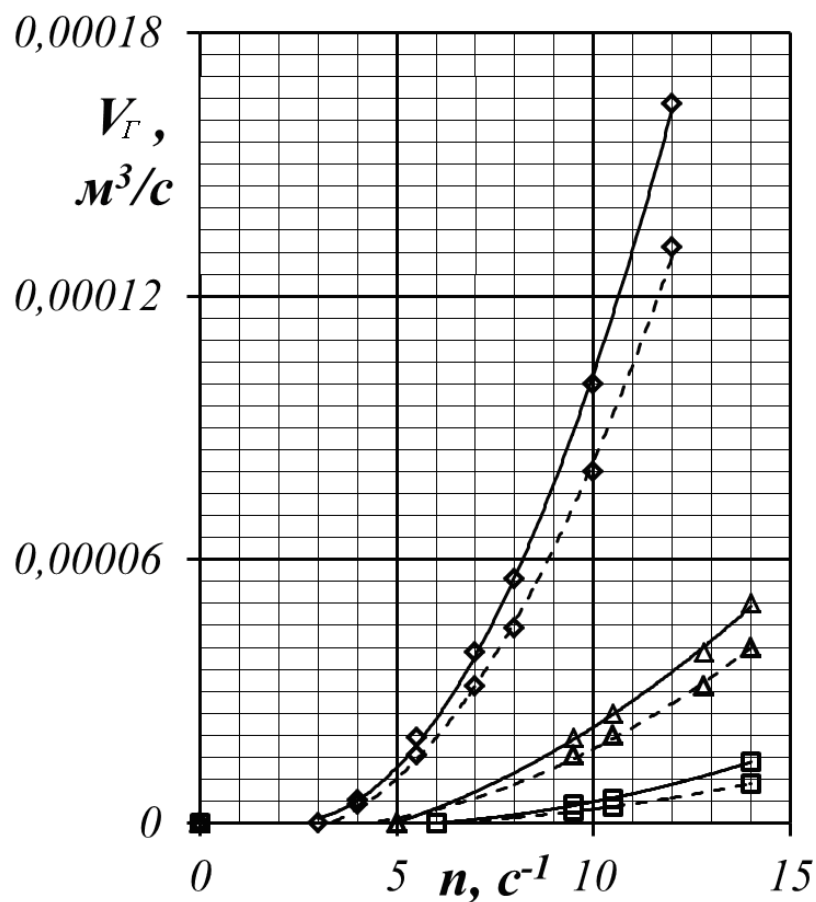


Рисунок 3.23 – Залежність продуктивності самоусмоктуючої ежекційної мішалки по газовій фазі від частоти обертів при постійній глибині занурення ($h_3=0,1$ м) для мішалок діаметром: \diamond - $d = 0,180$ м; Δ - $d = 0,1$ м; \square - $d = 0,065$ м

Випробування самоусмоктуючих ежекційних мішалок з закритим каналом для газової фази проводили 3-4 заміри витрати рідини, що надходила в апарат

безпосередньо під мішалку в режимі самоусмоктування, визначали середнє значення об'єму рідини та вчисляли коефіцієнт витрати [64]. Результати випробувань заносилися в таблиці і представлені у вигляді графічних залежностей коефіцієнта витрати рідини в залежності від числа Рейнольдса (рис. 3.24). Були проведені порівняльні випробування самоусмоктуючих мішалок з різною конфігурацією вхідної кромки в порожнисті плоскі лопаті.

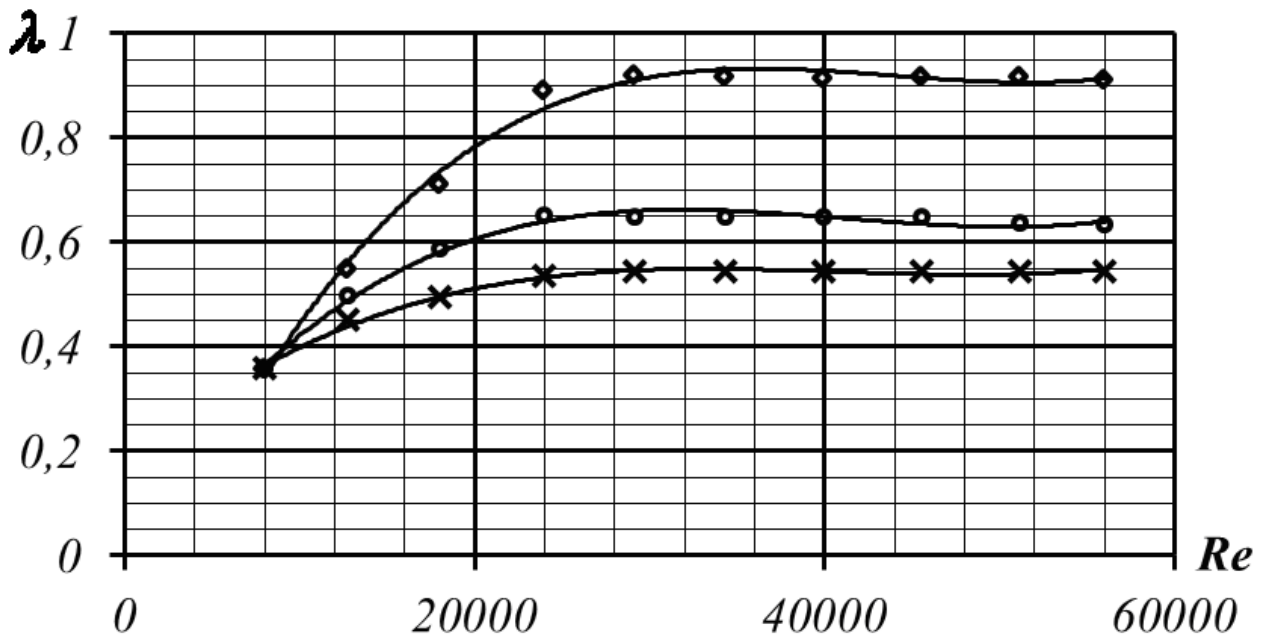


Рисунок 3.24 – Графік залежності коефіцієнта витрати вертикальної щілини з різним кутом скошу однієї кромки від числа Рейнольдса:

\diamond - кут скошу 45° ; \circ - кут скошу 60° ; \times – щілина з прямими кромками 90° .

Як видно з графічних залежностей величина кута скошу 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. Аналіз

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

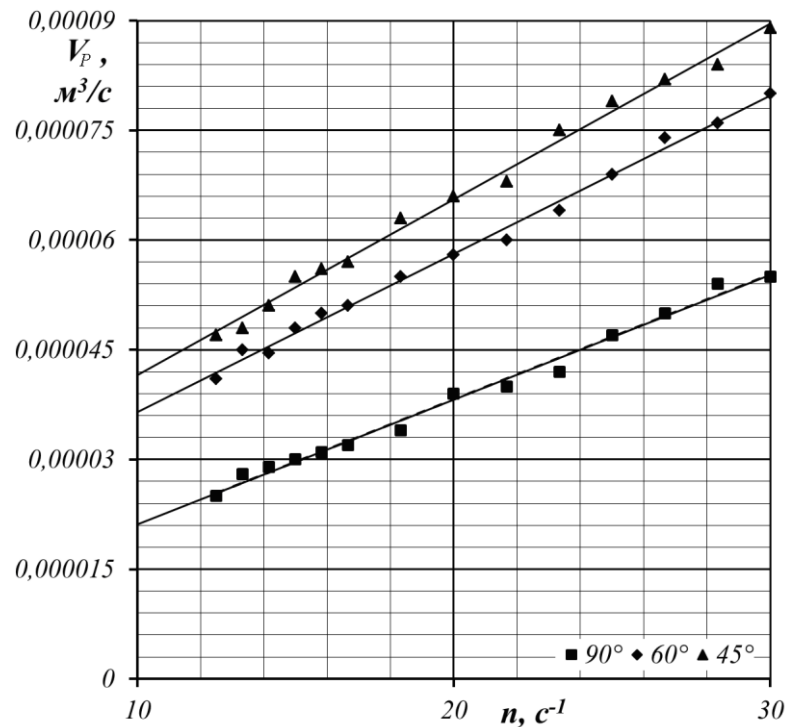


Рисунок 3.25 – Залежність насосної продуктивності самоусмоктуючої ежекційної мішалки $d = 0,1$ м по рідині від частоти обертання при різних кутах скосу α вхідної кромки в порожнисту лопать: ■ – $\alpha=90^\circ$; ♦ – $\alpha=60^\circ$; ▲ – $\alpha=45^\circ$

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° і 45° . Отримані експериментальні дані з насосної продуктивності по рідині були порівняні з насосною продуктивністю по рідині геометрично подібних мішалок з прямими вхідними кромками (рис.

3.25). Із графічної залежності видно, що коефіцієнт витрати по рідині для самоусмоктуючих ежекційних мішалок з кутом скосу вхідної кромки 45° зі сторони лобової поверхні плоскої порожнистої лопаті має найкращі показники в порівнянні з іншими мішалками. Внаслідок обробки експериментальних даних було отримане рівняння по визначенню коефіцієнта витрати λ залежно від величини кута скосу вхідної кромки

$$\lambda = 0,5 + \cos^2 \beta - 0,17 \cos \beta, \quad (3.50)$$

де β - кут скосу вхідної кромки лопаті (рис. 2.3, переріз А-А, вид б₂).

Рівняння (3.50) справедливе для робочих рідин з динамічною в'язкістю від $1 \cdot 10^{-3}$ до $5 \cdot 10^{-3}$ Па·с при $Re \gg 30000$. Для самоусмоктуючих ежекційних мішалок з плоскими порожнистими лопатями з кутом скосу вхідної кромки, рівним 45° коефіцієнт витрати по рідині є найбільший і дорівнює 0,9. Отримані результати дають можливість модернізувати конструкції самоусмоктуючих ежекційних мішалок з метою збільшення продуктивності без зміни основних геометричних розмірів.

Особливості проведення певних газорідинних реакцій вимагає створення специфічних засобів, які приводять до зміни конструкції самоусмоктуючих мішалок шляхом зміни кута нахилу порожнистих плоских лопатей по відношенню до площини обертання мішалки та установки в середині порожнистого ротору ежекційної перегородки. Проведені випробування таких самоусмоктуючих мішалок і отримані результати показують, що зміна кута нахилу порожнистих лопатей з вертикального розташування, тобто - 90° на кут 60° і 45° також впливає на продуктивність самоусмоктуючої мішалки по газовій фазі (рис. 3.26). Найбільшу продуктивність по газовій фазі мають самоусмоктуючі мішалки з вертикальними розташуванням порожнистих плоских лопатей.

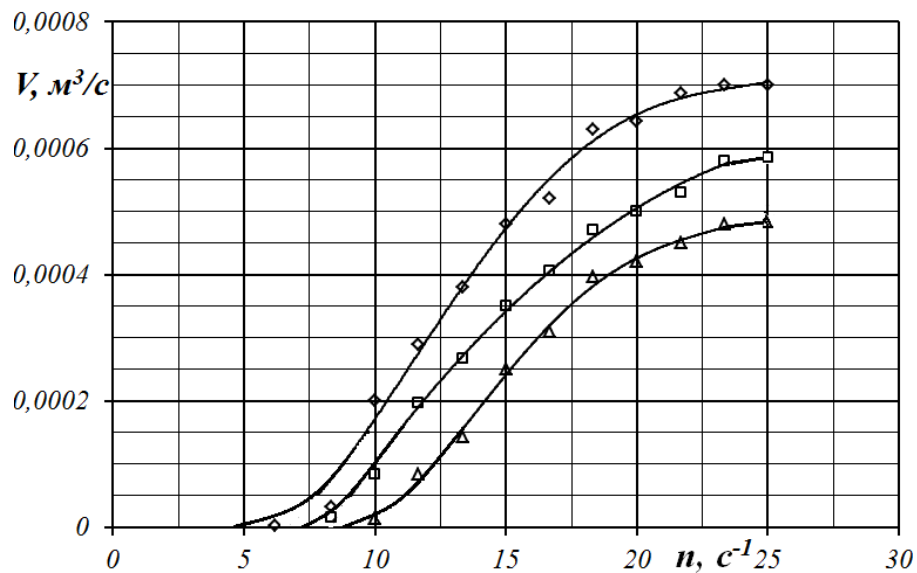


Рисунок 3.26 – Залежність насосної продуктивності самоусмоктуючої ежекційної мішалки $d_m=0,1$ м при глибині занурення 0,24м по газовій фазі від кута нахилу порожнистої лопаті: Δ – $\alpha=45^\circ$; \square – $\alpha=60^\circ$; \diamond – $\alpha=90^\circ$;

Далі були проведені випробування з продуктивності самоусмоктуючих мішалок (рис. 3.27 б,в,г) з плоскими порожнистими лопатями, порожнина ротору яких оснащена ежекційною перегородкою 17 (рис. 2.3), спочатку окремо по газовій фазі або рідині, а потім при сумісному усмоктуванні газу та рідини. При цьому визначали також вплив співвідношення площ перетину вхідного каналу в плоску порожнисту лопать на продуктивність по газовій фазі та рідині.

Під час обертання самоусмоктуючої ежекційної мішалки на рідину, що знаходиться в середині порожнистих лопатей, діє відцентрова сила, яка спричиняє рух рідини від осі обертання до периферії. За рахунок нерозривності потоку на місце витісненої рідини через нижній вхідний канал мішалки і штуцер 18 (рис. 2.3) усмоктується рідина з проміжного стакану 5 (рис. 2.1). Зменшення рівня води в проміжному стакані компенсується збільшенням подачі води за допомогою регулюючого вентиля 7 (рис. 2.1) подачі води, кількість якої контролювали ротаметром 4. В роторі самоусмоктуючої мішалки встановлювали ежекційну перегородку (рис. 3.27) , яка поділяє площу перетину вхідного каналу в плоску порожнисту лопать на дві частини.

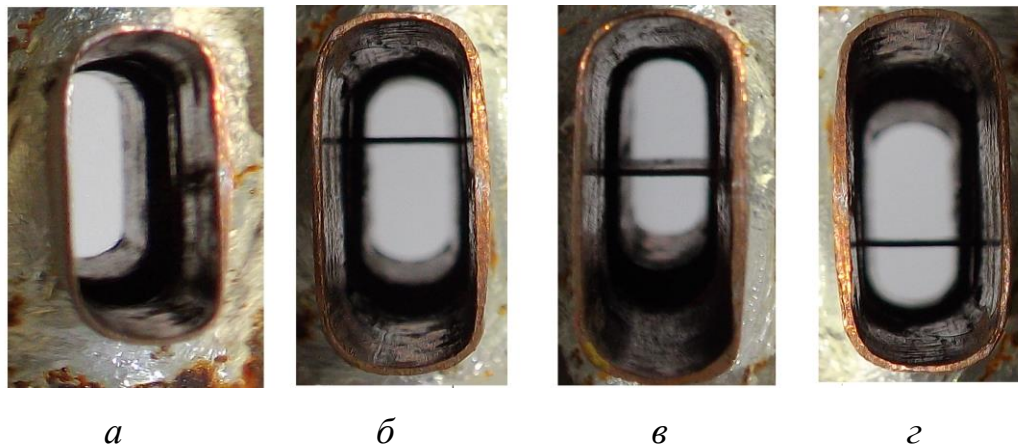
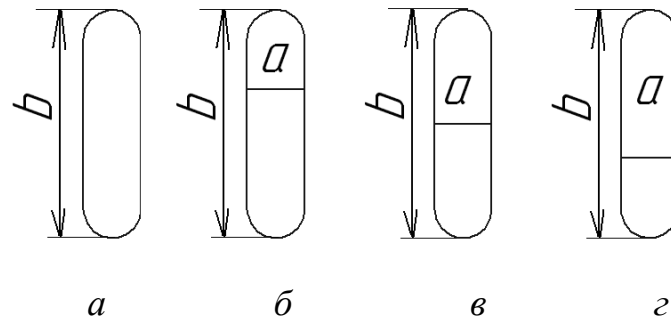


Рисунок 3.27 – Схема і фото плоскої порожнистої лопаті самоусмоктуючої ежекційної мішалки: *a* - без ежекційної перегородки і з ежекційною перегородкою, що поділяє лопать у співвідношенні площини: *б* - 1/3; *в* – 1/2; *г* – 2/3.

Верхня частина каналу мала перетин площею S_2 , висотою a і призначена для подачі газової фази змінювалась відповідно до загальної площі щілинного каналу S , яка пропорційна висоті лопаті b , у співвідношенні a/b : 1/3, 1/2, 2/3 (рис. 3.27).

Отримані результати експериментальних випробувань (рис. 3.28а, 3.29) свідчать про те, що насосна продуктивність по газовій фазі самоусмоктуючих ежекційних мішалок з порожнистими плоскими лопатями залежить від співвідношення поділу площ перерізу вхідного отвору ежекційною перегородкою. Коливання отриманих величин продуктивності знаходиться в межах похибки експерименту і дорівнює 5-7%.

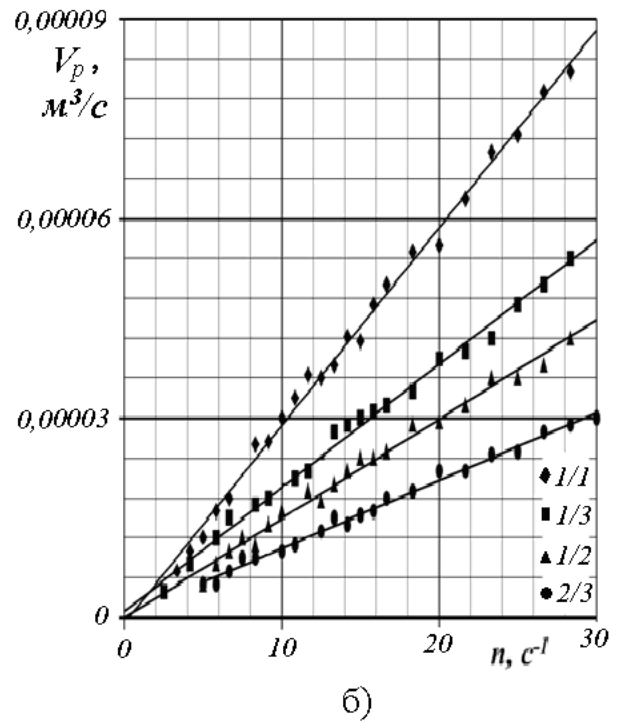
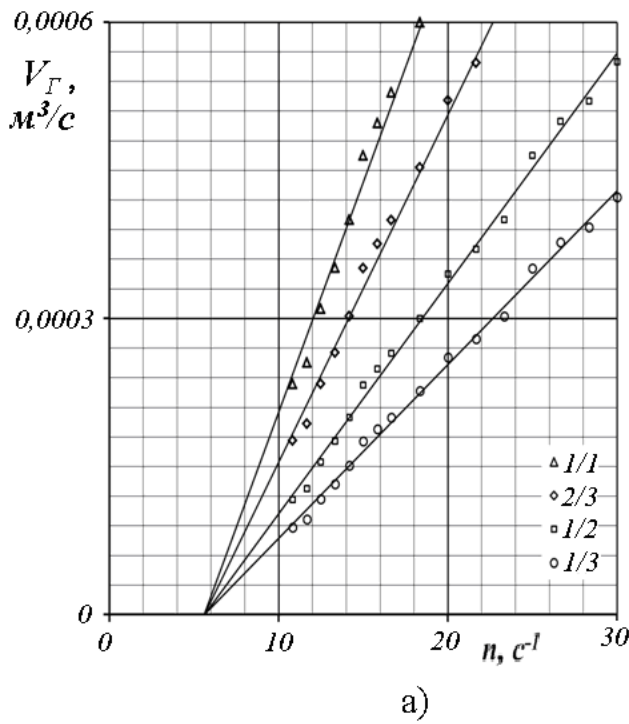


Рисунок 3.28 – Залежність насосної продуктивності самоусмоктуючих мішалок по газовій фазі (а) і рідині (б) від співвідношення розташування ежекційної перегородки

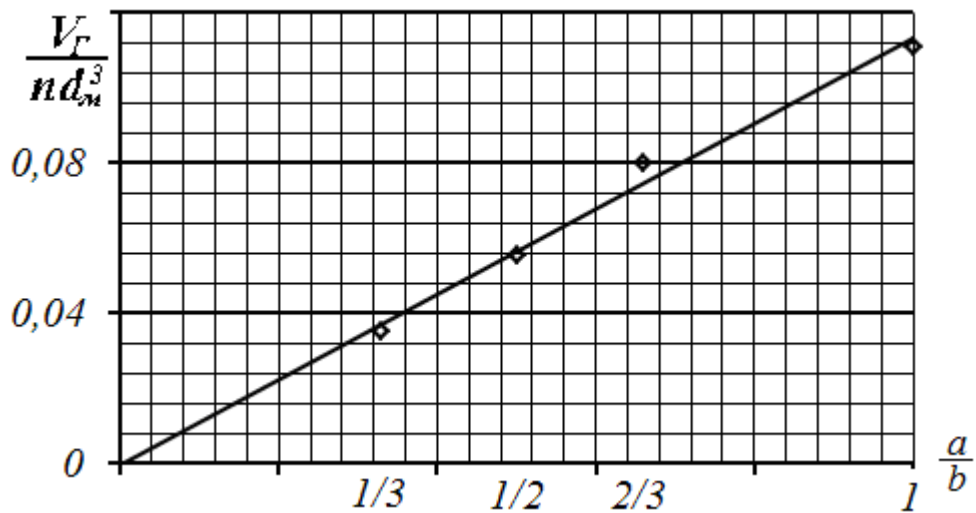


Рисунок 3.29 – Залежність комплексу V_G/nd_M^3 від співвідношення площ перетину вхідного отвору порожнистої лопаті

Дані з насосної продуктивності цих мішалок по рідині представлені у вигляді графічних залежностей (рис. 3.28б) і свідчать про те, що насосна продуктивність по рідині самоусмоктуючих ежекційних мішалок залежить від співвідношення площ перетину вхідного отвору. Випробування показали, що продуктивність по газовій фазі самоусмоктуючих ежекційних мішалок з плоскими порожнистими лопатями в режимі самоусмоктування залежить від глибини занурення мішалки, в той же час продуктивність по рідині залежить тільки від площі перетину порожнистих лопатей, через яку проходить рідина. Результати експериментальних випробувань самоусмоктуючих ежекційних мішалок з вертикальними плоскими порожнистими лопатями та лопатями з певним кутом (45^0 , 60^0) нахилу до площини обертання мішалки при збереженні співвідношення геометричних параметрів мішалок і апарату для робочої рідин в'язкістю $1-5 \cdot 10^{-3}$ Па·с представлені в безрозмірній формі у вигляді залежностей:

для газової фази

$$\frac{V_G}{nd_M^3} = 0,03 \cdot \sin \alpha^{1,5} \cdot \left(\frac{a}{b}\right)^{0,5} \cdot \left(\frac{h}{d_M}\right)^{-0,9} \quad (3.51)$$

і для рідини

$$\frac{V_P}{nd_M^3} = 0,0033 \cdot \left(\frac{a}{b}\right). \quad (3.52)$$

Отримані емпіричні рівняння (3.51) і (3.52) для самоусмоктуючих ежекційних мішалок з плоскими порожнистими лопатями дозволяють проводити розрахунок продуктивності по газовій фазі та рідини в режимі самоусмоктування. Відхилення експериментальних даних від розрахункових не перевищує 17%. Ці рівняння можна використовувати для розрахунку процесів пов'язаних з проведенням газорідинних швидких реакцій, які потребують

подачу реагентів безпосередньо в зону реакції, яка відбувається в режимі витіснення або для визначення кількості рециркуляції газового реагенту при проведенні газорідних реакцій з важкорозчинними реагентами.

Для проведення швидких екзотермічних газорідних реакцій можливе використання реакторів об'ємного типу з самоусмоктуючими ежекційними мішалками, які мають додатковий теплообмінний елемент, що знаходиться в безпосередній близькості від виходу реакційної маси. Таким елементом може бути статор, виготовлений у вигляді порожнистих трубок.

З метою вивчення впливу статора на продуктивність самоусмоктуючих мішалок по газовій фазі в режимі самоусмоктування були проведені випробування в апараті об'ємного типу (рис. 3.31) зі статором, виготовленим з плоских вертикальних пластин поєднаних між собою за допомогою двох кілець (рис. 3.30), що розташований в зоні обертання мішалки. Для цього випадку в експериментальному апараті (рис. 3.31) були демонтовані відбійні перегородки і встановлено статор (рис. 3.30).



Рисунок 3.30 – Фото статора.



Рисунок 3.31 – Газорідинний апарат з самоусмоктуючою мішалкою і статором

Результати експериментальних випробувань представлені у вигляді графічних залежностей (рис. 3.32), згідно яких спостерігається деяке зменшення продуктивності по газу самоусмоктуючих ежекційних мішалок на рівні експериментальної похибки, які випробувалися в апаратах зі статором. Як видно з графіка (рис. 3.32) суттєвої різниці по газовій продуктивності самоусмоктуючих мішалок в порівнянні з попередніми випробуваннями в апаратах з відбійними перегородками не має.

В той же час використання статора може бути доцільним в газорідинних реакторах з самоусмоктуючими ежекційними мішалками, які будуть впроваджуватися в виробництво на стадіях проведення швидких екзотермічних реакцій, наприклад, для проведення реакції сульфурвання вуглеводнів газоподібним сірчанам ангідридом.

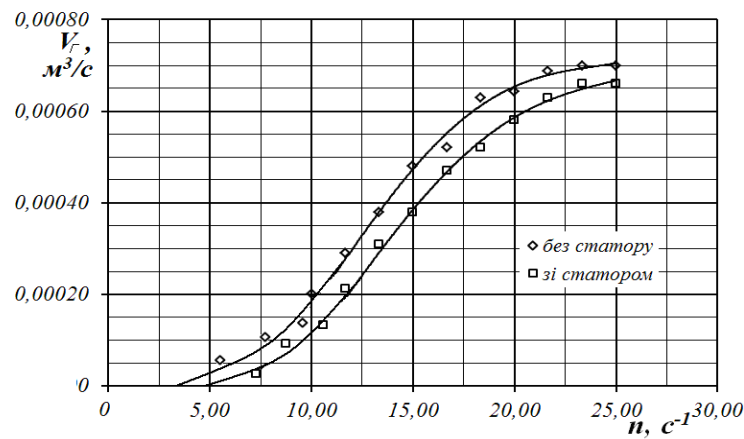


Рисунок 3.32 – Залежність продуктивності самоусмоктуючої ежекційної мішалки $d_m=0,12$ м від числа обертів при глибині занурення $h_3=0,1$ м

Для збільшення терміну перебування газового реагенту в газорідинному об'ємі апарату за рахунок рециркуляції газу може бути запропонований ефективний перемішувачій пристрій [146], який дозволяє проводити рециркуляцію газового реагенту в перемішуємий об'єм. Такі реактори можуть бути використані для проведення процесів окислення метилбензолів озоном та реакцій хлорування у виробництвах антрохінонсульфо кислоти, індантрона, 2,6-діхлор-4-нітроаніліна та інших пасивних вуглеводнів.

3.5. Висновки до третього розділу

Розроблена фізична модель усмоктування газової фази на основі енергетичного балансу дозволила визначити вплив форми лобової частини порожнистої лопаті самоусмоктуючих ежекційних мішалок на насосну продуктивність по газовій фазі та рідині, визначити коефіцієнт опору лопатей в залежності від її форми поперечного перетину, діаметру мішалки та в'язкості рідини:

- отримані емпіричні залежності для визначення коефіцієнту опору самоусмоктуючих мішалок з циліндричними порожнистими та плоскими порожнистими лопатями від діаметру мішалки, кута нахилу порожнистих лопатей та в'язкості рідини;

- отримані емпіричну залежність для визначення початкової частоти обертання самоусмоктуючих мішалок з плоским порожнистими лопатями від глибини занурення та діаметру;

- виявлений вплив конфігурації вхідної кромки в порожнисту плоску лопать на коефіцієнт витрати та продуктивність і отримати емпіричну залежність для визначення коефіцієнта витрати від кута скосу вхідної кромки в порожнисту плоску лопать самоусмоктуючої мішалки;

- виявлений вплив ежекційної перегородки на продуктивність самоусмоктуючих мішалок та отримати емпіричні залежності для визначення насосної продуктивності самоусмоктуючих ежекційних мішалок з плоскими порожнистими лопатями по газовій фазі та рідині при одночасному усмоктуванні останніх, в тому числі при різних співвідношення площ перетину вхідного отвору порожнистої лопаті ежекційною перегородкою.

Запропонована фізико-математична модель дає змогу визначати найбільш ефективний тип самоусмоктуючої ежекційної мішалки в залежності від вимог проведення газорідинної реакції, початкову частоту обертання мішалки, при якій розпочинається усмоктання газової фази та її диспергування в перемішуємий об'єм та визначати продуктивність мішалок по газовій фазі і рідині одночасно в залежності від розташування ежекційної перегородки, що конче необхідно для проведення деяких хімічних реакцій.

Випробування самоусмоктуючих ежекційних мішалок з різними профілями поперечного перетину порожнистих лопатей показує, що початок обертання мішалок не співпадає з частотою, при якій починає усмоктуватися газовий компонент. Аналіз отриманих даних під час випробувань дає підставу зробити висновки, що самоусмоктуючі мішалки з плоскими порожнистими лопатями є більш ефективними по насосній продуктивності по газовій фазі та середньому газовмісту в апараті об'ємного типу та дозволив отримати для цих мішалок емпіричну формулу для розрахунку початкової частоти обертання.

Основні результати розділу опубліковані в працях [135,136,149,138,139].

РОЗДІЛ 4

ДОСЛІДЖЕННЯ ГАЗОВМІСТУ ТА ПОТУЖНОСТІ НА ПЕРЕМІШУВАННЯ В АПАРАТІ З САМОУСМОКТУЮЧИМИ ЕЖЕКЦІЙНИМИ МІШАЛКАМИ

4.1. Дослідження газовмісту в апараті з самоусмоктуючою ежекційною мішалкою

Відомо, що швидкість масообмінного процесу залежить від площі контакту фаз [1], яка у газорідних апаратах залежить від об'ємного газовмісту робочого середовища і розміру бульбашок газу. Ці показники залежать від багатьох факторів, а у газорідних апаратах з мішалками на них додатково впливає механічне перемішування, що значно ускладнює їх визначення [2, 3]. Методи і дані, що дозволяють проводити розрахунки середнього питомого газовмісту середовища і площі поверхні контакту фаз у газорідних апаратах з самоусмоктуючими ежекційними мішалками в літературі відсутні. У даній роботі розглянуті результати дослідження залежності цих показників від насосної продуктивності самоусмоктуючих ежекційних мішалок і глибини їх занурення у робоче середовище. Дослідження проводили на установці, схема якої приведена на рисунку 2.1 за методикою описаною в розділі 2.1.2.

При дослідженні середнього газовмісту використовували апарати об'ємного типу діаметром 0,36 і 0,60м з самоусмоктуючими ежекційними мішалками діаметром від 0,068 до 0,18м з плоским порожнистим перетином лопатей. Випробовувалися мішалки з числом порожнистих лопатей 2, 4 і 6. Максимальний рівень рідини над лопатю мішалки 0,30м, максимальна частота обертання мішалки 25 с^{-1} . В якості робочого середовища використовували воду і розчини гліцерину в воді з динамічною в'язкістю $1 - 5 \cdot 10^{-3} \text{ Па} \cdot \text{с}$. Отримані результати випробувань представлені у вигляді графічної залежності середнього газовмісту від частоти обертання мішалки (рис. 4.2).

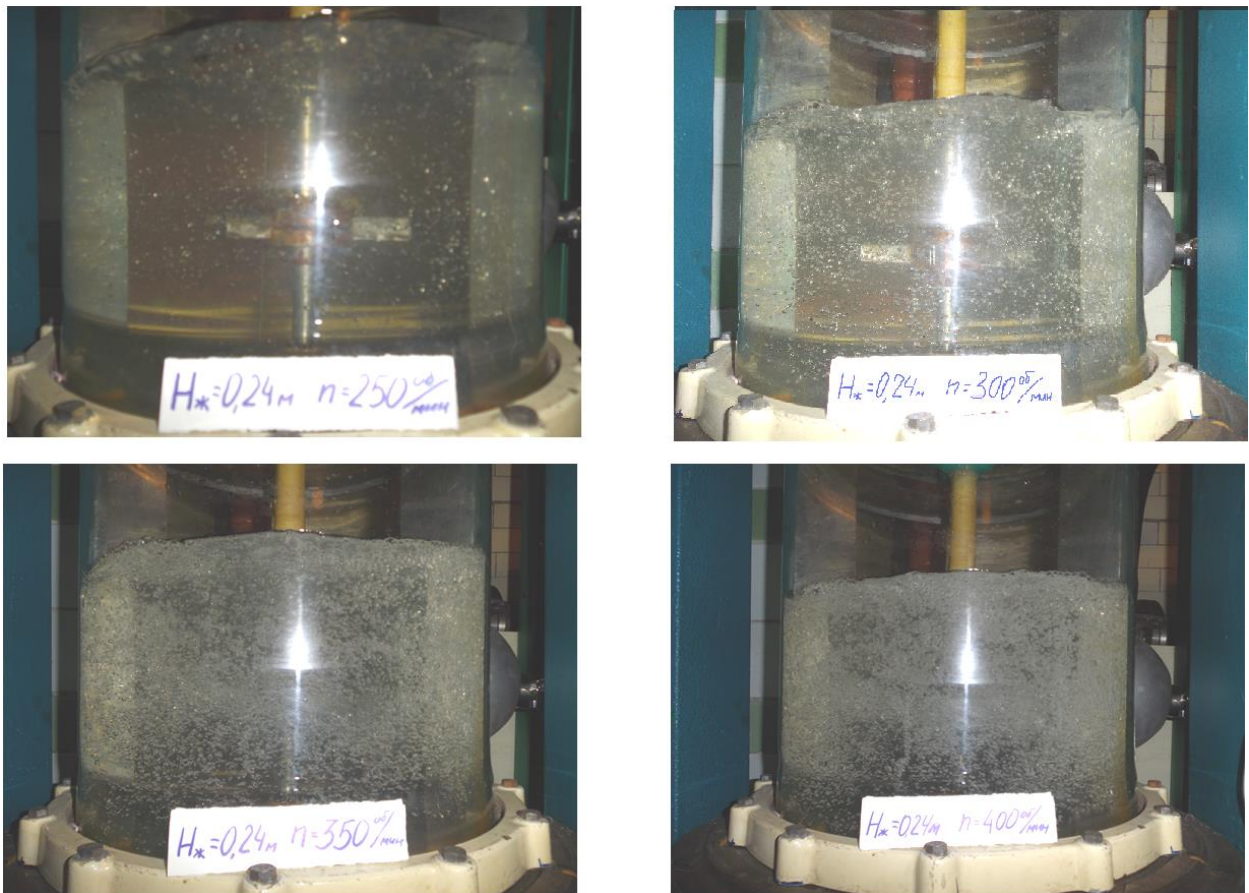


Рисунок 4.1 – Газовміст перемішуючого середовища в апараті з відбійними перегородками при різних частотах обертання самоусмоктуючої мішалки.

Для визначення розподілу локального газовмісту робочого середовища в апараті діаметром 0,36 м (рис. 2.2) на прозорій обичайці по її висоті встановлені пробовідбірники 10 з капілярними трубками діаметром 3 мм, які можуть вільно пересуватися від внутрішньої поверхні обичайки до центру апарату. До зовнішніх кінців трубок приєднані шприці 14, що розташовані вертикально. За допомогою шприців відбирали проби газорідинної суміші в кожній ділянці перетину апарату по 5-7 раз. Питомий газовміст у пробі визначався, як відношення висоти газового шару до висоти порожнини шприця по формулі (2.2). Середньозважене значення питомого газовмісту для кожної ділянки вертикального перетину апарату заносили на креслення (рис. 4.3, 4.4) і по отриманим даним визначали середній питомий газовміст робочого середовища.

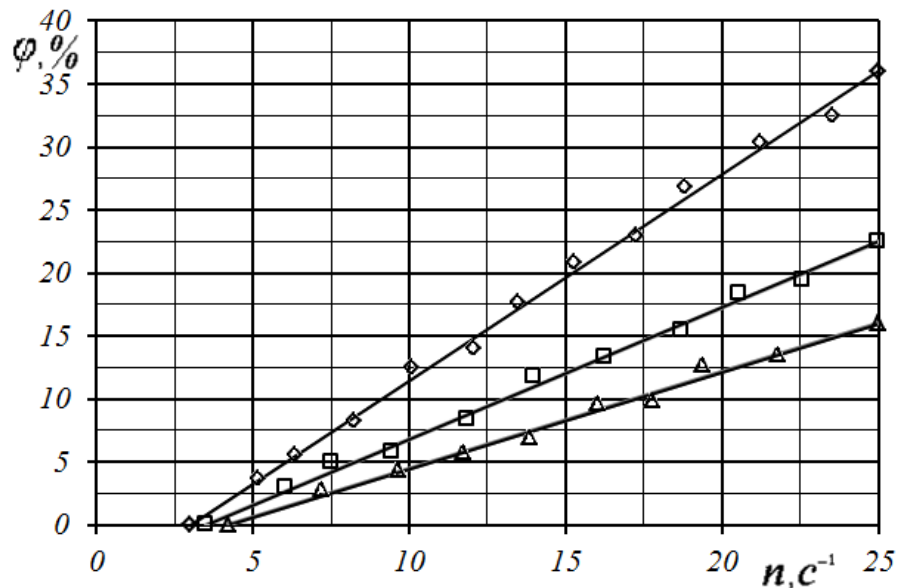


Рисунок 4.2 – Залежність середнього газовмісту $\bar{\varphi}$ в апараті з самоусмоктуючою мішалкою від числа обертів при різних глибинах занурення: \diamond - глибина занурення мішалки 120 мм; \square - глибина занурення мішалки 180 мм; Δ - глибина занурення мішалки 240 мм.

Самоусмоктуюча ежекційна мішалка в апараті об'ємного типу одночасно виконує роль диспергатора, що обертається, та перемішуючого пристрою за допомогою, якого проводиться рівномірний розподіл газових бульбашок в рідині. Газова фаза усмоктується мішалкою через порожнистий вал. Утворення газових бульбашок в перемішуючому об'ємі відбувається за рахунок дисипації енергії, яка розподіляється в радіальному потоці. Як видно з рисунків 4.3 і 4.4 розподіл питомого газовмісту робочого середовища у апараті з самоусмоктуючою мішалкою з циліндричними порожнистими лопатями є неоднорідним. Максимальний питомий газовміст спостерігається біля отвору лопаті мішалки.

Характер подальшої зміни цього показника свідчить, що газ швидко змішується з рідиною на невеликій відстані від отвору порожнистої лопаті мішалки і продовжує рухатися та змішуватися у напрямку, що відповідає результуючій складовій від радіального руху і спливання бульбашок газу. Біля

валу мішалки спостерігається перебіг рідини з низьким питомим газовмістом у напрямі до лопаті мішалки знизу і зверху.

Для самоусмоктуючих мішалок з циліндричними порожнистими лопатями на рівні нижче лопаті мішалки, в нашому випадку на глибині 0,03м, знаходиться рідина вже вільна від газу, що необхідно враховувати при визначенні середнього питомого газовмісту середовища в апараті. Тому з урахування цієї обставини середній питомий газовміст визначався обома використовуваними методами не для усього об'єму робочого середовища у апараті, а для тієї його частини, що містить газ

$$\bar{\varphi} = \frac{\Delta H}{H_1 + \Delta H} = \frac{\Delta H}{(h + b + 0,03) + \Delta H} , \quad (4.1)$$

де H_1 – висота шару робочого середовища, що містить газ від його нижньої межі до рівня рідини над лопатю нерухомої мішалки, м;

h – висота рівня рідини над лопатю нерухомої мішалки, м;

b – висота лопаті, м,

ΔH – різниця рівнів середовища до початку і після надходження газу, м,

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

- кільцевий об'єм, утворений лопатями мішалки. В цій зоні локальний газовміст φ_0 значно перевищує середній газовміст $\bar{\varphi}$ в апараті;

- зона розміщена в нижній частині апарату, тут спостерігається найнижчий газовміст;

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

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

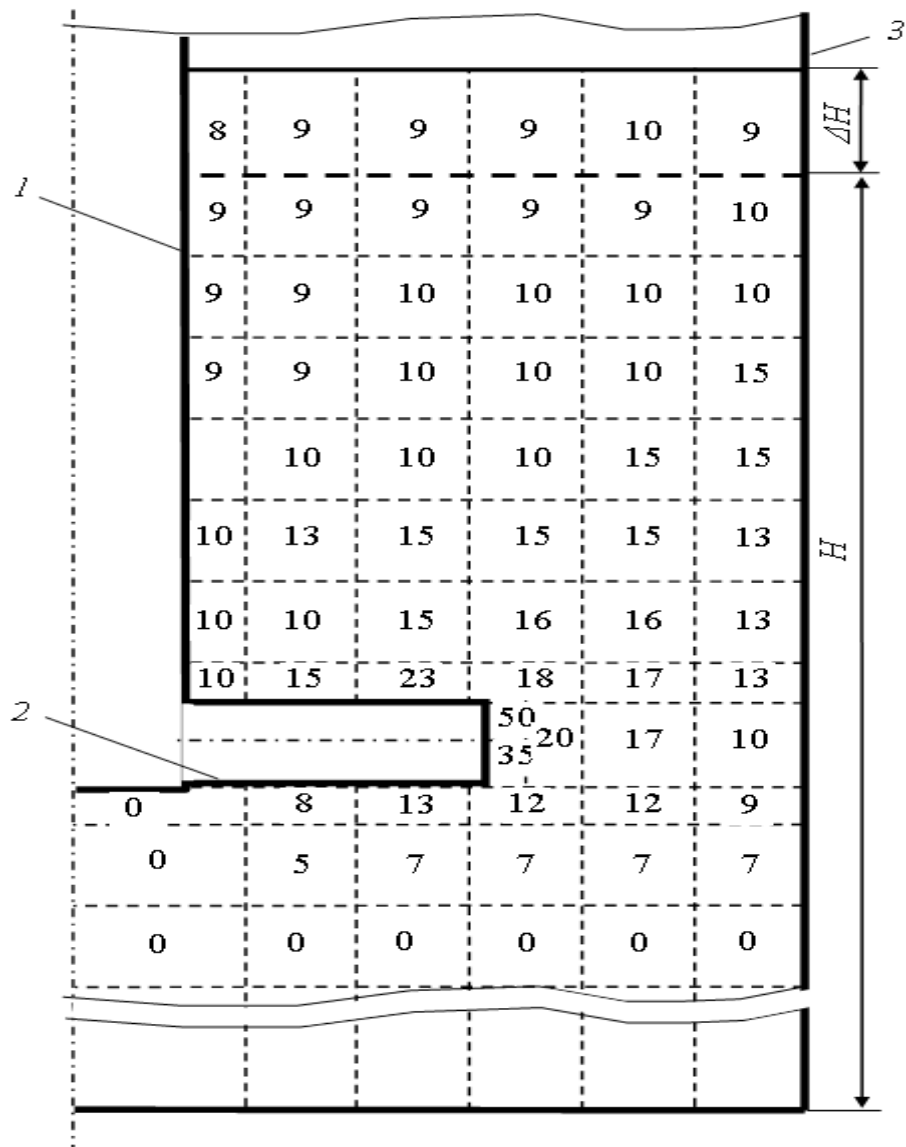


Рисунок 4.3 – Приклад обробки результатів вимірювання для визначення середнього питомого газовмісту робочого середовища: 1 – порожнистий вал; 2 – порожниста циліндрична лопать мішалки; 3 – обичайка апарату.

Дані експериментальних випробувань приведені на рисунку 4.3 для самоусмоктуючої мішалки з циліндричною порожнистою лопатю з внутрішнім діаметром отвору 0,006 м при частоті обертання мішалки $n = 10$ 1/с. Глибина занурення мішалки складала $h_{ГС} = 0,140$ м, а насосна продуктивність по газовій фазі $41,7 \cdot 10^{-5}$ м³/с, середній питомий газовміст перемішуючого середовища по ΔH дорівнює $0,164$ м³/м³, а по пробам локального - $0,1703$ м³/м³.

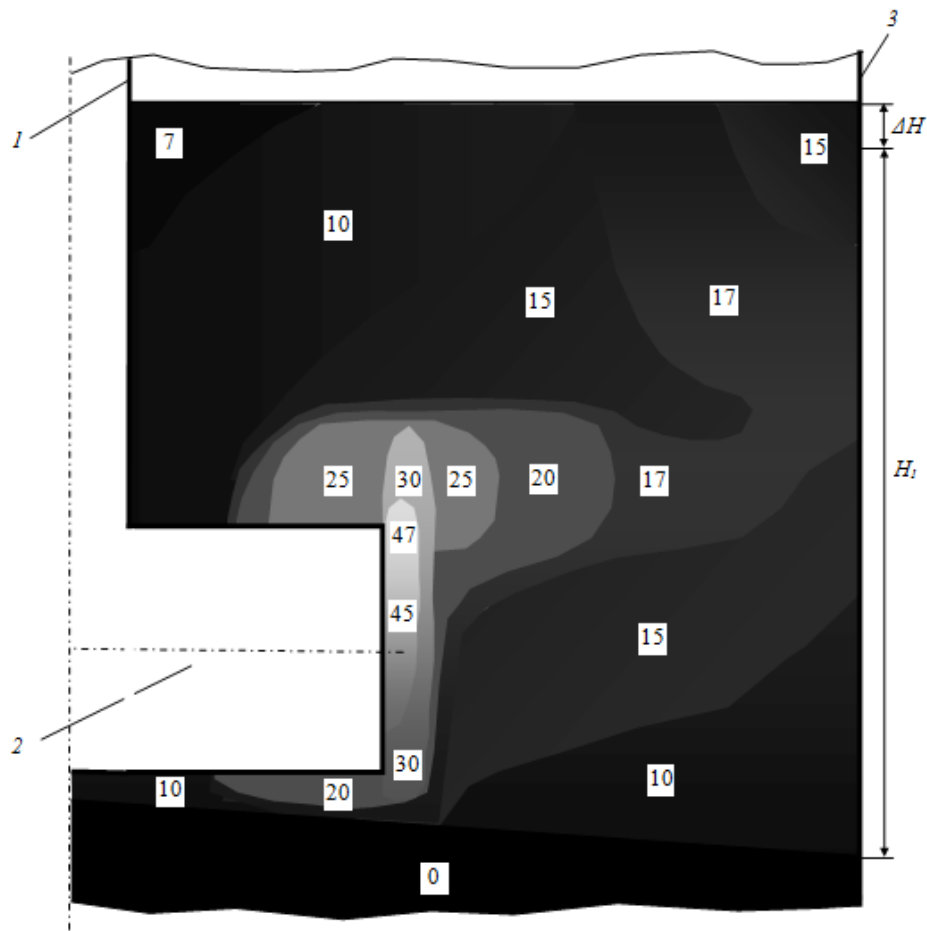


Рисунок 4.4 – Розподіл питомого газовмісту робочого середовища (у відсотках) у вертикальному перетині апарату: 1 – порожнистий вал; 2 – порожниста циліндрична лопать мішалки; 3 – обичайка апарату; діаметр отвору лопаті 0,035 м; частота обертання мішалки 12 1/с; насосна продуктивність мішалки $25 \cdot 10^{-5}$ м³/с; $h = 0,07$ м; середній питомий газовміст середовища $0,133$ м³/м³.

4.2. Розрахунок поверхні крапель та площі контакту фаз

При випробуваннях самоусмоктуючих мішалок з плоскими порожнистими лопатями з різним кутом нахилу до площі поверхні обертання мішалки такий поділ газомісту в перемішуємому об'ємі спостерігається тільки при частоті обертання мішалки, яка близька до початкової частоти обертання (рис. 3.19). Збільшення частоти обертання самоусмоктуючої мішалки приводить до осереднення значення середнього газомісту (рис. 4.1). Особливо це помітно при роботі самоусмоктуючих мішалок, що мають певний кут нахилу порожнистої лопаті по відношенню до площини обертання мішалки.

Об'єм газу у перемішуємому середовищі апарату V_{GA} складає

$$V_{GA} = \frac{\Delta H \pi D^2}{4}, \quad (4.2)$$

де D – діаметр апарату, м,
або

$$V_{GA} = \frac{\varphi_A H_1 \pi D^2}{4} = \varphi_A V_A, \quad (4.3)$$

де V_A – об'єм частини робочого середовища, що містить газ, м³.

У свою чергу об'єм газу у робочому середовищі апарату, що містить газ, визначається середнім терміном перебування газу в перемішуємому середовищі і насосною продуктивністю самоусмоктуючої мішалки

$$V_{GA} = \tau V \quad (4.4)$$

де V – насосна продуктивність мішалки, м³/с.

З рівнянь (4.3) і (4.4) виходить

$$\varphi_A = \tau \frac{V}{V_A} , \quad (4.5)$$

де τ – середній час перебування газу у частині робочого середовища, що містить газ, с.

При збільшенні газовмісту в середині перемішуємого середовища значення V_A збільшується внаслідок зростання висоти рівня ΔH в апараті, тому рівняння (4.5) описує криву, що ускладнює визначення величини τ . Враховуючи, що значення середнього питомого газовмісту у об'ємі апарату V_A і у об'ємі V_{A1} , які визначається висотою H_1 є практично однакові, тоді для визначення τ використовували наступне рівняння

$$\varphi_A = \tau \frac{V}{V_{A1}} . \quad (4.6)$$

Приклад визначення середнього терміну перебування газу у об'ємі апарату V_{A1} шляхом графічного рішення рівняння (4.6) з використанням експериментальних даних приведений на рисунку 4.5.

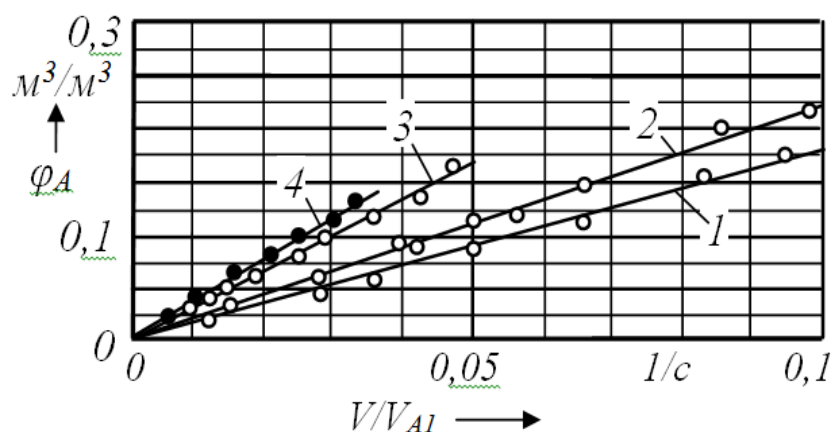


Рисунок 4.5 – Графічне рішення рівняння (4.5) з використанням експериментальних даних: H_1 , м: 1 – 0,05; 2 – 0,10; 3 – 0,20; 4 – 0,30; діаметр мішалки $d_M = 0,18$ м; діаметр отвору лопаті 0,006 м; частота обертання мішалки 0-16 1/с

Згідно з отриманими результатами середній термін перебування газу у частині робочого середовища, що містить газ, залежить від висоти середовища над циліндричною порожнистою лопатю мішалки і практично не залежить від інших факторів (рис. 4.6).

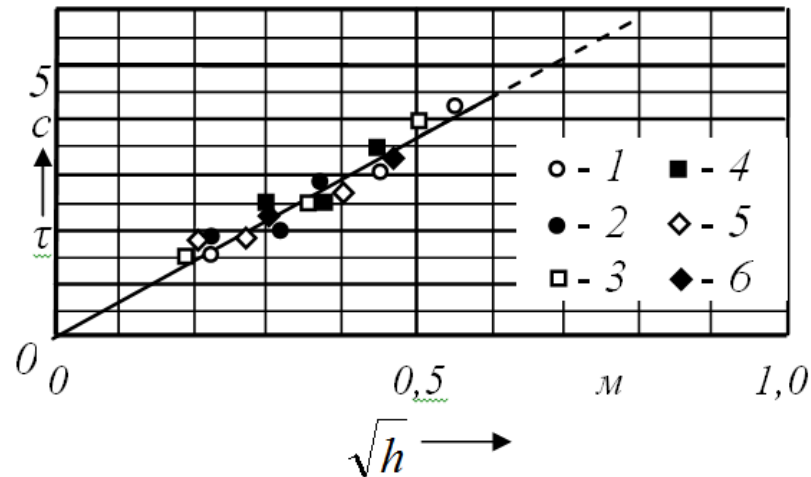


Рисунок 4.6 – Залежність середнього часу перебування газу у об'ємі V_{A1} від висоти робочого середовища над порожнистою лопатю мішалки h при частоті обертання мішалок 0-20 1/с: діаметр мішалки $d_M =$: 1 – 0,180; 2 – 0,100; 3 і 4 – 0,128; 5 – 0,065; 6 – 135м; діаметр отвору лопаті мішалок: 1-5 $d_O = 0,006$ м; форма лопаті: 1 і 2 – циліндрична; 3 – прямокутна; 4 – циліндрична з горизонтальними пластинами; 5 – циліндрична з вертикальними ребрами; 6 – щілинна порожниста 0,02x0,004 м.

Графічна інтерпретація отриманих в період випробувань даних відповідає лінійній залежності типу $\tau = f(\sqrt{h})$ (рис. 4.6), за результатами випробувань середній час перебування газу у частині робочого середовища апарату відповідає

$$\tau = 7,4\sqrt{h} . \quad (4.7)$$

По отриманим даним у розглянутих умовах швидкість газу підвищується при зростанні висоти шару робочого середовища з 0,03 до 0,08 м/с, поступово наближаючись до швидкості вільного спливання бульбашок повітря у воді. Така зміна швидкості відбувається в результаті зменшення швидкості потоку, що утворюється мішалкою, при зростанні висоти шару робочого середовища.

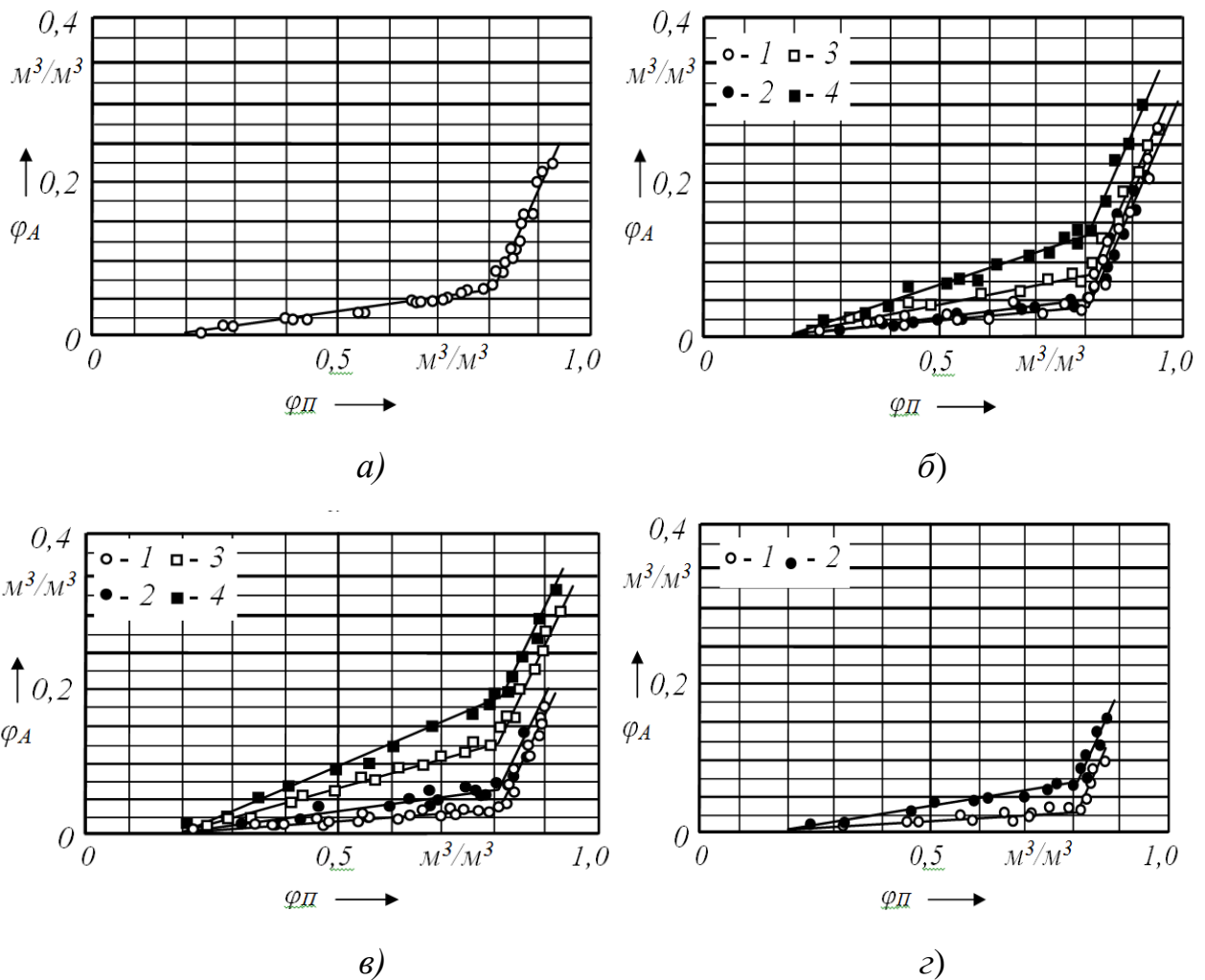


Рисунок 4.7 – Залежність середнього питомого газовмісту у об'ємі V_A робочого середовища від потенційного газовмісту газорідної суміші на радіусі мішалки: а) - діаметр мішалки $d_M = 0,180$ м; діаметр отвору циліндричної лопаті $d_O = 0,006$; число лопатей $z = 2$; б) - 1, 2 і 3 – $d_M = 0,128$ м, $d_O = 0,006$ м; 1 – циліндрична лопать; 2 – прямокутна лобова частина лопаті; 3 – циліндрична лопать з горизонтальними пластинами $0,007$ м; 4 - $d = 0,135$ м; щілинна порожниста лопать $0,02 \times 0,004$ м; в) - 1-4 - $d_M = 0,100$ м; циліндрична лопать; 1 і 2 - $d_O = 0,006$ м; 3 - $d_O = 0,035$ м; 4 - $d_O = 0,055$ м; 1,3 і 4 - $z = 2$, 2 – $z = 4$; з) - 1 і 2 –

$d_M = 0,065$ м; $d_O = 0,006$; 1 – циліндрична лопать; 2 – з вертикальними ребрами 0,009 м

Розрахунок середнього часу перебування газу у об'ємі V_A проводиться методом послідовного наближення до практично постійного значення ΔH у послідовності:

$$\Delta H = \frac{4V\tau}{\pi D^2} \quad (4.8)$$

по рівнянню (4.8) визначається середній час перебування газу у об'ємі V_{A1} , по рівнянню визначається збільшення висоти h , потім по рівнянню (4.7) визначається середній час перебування газу з урахуванням збільшення висоти h на $+\Delta H$.

Аналіз експериментальних даних, отриманих при зміні геометричних параметрів мішалки і апарату показує, що середній газовміст перемішуючого середовища залежить від числа обертів і діаметру мішалки, ширини лопаті та діаметру апарату і глибини занурення мішалки, які пов'язані між собою у вигляді емпіричної залежності

$$\bar{\varphi} = 0,21(n - n_0)^{1,8} \cdot d_M^{1,5} \left(\frac{b}{d_M} \right)^{0,1} \cdot \left(\frac{H}{D_A} \right)^{0,6} \quad (4.9)$$

Відхилення розрахункових даних середнього газовмісту в перемішуючому середовищі від експериментальних не перевищує 11%.

В той же час є можливість визначення середнього питомого газовмісту в об'ємі робочого середовища, що містить газ, без попереднього розрахунку насосної продуктивності відцентрово-ежекційних мішалок.

На рисунку 4.7 приведені залежності цієї характеристики від потенційного питомого газовмісту газорідної суміші на радіусі мішалки, який можна розрахувати по рівнянню

$$\varphi_A = 1 - \frac{n_0^2}{n^2} \quad (4.10)$$

де n_0 - частота обертання самоусмоктуючої мішалки, при якій газ починає виходити з порожнини лопаті, 1/с; n – поточна частота обертання мішалки, 1/с.

Потенційний газовміст характеризує співвідношення робочого і загального перепаду тиску на радіусі мішалки

$$\varphi_A = \frac{n^2 - n_0^2}{n^2} = \frac{\Delta P_P}{\Delta P}, \quad (4.11)$$

тобто одночасно характеризує енергетичні умови перемішування і руху газу і рідини, співвідношення потоків газу і робочого середовища і вплив висоти шару робочого середовища над лопатями мішалки. Таким чином цей показник у даному випадку виступає у якості критерію подібності.

При $\varphi_0 = 0,81$ відбувається перехід руху газу з отвору лопаті мішалки з режиму витиснення у струменевий режим. Для всіх розглянутих умов спостерігається лінійна залежність питомого газовмісту у об'ємі V_A робочого середовища при $\varphi_0 = 0,81$ від відповідної еквівалентної площі перетину газового потоку у отворі лопаті мішалки (рис. 4.8).

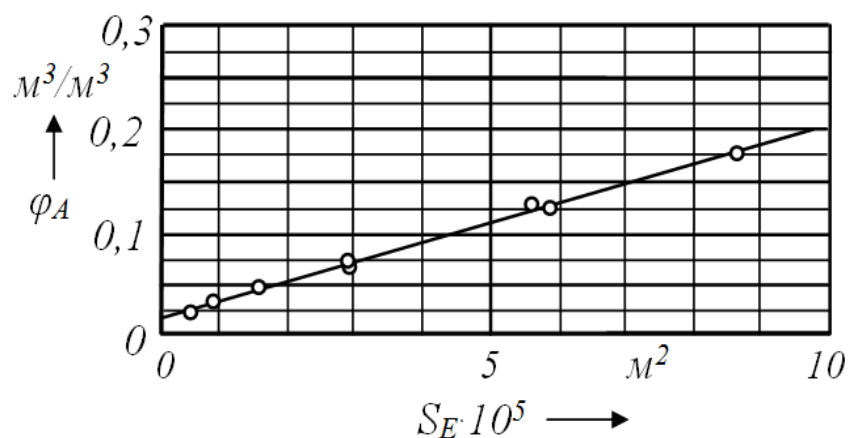


Рисунок 4.8 – Залежність середнього питомого газовмісту у об'ємі V_A робочого середовища при $\varphi_0 = 0,81$ від еквівалентної площі перетину газового потоку у отворі лопаті мішалки.

Отримані результати приводять до рівнянь

$$\varphi_A = z(1,67 \cdot 10^3 S_E + 0,008)(\varphi_0 - 0,2) \quad \text{при} \quad \varphi_0 \leq 0,81 \quad (4.12)$$

$$\varphi_A = 1,3(\varphi_0 - 0,81) + 1,5z(1,67 \cdot 10^3 S_E + 0,008) \quad \text{при} \quad \varphi_0 \geq 0,81 \quad (4.13)$$

де z – число лопатей мішалки;

S_E – еквівалентна площа перетину газового потоку у отворі циліндричної лопаті мішалки (3.49), для щілинних лопатей

$$S_E = Kd^2b \quad (4.14)$$

де: d – діаметр мішалки;

b – висота отвору порожнистої щілинної лопаті, м (для круглих отворів – діаметр отвору d_0);

K – коефіцієнт (для циліндричних лопатей $K = 0,155$, для лопатей з прямокутною лобовою частиною $K = 0,225$, для циліндричних лопатей з вертикальними ребрами або з горизонтальними пластинами $K = 1,06$).

Приклади порівняння експериментальних і розрахованих двома розробленими методами значень середнього питомого газозмісту у об'ємі робочого середовища, що містить газ, приведені у таблиці А2.

Експериментальні вимірювання (рис. 4.9) показали, що у розглянутих умовах газ знаходиться у робочому середовищі у вигляді бульбашок практично однакового розміру $d_B = 0,003$ м, що дозволяє знайти площу контакту фаз у апараті.

Враховуючі, що об'єм бульбашки складає

$$V_B = 0,167\pi d_B^3, \quad (4.15)$$

а площа її поверхні

$$S_B = \pi d_B^2. \quad (4.16)$$

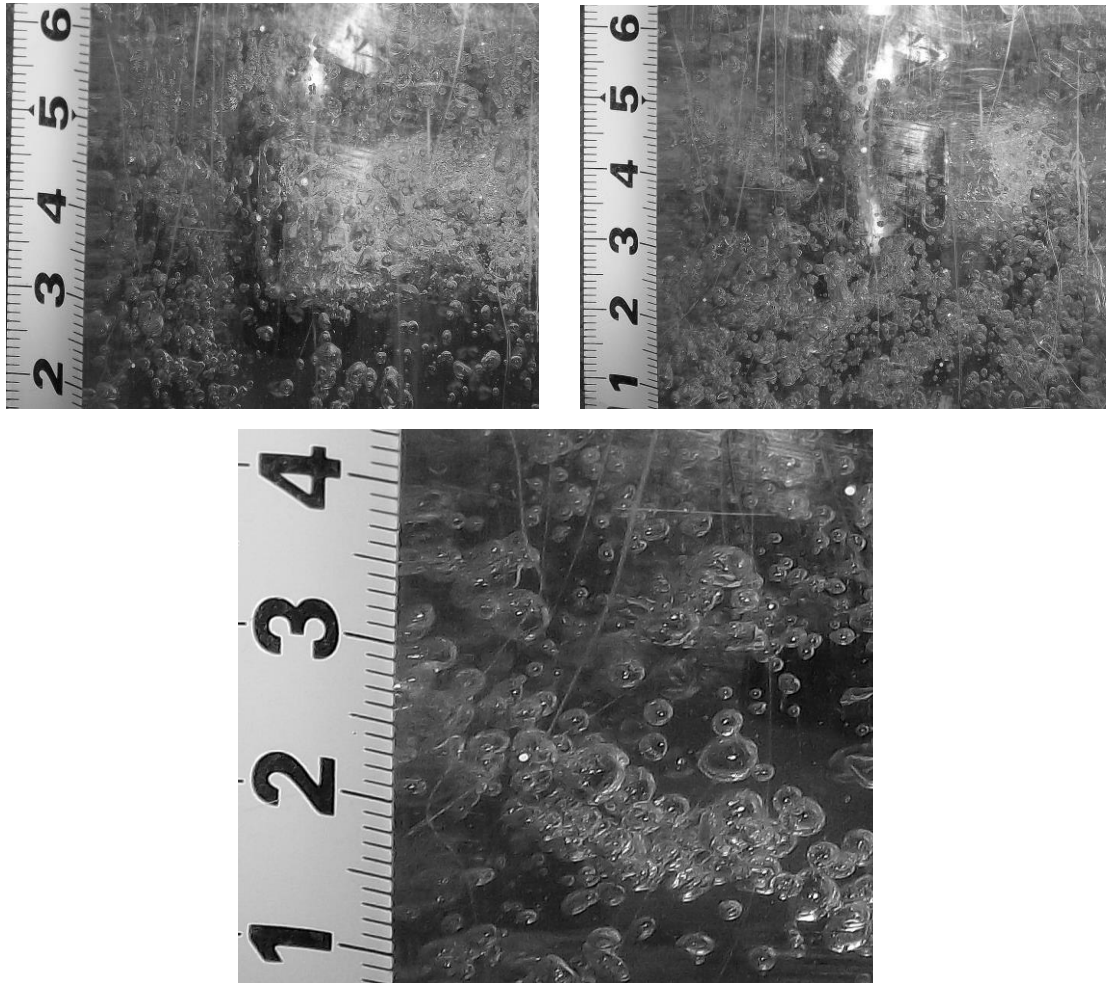


Рисунок 4.9 – Фото газорідинної суміші (визначення діаметру бульбашки).

Тоді площа контакту фаз у апараті з самоусмоктуючими мішалками складає

$$F = \frac{V_{ГА}}{0,167\pi d_B^3} \pi d_B^2 = \frac{V_{ГА}}{0,167d_B} = 2,0 \cdot 10^3 V_{ГА}. \quad (4.17)$$

В результаті проведених досліджень розроблені принципові положення методу розрахунку середнього питомого газовмісту частини об'єму робочого середовища, що містить газ, і площі контакту фаз у газорідинних апаратах об'ємного типу з самоусмоктуючими ежекційними мішалками.

4.3. Потужність на перемішування самоусмоктуючими ежекційними мішалками

З літературного огляду витікає, що потужність на перемішування газорідинної суміші суттєво залежить від середнього газомісту і є визначальним параметром при розрахунках апаратів. Потужність, споживана при перемішуванні, є одним з параметрів, що характеризує гідродинаміку процесу. Приведення рідини у вимушений рух вимагає безперервного підведення енергії. Зв'язок між енергією, що витрачається в одиницю часу (потужністю) на перемішування і умовами перемішування прийнято виражати у формі залежності [3]

$$N = k_N \rho n^3 d_M^5 . \quad (4.18)$$

В той же час вивчення впливу конструктивних особливостей перемішуючого пристрою і апарату на потужність в залежності від величини опору, яку отримує мішалка під час обертання є надзвичайно актуальним. Згідно закону зберігання моменту, крутний момент, який додається мішалкою, що обертається, до рідини в апараті, при сталому режимі повинен урівноважуватися рівним йому по величині та зворотнім по знаку моментом опору, який виникає під час закручування пружини. Для цього використовувався пристрій з пружиною (рис. 2.3). Тарування плоскої пружини динамометра полягає в урівноваженні моменту закручування пружини від дії певної ваги. При застопорованому валу мішалки 5 і вільному обертанні втулки 8 на валу електродвигуна 1 (рис. 2.2), момент, що закручує спіральну пружину дорівнює

$$M_{кр} = F \cdot R, н \cdot м, \quad (4.19)$$

де: F – зусилля, що діє на трос;

R – плече моменту по внутрішньому діаметру проточки.

При цьому кожному значенню зусилля F відповідає певне значення моменту, що крутить $M_{кр}$, який буде визначати величину кута закручування пружини α . Отже, кут закручування пружини α , який контролюється стрілкою-індикатором, визначається залежністю

$$M_{кр} = f(\alpha) . \quad (4.20)$$

В ході проведення експериментальних випробувань самоусмоктуючої мішалки за допомогою оптичного засобу визначається частота обертів мішалки та кут відхилення стрілки-індикатора і по тарувальному графіку (рис. 2.4) визначали величину моменту, що крутить. Далі потужність, що витрачається на перемішування, визначається за формулою [3].

$$N = M_{кр} 2\pi n , \text{ Вт}, \quad (4.21)$$

де $M_{кр}$ – момент обертання, $n \cdot м$.

Для визначення потужності на перемішування в апаратах об'ємного типу діаметром 0,25-0,4м з трьома відбійними перегородками шириною 0,1 діаметра апарату проводилися випробування самоусмоктуючих ежекційних мішалок діаметром 0,08-0,13м з вертикальними плоскими порожнистими лопатями шириною $b=d/5$. Також в експериментальних випробуваннях використовувалися самоусмоктуючі мішалки, що мають кут нахилу порожнистих лопатей до площини обертання мішалки 60 і 45^0 .

У виробництві поверхнево-активних речовин використовуються реакції сульфування вуглеводнів газовим триоксидом сірки в суміші з повітрям, які відбуваються зі значним виділенням реакції. Якість продукту реакції залежить від умов проведення реакцій сульфування, найбільш оптимальний є режим, який проводиться в інтервалі температур 45-55 градусів. Внаслідок того, що реакція сульфування є швидкою реакцією першого порядку температуру процесу необхідно контролювати безпосередньо в зоні контакту фаз. В об'ємному

сульфураторі з самоусмоктуючою мішалкою такий режим можна проводити шляхом впровадження теплообмінника у вигляді статора, який знаходиться в зоні обертання мішалки. Тому під час випробувань назріла необхідність вивчення впливу статора на потужність самоусмоктуючих мішалок, тобто після проведення вищеописаної серії випробувань, в апараті (рис. 3.29) провели заміну трьох відбійних перегородок на статор (рис. 3.30), розміщений безпосередньо в зоні обертання самоусмоктуючої мішалки. Далі в період випробувань проводилася зміна в статорі кількості вертикальних лопаток від 4 до 16. Спочатку випробування самоусмоктуючих мішалок проводили з закритим порожнистим валом гумовою пробкою, за допомогою якої позбавляли самоусмоктуючі ежекційні мішалки властивості усмоктування повітря, тобто мішалка перемішувала однорідну рідину.

Під час обертання мішалки опір рідини, що перемішується, сприймає лобова поверхня лопаті, величина якого передається на вал і врівноважується закручуванням плоскої пружини на певний кут. Спочатку встановлювали певну частоти обертання самоусмоктуючої ежекційної мішалки, яку відстежували за допомогою електронного строботометра, потім 5-7 раз визначали кут відносного повороту верхньої напівмуфти пристрою для вимірювання потужності (рис. 2.3). Далі по середньозваженому значенні кута повороту за допомогою тарувального графіка (рис. 2.4) визначали величину крутного моменту та по формулі (4.21) вичислили потужність, що витрачається на перемішування однорідної рідини або газорідної суміші.

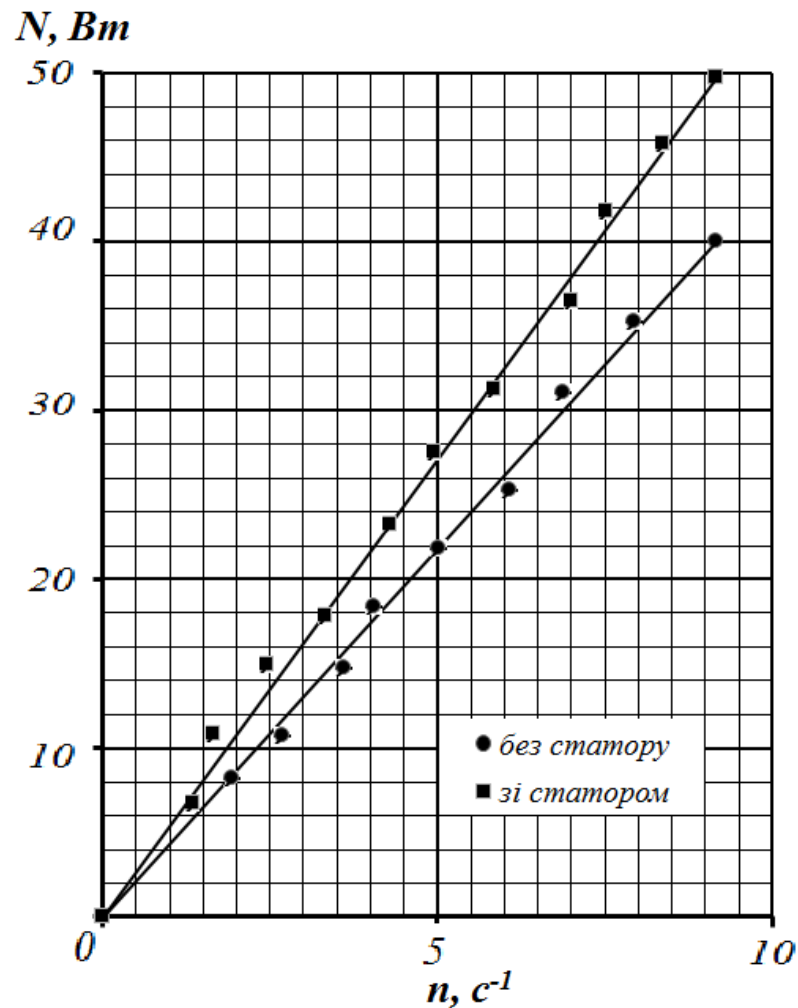


Рисунок 4.10 - Залежність потужності самоусмоктуючої мішалки від частоти обертання в об'ємному апараті при наявності статора та без нього.

Аналіз отриманих даних свідчить про те, що на потужність самоусмоктуючої мішалки, крім діаметру, частоти обертання і глибини занурення мішалки, ширини і кута нахилу лопаті, також впливають додаткові пристрої в об'ємі апарату, вчасності – статор та кількість вертикальних лопаток. Установка статора в апараті об'ємного типу приводить до збільшення потужності на перемішування в порівнянні з даними отриманими в цьому ж апараті з трьома відбійними перегородками (рис. 4.10).

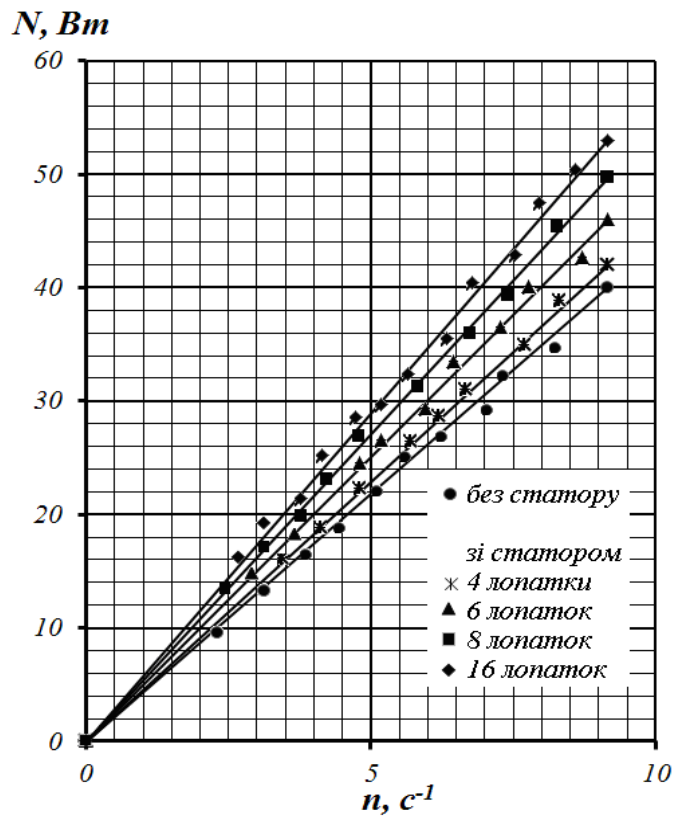


Рисунок 4.11 – Залежність потужності самоусмоктуючої мішалки від числа обертів в апараті з трьома відбійними перегородками і статором з різною кількістю лопаток.

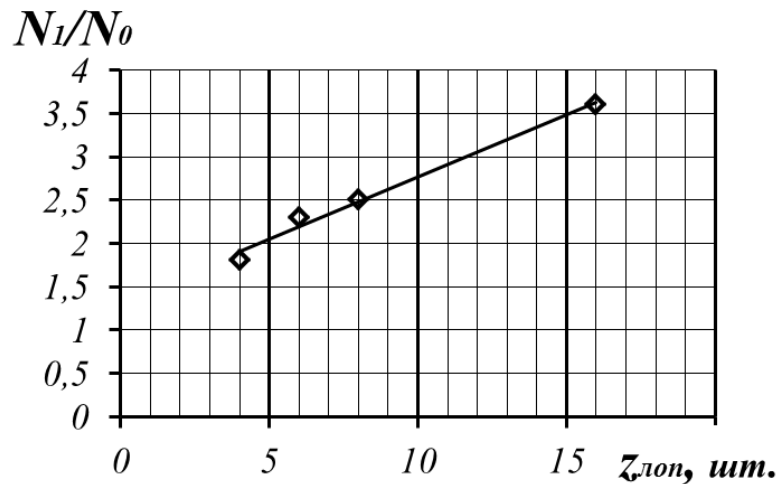


Рисунок 4.12 – Залежність відношення потужностей на перемішування однофазного середовища в апараті об'ємного типу зі статором та без статора від кількості лопаток статора

вертикальних лопаток статора представлено у вигляді графічної залежності (рис. 4.12), математична обробка її дала можливість отримати емпіричне рівняння залежності відношення потужностей від кількості вертикальних лопаток в статорі

$$\frac{N_1}{N_0} = 1,33 + 0,09z_{лон} \quad (4.22)$$

де, N_1 - потужність при наявності статора;

N_0 - потужність без статора;

$z_{лон}$ – число вертикальних лопаток статора.

Експериментальні випробування самоусмоктуючих ежекційних мішалок з діапазоном параметрів відповідно таблиці 2.1 в апараті з трьома відбійними перегородками при перемішуванні однорідного середовища приводить до збільшення потужності при збільшенні діаметру мішалки та ширини лопаті та зменшується при зменшенні кута нахилу лопаті по відношенні до площі обертання мішалки. Результати випробувань були оброблені у вигляді рівняння з визначення потужності на перемішування однорідної рідини в апараті об'ємного типу з трьома відбійними перегородками

$$N_p = 5,36\zeta \cdot \rho \cdot n^3 d_M^5 \cdot \sin \alpha^{0,32} \cdot \left(\frac{d_M}{D}\right)^{0,007} \cdot \left(\frac{b}{d_M}\right)^{-0,03} \quad (4.23)$$

та апараті зі статором

$$N_p = 6,12\zeta\rho \cdot n^3 d_M^5 \cdot \sin \alpha^{0,32} \cdot \left(\frac{d_M}{D}\right)^{0,02} \cdot \left(\frac{b}{d_M}\right)^{-0,05} \quad (4.24)$$

Далі в апараті (рис. 2.2а) з порожнистого валу 5 виймали гумову пробку, закріплювали досліджуєму самоусмоктуючу ежекційну мішалку, заповнювали

об'єм апарату на певну висоту водою, яка відповідала висоті рідини в попередніх випробуваннях, вмикали електродвигун і підвищували частоту обертання мішалки.

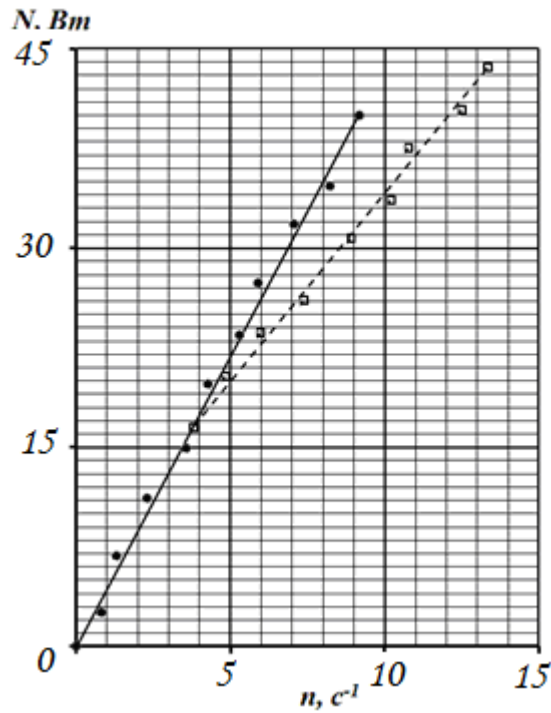


Рисунок 4.13 – Залежність потужності самоусмоктуючих мішалок від частоти обертання та наявності газовмісту в перемішуємому об'ємі апарату.

Вище приведені експерименти були повторені при перемішуванні газорідинної суміші, яка утворюється за допомогою усмоктування газової фази мішалками і послідууючого диспергування в перемішуємий об'єм. Отримані результати зведені в таблиці та представлені у вигляді графічних залежностей.

Результати експериментальних випробувань самоусмоктуючої ежекційної мішалки діаметром 0,13 м при глибині занурення 0,18 м представлені в вигляді суцільної лінії графічної залежності (рис. 4.13). Подальше підвищення частоти обертання мішалки приводить до зростання об'єму усмоктуємого повітря та інтенсифікації перемішуємого середовища в апараті. Інтенсивне перемішування бульбашок повітря з робочою рідиною в апараті приводить до підвищення величини середнього газовмісту і, як наслідок, зниження щільності перемішуємого середовища, що приводить до зменшення витрат потужності на

перемішування в порівнянні з потужністю витраченою для перемішування однорідної рідини. Як видно з приведеного графіку (рис. 4.13) потужність самоусмоктуючої мішалки має лінійну залежність від частоти обертання, як при перемішуванні однорідної фази (суцільна лінія) так і при перемішуванні двофазного середовища (пунктирна лінія). Точка сполучення цих прямих відповідає початковій частоті обертання самоусмоктуючої ежекційної мішалки n_0 . Отримані дані випробувань самоусмоктуючих ежекційних мішалок були опрацьовані у вигляді рівнянь для визначення потужності на перемішування газорідинної суміші в апараті об'ємного типу з трьома перегородками

$$N_{Г-Р} = 4,4 \cdot \zeta \cdot \rho \cdot n^3 d_M^5 \cdot \sin \alpha^{0,3} \cdot \varphi \cdot \left(\frac{d_M}{D} \right)^{0,01} \cdot \left(\frac{b}{d_M} \right)^{-0,03}, \quad (4.25)$$

та статором

$$N_{Г-Р} = 5,02 \cdot \zeta \cdot \rho \cdot n^3 d_M^5 \cdot \sin \alpha^{0,3} \cdot \varphi \cdot \left(\frac{d_M}{D} \right)^{0,01} \cdot \left(\frac{b}{d_M} \right)^{-0,03} \quad (4.26)$$

Рівняння справедливі для самоусмоктуючих ежекційних мішалок з прямими порожнистими лопатями, відхилення розрахованих даних по рівняннях 4.23-4.26 від експериментальних не перевищує 12%

Результати експериментальних випробувань показали, що потужність на перемішування газорідинної суміші самоусмоктуючими ежекційними мішалками зменшується в залежності від кількості усмоктуємого газу, який в певний момент знаходиться в перемішуємому середовищі тобто від середнього газовмісту, що підтверджується загальноприйнятим фактором [3]. Для оцінки потужності перемішування газорідинної суміші самоусмоктуючими ежекційними мішалками в апаратах об'ємного типу з трьома відбійними

перегородками і в апаратах зі статором представлена графічна інтерпретація отриманих даних відношення $\frac{N_{Г-Р}}{N_P}$ від критерію витрати газу $\frac{V_{Г}}{n \cdot d_M^3}$ (рис. 4.14).

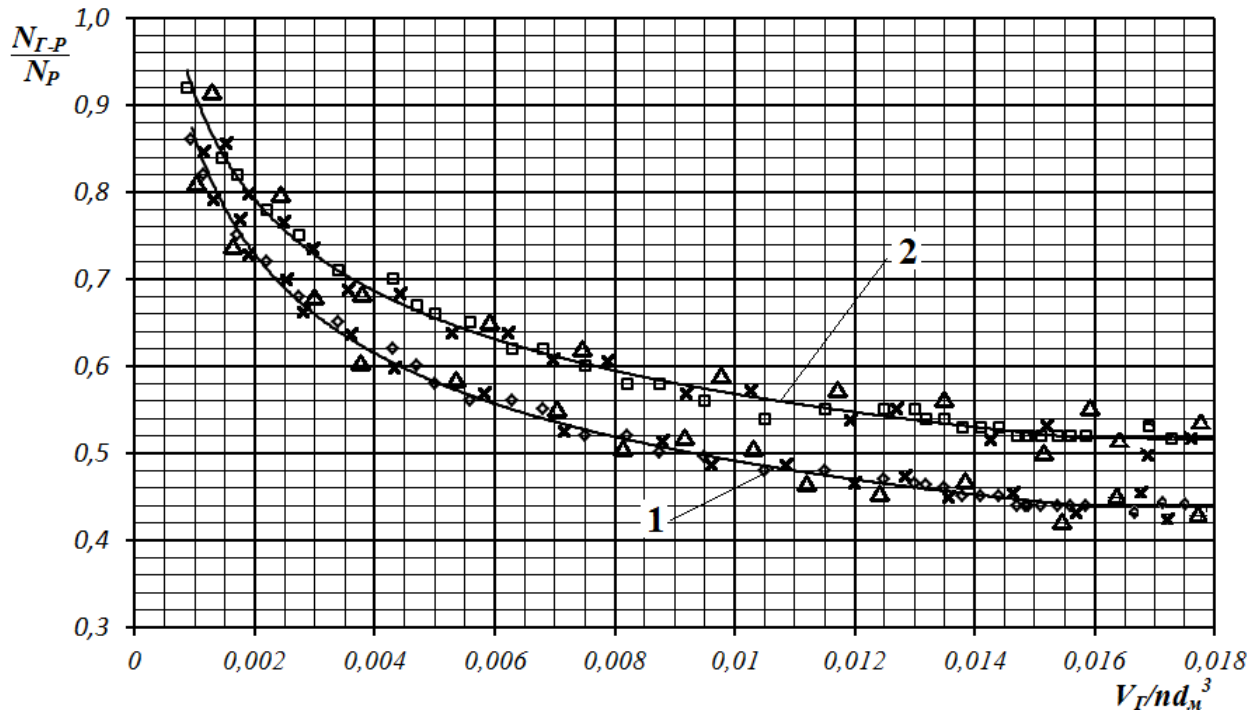


Рисунок 4.14 – Залежність $\frac{N_{Г-Р}}{N_P}$ від насосної продуктивності $\frac{V_{Г}}{n \cdot d_M^3}$

самоусмоктуючих мішалок: 1 – апарат з відбійними перегородками; 2 – апарат зі статором.

Результати експериментальних випробувань самоусмоктуючих ежекційних мішалок з різними порожнистими лопатями (рис. 4.14) в апаратах об'ємного типу з трьома відбійними перегородками та апаратах зі статором показують, що відношення потужностей $\frac{N_{Г-Р}}{N_P}$ із збільшенням витрати насосної продуктивності по газу в режимі самоусмоктування, знижується до певного постійного значення, яке відповідає для даної системи (самоусмоктуюча мішалка – апарат об'ємного типу) залежить від особливостей конструкції апарату. Для апарату об'ємного типу з відбійними перегородками ця величина близька до 0,44, а для апаратів зі статором – 0,52. Характер такої залежності

пояснюється тим, що при поступовому збільшенні частоти обертання самоусмоктуючої ежекційної мішалки відбувається зростання продуктивності по газовій фазі за рахунок розрідження, що виникає при обтіканні перемішуємою рідиною або газорідинною сумішшю порожнистої лопаті. Усмоктане повітря диспергується у вигляді бульбашок в перемішувемій рідині, внаслідок чого знижується її щільність і, відповідно, потужність на перемішування. Збільшення газовмісту в зоні обертання лопаті мішалки приводить до стабілізації різниці тиску в середині мішалки, який впливає на продуктивність самоусмоктуючих мішалок по газовій фазі.

Обробка експериментальних даних для самоусмоктуючих ежекційних мішалок з плоскими порожнистими лопатями від об'ємної продуктивності по газу в режимі самоусмоктування дозволила вивести залежність відношення витрат потужності $\frac{N_{Г-Р}}{N_P}$ від насосного ефекту $\frac{V_G}{nd_M^3}$ для апарату об'ємного типу з трьома вертикальними відбійними перегородками

$$\frac{N_{Г-Р}}{N_P} = 0,32 \cdot \left(\frac{V_G}{nd_M^3} \right)^{-0,08} \quad (4.27)$$

і для апарату з статором

$$\frac{N_{Г-Р}}{N_P} = 0,42 \cdot \left(\frac{V_G}{nd_M^3} \right)^{-0,08} \quad (4.28)$$

Аналіз проведених випробувань в апараті з відбійними перегородками і в апараті зі статором показав, що робота самоусмоктуючих ежекційних мішалок в останньому менш ефективна, в той же час вона може мати перспективу при проведенні газорідинних екзотермічних реакцій в режимі витіснення з послідовним інтенсивним тепловідведенням на теплообмінній поверхні статорних лопаток та перемішуванням з основною реакційною масою, цим

самим проводити швидкі екзотермічні реакції в лагідному температурному режимі, який дає можливість підвищити якість вихідного продукту. Проведені експериментальні випробування на стадіях абсорбції аміаку та виробництві рідких азотних добрив і поверхнево-активних речовин для технічних масел показали певну перевагу запропонованих самоусмоктуючих ежекційних мішалок в сульфураторах об'ємного типу, підтверджено актами проведення промислових випробувань та можливого впровадження в хімічній та нафтопереробній галузі (додаток Б). Отримані імперичні рівняння з потужності самоусмоктуючих мішалок можуть бути корисні для розрахунків реакторів, які рекомендуються для проведення реакцій сульфування або хлорування вуглеводнів газоподібними реагентами.

4.4 Висновки до четвертого розділу

В результаті проведених експериментальних випробувань самоусмоктуючих ежекційних мішалок з різними формами порожнистих лопатей в апаратах об'ємного типу вивчено вплив середнього газовмісту від особливостей конструкції мішалки та його взаємовідносини з локальним газовмістом, розглянута структура газорідинної суміші відносно вертикального перетину апарату:

- отримано залежності середнього питомого газовмісту в об'ємі робочого середовища апарату від потенціального газовмісту газорідинної суміші на радіусі мішалки;

- експериментально підтверджено, що в розглянутих умовах при диспергуванні газової фази в перемішуєме середовище, газ знаходиться у робочому середовищі у вигляді бульбашок практично однакового розміру, який дорівнює діаметру бульбашок в газорідинних апаратах з відкритими турбінними мішалками;

- за результатами експериментальних випробувань отримано емпіричне рівняння для визначення середнього газовмісту у об'ємі робочого середовища в апараті об'ємного типу з самоусмоктуючими ежекційними мішалками.

В результаті проведення експериментальних досліджень з визначення витрат потужності самоусмоктуючих ежекційних мішалок з плоскими порожнистими лопатями в апаратах об'ємного типу з трьома відбійними перегородками і статором при перемішуванні рідини або газорідинної суміші:

- визначено залежність потужності, що витрачається на перемішування однорідної чистої рідини та двофазної газорідинної системи, від частоти обертання самоусмоктуючої ежекційної мішалки в апараті об'ємного типу: потужність напряму залежить від середнього газовмісту в апараті. Значення величини потужності для перемішування чистої рідини в подальшому використовується у розрахунку апаратів об'ємного типу з самоусмоктуючими перемішуючими пристроями;

- отримані емпіричні рівняння для розрахунку потужності самоусмоктуючих ежекційних мішалок при роботі по газовій фазі та рідині;

- визначена графічна залежність відношення потужностей, що витрачається на перемішування рідини та газорідинної суміші від критерію витрати газової фази. Приведена залежність показує, що величина відношення потужності в режимі само усмоктування знижується до певного постійного значення, що залежить від конструктивних особливостей апарату. Поведінка кривої вказує на початок постійного значення витрати по газовому реагенту;

- отримані емпіричні залежності для визначення відношення потужностей, що витрачається на перемішування рідини та газорідинної суміші від критерію витрати газової фази в режимі усмоктування для апаратів об'ємного типу з відбійними перегородками і для апаратів зі статором.

Основні результати розділу опубліковані: [138, 139, 142, 148, 149, 153].

РОЗДІЛ 5

РОЗРОБКА МЕТОДИКИ РОЗРАХУНКУ АПАРАТІВ З САМОУСМОКТУЮЧИМИ ПЕРЕМІШУЮЧИМИ ПРИСТРОЯМИ

5.1. Алгоритм інженерного розрахунку апаратів з самоусмоктуючими перемішуючими пристроями

Для створення реактора оптимальної конструкції необхідні вихідні дані. По-перше потрібно знати кінетику цільового продукту та побічні процеси, що можуть бути причиною нераціонального використання сировини, а іноді утворенню непотрібних та шкідливих речовин. Далі потрібні дані про кількість теплоти, що поглинається або виділяється під час реакції. Ефективність змішування залежить від в'язкості компонентів, швидкості потоків, геометрії реактора та різноманіття пристроїв для введення реагентів.

Апарати з перемішуючими пристроями є найбільш розповсюдженим видом обладнання, що використовується в хімічній промисловості для проведення різноманітних фізичних та хімічних процесів. Вибір апаратів з перемішуючими пристроями та конструктивні особливості цих апаратів визначаються характеристикою процесу, властивостями перемішуючого середовища. Найбільш популярним видом апаратів є вертикальні циліндричні апарати.

Об'єм реактору періодичної дії буде визначатися однократною загрузкою реагентів, що залежить від середньорічної продуктивності та часу перебування реагентів в реакторі. Тоді робочий об'єм буде дорівнювати:

$$V = \frac{G\tau}{\rho} \quad (5.1)$$

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

τ – середній час перебування реагентів в реакторі, с;

ρ – щільність реагентів, кг/м³.

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

$$V = v_0 \tau \quad (5.2)$$

де v_0 - початкова витрата реагентів м³/с.

Зазвичай, відношення висоти апарату до його діаметру приймають рівним одиниці, таким чином, діаметр апарату можна визначити за формулою:

$$D = H = \sqrt[3]{\frac{V}{\pi}} \cdot \quad (5.3)$$

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

$$D = H = \sqrt[3]{\frac{V}{\pi \cdot m}} \quad (5.4)$$

Найбільш близькими до конструкції самоусмоктуючих мішалок є закриті турбінні мішалки, проте, самоусмоктуючі мішалки є більш продуктивними ніж закриті турбінні мішалки. Діаметр самоусмоктуючої мішалки d_m дорівнює:

$$d_m = 1/3 \div 1/4 D_a. \quad (5.5)$$

Ширина лопаті

$$B = 1/5 \div 1/8 d_m, \quad (5.6)$$

розташування мішалки від днища

$$h = d_m \quad (5.7)$$

Згідно фізичної моделі усмоктування газового компоненту самоусмоктуючими ежекційними мішалками відбувається в наслідок зростання перепаду тиску в середині мішалки та порожнистих лопатей і гідростатичним тиском рідини, що знаходиться в апараті, який створюється за рахунок обтікання перемішуючим середовищем порожнистих лопатей самоусмоктуючої мішалки. Енергетичний стан процесу усмоктування можна записати

$$\Delta P_L \approx \Delta P_{TC} + \Delta P_G. \quad (5.8)$$

де ΔP_L - перепад тиску за рахунок обтікання лопаті потоком рідини, Па;

ΔP_{TC} - гідростатичний тиск на рівні лопаті, Па;

ΔP_G - гідравлічний опір валу і мішалки, Па.

Перепад тиску в середині мішалки і порожнистої лопаті визначається по формулі

$$\Delta P_{\Pi} = 0,5\pi^2 n^2 d_M^2 \rho_B \xi_0 . \quad (5.9)$$

Тиск висоти стовпа рідини в апараті і величина гідравлічного опору порожнистої лопаті дорівнюють відповідно: $\Delta P_{ГC} = \rho_B g h_{ГC}$ $\Delta P_{Г} = \rho_B g h_{Г}$.

Враховуючи (5.9) та останні приведені формули із рівняння (5.8) можна визначити теоретичну початкову частоту обертання мішалки n_0 , при якій починається витік газових бульбашок з порожнистої лопаті в перемішуемий об'єм

$$n_0 = \sqrt{\frac{2g(h_{ГC} + h_{Г})}{\pi^2 d_M^2 \xi_0}} . \quad (5.10)$$

Швидкість транзитного потоку, що рухається в порожнистій лопаті під впливом перепаду тиску, можна вирахувати скориставшись відомим з гідравліки рівняння

$$w = \sqrt{\frac{2\Delta P_P}{\rho_{\Pi}}} , \quad (5.11)$$

Тоді теоретична насосна продуктивність по газовій фазі самоусмоктуючої ежекційних мішалки $V_{Г}$, м³/с, складає

$$V_{Г} \approx \lambda S_0 \sqrt{\frac{2\Delta P_P}{\rho_{\Pi}}} \approx \lambda S_0 z \pi d_M \sqrt{(n^2 - n_0^2) \xi_0} . \quad (5.12)$$

де S_0 - площа отвору порожнистої лопаті мішалки, м²; λ - узагальнений коефіцієнт витрати; z - число лопатей мішалки.

Для запропонованих самоусмоктуючих ежекційних мішалок з вертикальними плоскими порожнистими лопатями або мішалок, які мають певний кут нахилу порожнистих лопатей по відношенні до площини обертання

мішалки отримана емпірична залежність з визначення коефіцієнту опору лопаті ξ_0

$$\xi_0 = 1,3 \cdot \sin \alpha - 3,75d_M - 10(0,35 - 5,56d_M^2)(\mu - 1 \cdot 10^{-3}) \quad (5.13)$$

і емпіричне рівняння з визначення початкової частоти обертання мішалки в залежності від діаметру та глибини занурення мішалки

$$n_0 = 7,425 + 30,5h_{TC} - 61,3d_M. \quad (5.14)$$

Коефіцієнт витрат λ в середині порожнистої лопаті залежить від кута скосу при вході в порожнисту лопать

$$\lambda = 0,5 + \cos^2 \alpha - 0,17 \cos \alpha, \quad (5.15)$$

де α - кут скосу вхідної кромки порожнистої лопаті.

2. Далі визначається насосна продуктивність самоусмоктуючої ежекційної мішалки з плоскими порожнистими лопатями і ежекційною перегородкою використовуючи запропоновані рівняння в безрозмірній формі:

по газовій фазі

$$\frac{V_G}{nd_M^3} = 0,03 \cdot \sin \alpha^{1,5} \cdot \left(\frac{a}{b}\right)^{0,5} \cdot \left(\frac{h}{d_M}\right)^{-0,9} \quad (5.16)$$

і рідині

$$\frac{V_P}{nd_M^3} = 0,0033 \cdot \left(\frac{a}{b}\right). \quad (5.17)$$

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

$$\bar{\varphi} = 0,21(n - n_0)^{1,8} \cdot d^{1,5} \left(\frac{b}{d_M} \right)^{0,1} \cdot \left(\frac{H}{D_A} \right)^{0,6} \quad (5.18)$$

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

Витрата потужності для самоусмоктуючих ежекційних мішалок в залежності від об'ємної продуктивності по газу в режимі самоусмоктування для апарату об'ємного типу з трьома вертикальними відбійними перегородками

$$\frac{N_{\Gamma-P}}{N_P} = 0,32 \cdot \left(\frac{V_{\Gamma}}{nd_M^3} \right)^{-0,08} \quad (5.19)$$

і для апарату з статором

$$\frac{N_{\Gamma-P}}{N_P} = 0,42 \cdot \left(\frac{V_{\Gamma}}{nd_M^3} \right)^{-0,08} \quad (5.20)$$

Витрата потужності самоусмоктуючих ежекційних мішалок при перемішуванні однорідної рідини в об'ємному апараті з трьома відбійними перегородками

$$N_P = 5,36\zeta \cdot \rho \cdot n^3 d_M^5 \cdot \sin \alpha^{0,32} \cdot \left(\frac{d_M}{D} \right)^{0,007} \cdot \left(\frac{b}{d_M} \right)^{-0,03} \quad (5.21)$$

та апараті зі статором

$$N_P = 6,12\zeta\rho \cdot n^3 d_M^5 \cdot \sin \alpha^{0,32} \cdot \left(\frac{d_M}{D}\right)^{0,02} \cdot \left(\frac{b}{d_M}\right)^{-0,05} \quad (5.22)$$

Витрата потужності самоусмоктуючих ежекційних мішалок при перемішуванні двофазного газорідинного середовища в об'ємному апараті з трьома відбійними перегородками

$$N_{\Gamma-P} = 4,4 \cdot \zeta \cdot \rho \cdot n^3 d_M^5 \cdot \sin \alpha^{0,3} \cdot \varphi \cdot \left(\frac{d_M}{D}\right)^{0,01} \cdot \left(\frac{b}{d_M}\right)^{-0,03}, \quad (5.23)$$

та реакторі зі статором

$$N_{\Gamma-P} = 5,02 \cdot \zeta \cdot \rho \cdot n^3 d_M^5 \cdot \sin \alpha^{0,3} \cdot \varphi \cdot \left(\frac{d_M}{D}\right)^{0,01} \cdot \left(\frac{b}{d_M}\right)^{-0,03} \quad (5.24)$$

Приведена інженерна методика розрахунку апаратів об'ємного типу з самоусмоктуючими ежекційними мішалками дозволяє провести гідродинамічні розрахунки апаратів для проведення абсорбції важкорозчинних газів та реакторів для проведення екзотермічних газорідинних реакцій. Блок-схема алгоритму розрахунку цих апаратів приведена в додатку.

5.2. Висновки та рекомендації щодо розрахунку апаратів об'ємного типу з самоусмоктуючими перемішувальними пристроями

Технологічні процеси, в основі яких завжди і безумовно лежать природні процеси (явища), відрізняються від останніх тим, що проводяться в умовах та у послідовності, що дозволяють отримати достатньо ефективні практичні результати з ціллю задоволення потреб людини.

Технологічні процеси не можуть бути проведені без використання пристроїв (технологічного обладнання). Пристрої і технологічні процеси, що

відбуваються в них, складають технологічні системи (виробництва), які не можуть працювати ефективно, якщо пристрої і технологічні процеси знаходяться у розбіжності. Конструкція і принцип дії пристрою повинні відповідати технологічному процесу, тобто, забезпечувати його визначені умови. З цього витікає висновок, що умови і властивості технологічного процесу цілком визначають конструкцію і принцип дії пристрою [46].

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 – τ .

4 В результаті аналізу особливостей даного типу хімічної реакції обирається ап'єєєєєєєєртурне 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 перемішувачами пристроями обирають тип мішалки. Від правильності обраного типу 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.

Тому вибір конструкції і принципу дії певного апарату 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 апарату необхідно провести системний аналіз впливу цих факторів.

ВИСНОВКИ

1. На підставі аналізу літературних джерел з гідродинаміки в газорідинних апаратах об'ємного типу з механічними перемішуючими пристроями обґрунтований перспективний напрямок наукових досліджень з метою визначення оптимальної конструкції самоусмоктуючих мішалок призначених для проведення газорідинних реакцій.

2. Розроблені конструкції самоусмоктуючих ежекційних мішалок, які випробовувалися в об'ємних апаратах, для реалізації розрахунку визначеного напрямку експериментальних випробувань.

3. Розроблена фізична модель усмоктування газової фази самоусмоктуючими ежекційними мішалками на базі енергетичного балансу, який складається в результаті дії меридіального та радіального потоків, які обтікають лобову поверхню лопаті та спонукають виникнення розрідження в середині самоусмоктуючих мішалок.

4. Проведені експериментальні випробування залежності насосної продуктивності по газу і рідині та середнього і локального газовмісту перемішуючого середовища та витрат потужності самоусмоктуючих ежекційних мішалок від геометричних розмірів для визначення оптимальних параметрів самоусмоктуючих перемішуючих пристроїв.

5. На основі розробленої математичної моделі отримано залежності для визначення початкової частоти обертання при якій починається усмоктування газової фази; коефіцієнту опору порожнистих лопатей: для циліндричних лопатей від форми лобової поверхні порожнистої лопаті, для щілинних порожнистих лопатей від кута нахилу лопаті по відношенню до площини обертання та діаметру мішалки з метою визначення найбільш ефективного типу самоусмоктуючої ежекційної мішалки.

6. Отримані розрахункові залежності насосної продуктивності по газовій фазі та рідині, середньому та локальному газовмісту, а також витрат потужності на перемішування однорідного та двофазного газорідинного середовища в

апаратах з відбійними перегородками та статором для подальшого розрахунку і вибору типу приводу.

7. Наведені розрахункові рівняння дають можливість провести порівняльні розрахунки самоусмоктуючих ежекційних мішалок з метою вибору апарату об'ємного типу для проведення швидких і повільних газорідних реакцій та надати рекомендації щодо розробки газорідних апаратів з самоусмоктуючими ежекційними мішалками.

8. Результати наукових досліджень були використані для розрахунків та розробки апаратів з самоусмоктуючими ежекційними мішалками які успішно пройшли випробування в промислових умовах та рекомендовані до впровадження у виробництво.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

- 1 Романков П.Г. Гидромеханические процессы химической технологии. / Романков П.Г., Курочкина М.И. -3-е изд., пер. – Л.: Химия, 1982 – 288 с.
2. Стренк Ф. Перемешивание и аппараты с мешалками / Ф. Стренк. – Л.: Химия, 1975. – 384 с.
3. Васельцов Э.А. Аппараты для перемешивания жидких сред. / Э.А. Васельцов, В.Г. Ушаков. – Л.: Машиностроение, 1979. – 272 с.
4. Брагинский Л.Н. Перемешивание в жидких средах: Физические основы и инженерные методы расчета. / Л.Н. Брагинский, В.И. Бегачов, В.М. Барабаш. – Л.: Химия, 1984. – 336 с.
5. Соколов В.Н. Газожидкостные реакторы / В.Н. Соколов, И.В. Доманский. – Л.: Машиностроение, 1976. – 216 с.
6. А. с. 993969 СССР. Теплообменный аппарат / А.В. Шишкин и др. (СССР). Оpubл. 07.02.83, Бюл. № 5.
7. А. с. 1357061 СССР. Газожидкостной реактор / А.В. Шишкин, Г.В. Турунцев и др. (СССР). Оpubл. 07.12.87, Бюл. № 45.
8. Бакланов Н.А. Пропеллерные и турбинные мешалки в американской промышленности / Н.А. Бакланов. – 1946, №7 с.479-503.
9. А. с. 648249 СССР. Турбинная мешалка / Г.В. Дронов, В.А. Зайцев и др. (СССР). Оpubл. 25.02.79, Бюл. № 7.
10. А. с. 1299613 СССР. Устройство для диспергирования газа в жидкости / Э.А. Васильцов, Т.А. Мороз, Г.Г. Егорова (СССР). Оpubл. 30.03.87, Бюл. № 12.
11. Павлушенко И.С. О влиянии перемешивания на процесс химического превращения в системе газ-жидкость / И.С. Павлушенко, Л.Н. Брагинский, В.Н. Брилов // ЖПХ. – 1961. – Т.34. – № 4. – С. 805-814.
12. Васильев А.В. Исследование массообмена в автоклавах с самовсасывающими мешалками / А.В. Васильев, В.А. Зайцев, Т.П. Горшкова, А.С. Пестов // Химическое и нефтяное машиностроение. – 1978. – № 9. – С. 13-16.

13. А. с. 814429 СССР. Устройство для смешения газа с жидкостью / Г.М. Стронгин, А.С. Матвеев, Ю.А. Гришин (СССР). Опубл. 23.03.81, Бюл. № 11.
14. А. с. 1318271 СССР. Устройство для смешения жидкости с газом / А.Р. Голубев и др. (СССР). Опубл. 23.06.87, Бюл. № 23.
15. А. с. 1165442 СССР. Устройство для аэрации и перемешивания жидкости / Ю.В. Агафонов, Ф.Н. Чегодаев и др. (СССР). Опубл. 1985, Бюл. № 25.
16. А. с. 437522 СССР. Смеситель для обработки систем газ-жидкость / В.В. Консетов, Н.А. Лебедев и др. (СССР). Опубл. 1974, Бюл. № 28.
17. Патент 1104032 Великобритания. МКИ В01F. Methods of Mixing Liquids and Apparatus therefor - Eastman Kodak Company, опубл. 21.02.68
18. А. с. 253756 СССР. Устройство для насыщения жидкостей газами / М.Я. Розкин, Г.Ф. Слезко (СССР). Опубл. 1973, Бюл. № 31.
19. А. с. 398265 СССР. Устройство для смешения жидкостей / Н.И. Парафенко, М.Я. Розкин (СССР). Опубл. 1973, Бюл. № 38.
20. Беляков Н.Г. Распределение газовых пузырей по размерам в аппаратах с двойным перемешивающим устройством / Беляков Н.Г., Клипиницер В.Л., Кафаров В.В. // – Сб. Теория и практика перемешивания в жидких средах. – М.; 1982, с 103-106.
21. Зайцев В. А. К вопросу расчета аппаратов с аэрирующими устройствами для массообменных процессов в системах Г-Ж-Тв / В.А. Зайцев, Ю.И. Куприянов и др. // сб. Теория и практика перемешивания в жидких средах. – М.: – 1982. – С. 20-30.
22. Зайцев В. А. Исследование влияния конструкций аэрирующей мешалки и условий перемешивания на скорость массопередачи. / В.А. Зайцев, Ю.И. Куприянов, А.С. и др. // сб. Теория и практика перемешивания в жидких средах. – М.: – 1982. – С. 98-99.
23. А. с. 771089 СССР. Способ получения алкиларилсульфокислот или кислых алкилсульфатов и устройство для его осуществления / В.Я. Стороженко, В.И. Шабрацкий (СССР). Опубл. 1980, Бюл. № 38.

24. Парафенко Н.И. Новые роторно-струйные перемешивающие устройства / Н.И. Парафенко, М.Я. Розкин // Теория и практика перемешивания в жидких средах. – 1973. – С. 175-180.
25. Парафенко Н.И. Исследование самовсасывающей мешалки с радиально-вытекающими струями / Н.И. Парафенко, М.Я. Розкин, А.И. Барвин, А.В. Микуленко // Химическое и нефтяное машиностроение. -1973. - № 7. С. 14.
26. А. с. 1357061 СССР. Газожидкостной реактор / А.В. Шишкин (СССР). Оpubл. 1987, Бюл. № 45.
27. А. с. 1637106 СССР. Перемешивающее устройство / Д.И. Белкин, В.И. Шабрацкий и др. (СССР). 1991 (не публикуется).
28. А. с. 1655548 СССР. Устройство для смешения жидкости с газом / Д.И. Белкин, В.И. Шабрацкий и др. (СССР). Оpubл. 1991, Бюл. № 22.
29. Zlokarnik M. Auslegung vor Hohlruhreru sur Flussig keits begasung / M. Zlokarnik – Chem.-Ius.-Techu. – 1966. – № 3, – p. 357-366.
30. Пат. 1173254 Великобритания. Improvements in or relating to the Surface Aeration of Liquids Mills. / F. Sandersan, опубл. 3.12.69.
31. Патент 3479017 США. Apparatus for Charging Liquids with Gases / K.N. Thikotter, опубл. 18.11.69.
32. А. с. 1165443 СССР. Устройство для аэрации жидкости / П.В. Давыдов и др. (СССР). Оpubл. 1985, Бюл. № 25.
33. А. с. 610554 СССР. Аппарат с самовсасывающей мешалкой / В.И. Лосик и др. (СССР). Оpubл. 1978, Бюл. № 22.
34. А. с. 276964 СССР. Массообменный аппарат / М.С. Гаврилов, М.Я. Розкин, Г.Ф. Слезко и др. (СССР). Оpubл. 1968, Бюл. № 24.
35. А.с. 537955 СССР. Устройство для аэрирования сточных вод. / С.М. Шифрин, С.Г. Коган, Б.Г. Мишунов (СССР). Оpubл. 1976, Бюл. № 45.
36. А.с. 1169729 СССР. Газожидкостной реактор. / А.В. Шишкин, Г.В. Турунцев, М.И. Шибутович (СССР). Оpubл. 1985, Бюл. № 28.
37. А. с. 1286258 СССР. Аэрирующее устройство. / Г.Н. Потыхина, Г.М. Тарарыков, В.А. Федоров, А.И. Щербаков (СССР). Оpubл. 1987, Бюл. № 4.

38. Пат. США 2530814 MC1 B01F 13/02 Apparatus for Aerating Liquids. G. Beese, A.Z. Liehmann, опубл.12.10.45.
39. А. с. 1190973 СССР. Устройство для диспергирования газа в жидкости. / В. Бранден. Опубл. 1985, Бюл. № 41.
40. А. с. 778759 СССР. Устройство для диспергирования газа в жидкости. / В.Н. Кузнецов, В.М. Никитин, А.А. Собцов, Н.Ф. Мещеряков (СССР). Опубл. 1980, Бюл. № 42.
41. А.с. 814429 СССР. Устройство для смешивания газа с жидкостью. / Г.М. Стронгин, А.С. Матвеев, Ю.А. Гришин (СССР). 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 / А.А. Чечура (СССР). Опубл. 1972, Бюл. № 10.
44. А. с. 1122347 СССР. Аппарат с самовсасывающей мешалкой / В.И. Лосик, В.В. Невелич, В.Н. Антонов и др. (СССР). Опубл.1984, Бюл.№ 41.
45. Мартынов, Ю.В. Массоперенос в аппарате с мешалкой, осложненной объемной химической реакцией / Мартынов Ю.В. // Теоретические основы химической технологии -1998 – Т. 32,№1 с.60-64
46. Дахин О.Х. Химические реакторы / О.Х. Дахин // Волгоград. РПК «Политехник». - 2012
47. Фирстов В.А. Исследование работы щелевых самовсасывающих мешалок/ В.А. Фирстов, В.В. Климов // Молодые исследователи и конструкторы – химическому машиностроению: всесоюзная науч.-техн. конф, – М., 1979. – С. 8.
48. Шабрацкий В.И. Применение реакторов емкостного типа с всасывающей мешалкой для хлорирования пассивных органических соединений / В.И. Шабрацкий, В.И. Роговик, И.Я. Бедусенко // Химреактор: VIII Всесоюзная конф., 1983. – С. 253-258.

49. Zlokarnik M. Rourund Scheibeurhrer rwei leisthu-gefahige Ruhrer ruz Flussigheits Legasung / M. Zlokarnik // Chem.-Ing.-Tech. 1967. – Ig. 39. – № 10, – p. 1163-1168.
50. Н.А. Войнов и др. (Т.Г. Волова, Н.В. Зобова, С.В. Маркова, Л.А. Франк, Е.И. Шишацкая) Современные проблемы и методы биотехнологии. Красноярск ИПК СФУ 2009. 418 с.
51. Иванец В.Н. Исследование эффективности самовсасывающих мешалок / Иванец В.Н., Желтухин Ю.С. // Сб. Химия и химическая технология №81. КузПИ, Кемерово, 1976, с 51-57.
52. Зайцев В. А. Исследование эффективности самовсасывающих мешалок / В.А. Зайцев, Ю.И. Куприянов, А.С. Васильев и др. // сб. Теория и практика перемешивания в жидких средах. – М.: – 1979. – С. 153-159.
53. Зайцев В.А. Исследование гидродинамики в аппаратах с аэрирующими устройствами / В.А. Зайцев, Г.П. Гусева // Химическое и нефтяное машиностроение. – 1983. – № 10. – С. 13-14.
54. Стороженко Л.В. Исследование самовсасывающей мешалки эжекционного типа / Л.В. Стороженко, М.С. Гаврилов, В.И. Барвин // Химическое машиностроение. – 1970. – № 48. – С. 11.
55. Шабрацкий В.И. Гидродинамика газожидкостных аппаратов с самовсасывающими мешалками: дис. канд. техн. наук: 05.17.08 / Шабрацкий В.И. – М., 1995. – 235 с.
- 56 Чепура И.В. Определение механизма действия и коэффициента гидравлического сопротивления самоусмоктующих мешалок/ Чепура И.В., Шабрацкий В.И., Кутепов А.М. // Химическая промышленность. – 1996. -№8 – С.18-24.
57. Аржаников Н. С. Аэродинамика / Н.С. Аржаников, В.Н. Мальцев. – М.: Оборонгиз. 1956. – 370 с.
58. Краснов Н. Ф. Аэродинамика тел вращения. / Н.Ф. Краснов. – М.: Машиностроение, 1964. – 410 с.

59. Мильченко А.И. Поля давлений и окружных скоростей, создаваемых лопастной мешалкой / А.И. Мильченко, С.Г. Щур и др. // Химическое и нефтяное машиностроение. – 1976. – № 2. – С. 44.
60. Гуревич М.И. Об одной схеме струйного обтекания плоской пластины / М.И. Гуревич // Труды ЦАГИ. – 1943. – № 612. – С. 8.
61. Перник А. Д. Проблемы кавитации / А.Д. Перник. – Л.: Судостроение. – 1963.
62. Абрамович Г.И. Теория турбулентных струй / Г.И. Абрамович. – М.: Наука. – 1984. – 715 с.
63. Лойцянский Л.Г. Механика жидкости и газа / Л.Г. Лойцянский. – М.: Наука. – 1970. – 502 с.
64. Альтштуль А.Д. Гидравлика и аэродинамика. Основы механики жидкости / А.Д. Альтштуль, П.Г. Киселев. – М.: Стройиздат. – 1965. – 274 с.
65. Васильцов Э.А. Кавитация перемешивающих устройств / Э.А. Васильцов, А.Я. Исаков // Химическое и нефтяное машиностроение. – 1975. – № 12. – С. 13-15.
66. А.Я. Исаков Кавитация в перемешивающих устройствах./ Монография. – Петропавловск-Камчатский: Камчат. ГТУ, 2006. – 206с.
67. Васильцов Э.А. Особенности перемешивания в развитом турбулентном режиме / Э.А. Васильцов, А.Я. Исаков // III Всесоюзная конф. по созданию аппаратов с активными гидродинамическими режимами. – М.: МИХМ. – 1977. – С. 196-201.
68. Емцев Б.Т. Техническая гидромеханика / Б.Т. Емцев // Ученик для вузов по специальности «Гидравлические машины и средства автоматизации». – М.: Машиностроение, – 1987. – 440 с.
69. Майер У. Плохообтекаемые тела и отрыв вихрей / У. Майер, Д. Мауль // Тез. докл. «Европа-17». – М.: Мир. – 1972. – № 2. – С. 100-113.
70. Биркгоф Э. Струи, следы и каверны / Э. Биркгоф, Э. Сарантонелло. – М.: Мир. – 1964. – 466 с.

71. Кафаров В.В. Основы массопередачи. Изд. 3-е, перераб. И доп., М.: Высшая школа, 1979. 439 с.
72. Цирлин А. М. Газосодержание в аппаратах с механическим перемешиванием при высоких удельных затратах энергии./ Цирлин А. М., Трушанов В. Н., Ходов Г. Я., Рабинович Р. А. Химическое и нефтяное машиностроение. - 1974. - № 6. - с. 13-15.
73. Ерофеев Н.А. Газосодержание в жидкости при перемешивании механическими мешалками./ Ерофеев Н.А., Петыхина Г.Н.// Химическая и нефтехимическое машиностроение. – 1976. -№10. –с.18-20.
74. Westerterp K.R. Design of agitators for gas-liquid contacting / K.R. Westerterp Chem. Engng Sci. – 1963, – v. 18, – №8, – p. 495-502.
75. Кафаров В. В. Изучение процесса перемешивания в системах газ-жидкость./ Кафаров В. В., Гольдфарб М. И., Иванова М. Г. // Химическая промышленность. - 1954. - № 7. - с. 39-44.
76. Чепура И.В. Определение газосодержания в аппаратах с самовсасывающими мешалками / Чепура И.В., Шабрацкий В.И., Кутепов А.М.// Химическая промышленность. – 1998. -№8 – С.39-42.
77. Kipke K. Rühren von dünnflüssigen und mittelvis-hosen Medien. – Chem. Ing. Techn., 1979. №5, s. 430-436.
78. Зайцев В. А. Исследование эффективности самовсасывающих турбинных мешалок / В.А. Зайцев, Ю.И. Киприянов, А.С. Васильев // Теория и практика перемешивания в жидких средах. – М.: НИИТЭХИМ. – 1973. – С. 153-159.
79. 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.
80. Сойфер Р. Д., Кафаров В. В. Расход энергии на перемешивание в газожидкостных системах. Химическое и нефтяное машиностроение. - 1965. – № 10. - с. 15-19.
81. Gas-liquid flow in stirred reactors: Trailing vortices and gas accumulation behind impeller blades. Chem. Eng. Sci. 13-14, 1999 т 54 с. 2305-2315]

82. Zlokarnik M.A. Auslegung vor Hchlruhrern zur Flussigkits begasung. - Chem. Ing. Techn., 1966. Jg. 38. №3. s. 357 – 366.
83. Yoshida F. Gas absorption in agitater gas-liquid contactor / F. Yoshida, Y. Miuza // Inst. Eng. Chem. – 1963, – v. 2, – №4, – p. 263-268.
84. Шахтатинский Т.Н. Интенсификация поверхностной аэрации в газожидкостном реакторе с сочетанием мешалки. / Шахтатинский Т.Н., Галиулин Н.Г., Келбалиев Г.И.// Химическая промышленность №5-6 - с.41-43
85. Шабалин Н. И., Петушинский Л. Н. Исследование поверхности контакта фаз и коэффициентов массоотдачи в реакторах с самовсасывающими мешалками. - М.: ЦИНТИхимнефтемаш, 1979.с.11-12.
86. Valentin F.H. Mass transfer gas-liquid in a stirred vessel / F.H. Valentin, B.V. Pren // Chem. Ing. Tech. – 1962, – v. 34, – p. 194-199.
87. Yamaguchi J. Dispersed gas hold up in gas-liquid mixing / J. Yamaguchi, S. Nagata // Chem. Eng. Japan, – 1964. – v. 28, – p. 998-1002.
88. Zlokarnik M. Rehruhrer rum Ausangen und Dispergieren grosser Gasdurchsatre in Flussig-keiten. / M. Zlokarnik // Chem.-Ing.-Tech. 1970. – Jg. 42. – № 24, – p. 1310-1314.
89. Барабаш, В.М. Массообмен от пузырьков и капель в аппаратах с мешалкой / О.Е. Вишневецкая, В.М. Барабаш, Н.И. Кулов // Теоретические основы химической технологи – 1996 –Т. 30, №5 –с 485-491
90. Мартынов, Ю.В. Массоперенос в аппарате с мешалкой, осложненный объемной химической реакцией / Ю.В. Мартынов // Теоретические основы химической технологи – 1998 –Т. 32, №1 –с 60-64
91. Климов В.В. Исследование гидродинамики и массообмена на модели колонного ферментера./ Климов В.В., Бойко Т.Ф., Ознобнина С.А. Тез. Докл. II Всесоюзной научно-технической конференции «Молодые исследователи – химическому машиностроению», - М.: ЦИНТИхимнефтемаш, 1979. –с. 10-11.
92. Yoshida F. Miuza Y. Gas absorption in agitater gas-liquid contactor. Inst. Eng. Chem. 1963,v.2, №4, p.263-268.

93. Valentin F.H., Pren B.V/ Mass transfer gas-liquid in a stirred vessel. Chem. Ing. Tech. 1962, v. 34, p. 194-199.
94. Yamaguchi J., Nagata S. Dispersed gas hold up in gas-liquid mixing. Chem. Eng. Japan, 1964, v.28,p.998-1002
95. Сойфер Р. Д., Кафаров В. В. Газосодержание аэрируемой жидкости в аппаратах с мешалкой. Химическое и нефтяное машиностроение. - 1967. – № 3. - с. 16-18.
96. 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.
97. Васильев А.В. Исследование массообмена в автоклавах с самовсасывающими турбинными мешалками / А.В. Васильев, В.А. Зайцев, Г.П. Горшкова // Химическое и нефтяное машиностроение. – 1978. – № 9. – С. 13-16.
98. Фирстов В.А. Исследование работы щелевых самовсасывающих мешалок./ Фирстов В.А, Климов В.В. // Тез. Докл. II Всесоюзной научно-технической конференции «Молодые исследователи – химическому машиностроению», - М.: ЦИНТИхимнефтемаш, 1979. –с. 8.
99. Zlokarnik M. Auslegung vor Nchlruhrern zur Flussigkits begasung / M. Zlokarnik // Chem. Ing. Techn., – 1966. – №3. – p. 357-366.
100. Zlokarnik M.A. Rohr – und Scheibenruhrer – zwu leistungsfahige Ruhrer zur Flussigkeits begasung. Chem. Ing. Techn., 1967. Jg. 39. №10, s. 1163-1168.
101. Zlokarnik M.A. Rohruhrer rum Ansangen und Dispergieren grosser Gas durchsatre in Flussigkeiten Chem. Ing. Techn., 1970. Jg. 42. №21, s. 1310- 1314.
102. 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.
103. Yoshida F., Minza Y. Gas absorption in agitated gas-liquid contactors Ind.-Eng.-Chem. 1963, v. 2, №4, p. 263-268.

104. 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.
- 105 Левич В.Г. Физико-химическая гидродинамика. М.: Физматгиз, 1959. 799 с.
106. Colderbank P.H., Physical Rate Processes in Industrial Fermentation. Part 1. The interfacial area in gas-liquid contacting with mechanical agitation. Trans. Inst. Chem. Eng. 1958, v. 36, p. 443-463.
107. Рамм, В.М. Абсорбция газов [Текст]/ В.М.Рамм. М.: Химия 1976. – 656с.
- 108 Н.А. Войнов. Современные проблемы и методы биотехнологии./ Н.А. Войнов, Т.Г. Волова, Н.В. Зобова, С.В. Маркова, Л.А. Франк, Е.И. Шишацкая // Красноярск ИПК СФУ 2009. - 418 с.
109. Ганин П.Г. Теоретическая оценка устойчивости адсорбционного взаимодействия частиц твердой и газообразной дисперсных фаз в аппарате с механическим перемешиванием и аэрацией (обзор). Санкт-Петербургская государственная химико-фармацевтическая академия. 2008. т.8, вып. 4, с.553-569.
110. Колмогоров А.Н. О дроблении капель в турбулентном потоке. // Докл. АН СССР 1949. т. 66, №5, с.825-828.
111. Карпушкин, С.В. Расчет и выбор механических перемешивающих устройств вертикальных емкостных аппаратов./ С.В. Карпушкин, М.Н. Краснянский, А.Б. Борисенко / Тамбов. Издательство ТГТУ. 2009 г. 168 с.
112. Kawecki W., Reith T., Beek W.I. Bubble size distribution in the impeller region a vessel. Chem. Eng. Sci. 1967, v.22 № 11, p.1519-1523.
113. Касаткин А.Г. Основные процессы и аппараты химической технологии. – М.: Химия, 1971. – 784 с.
114. Cooper R. G., Wolf D. Pumping capacities in stirred tanks Theory and application Canad. I. Chem. Eng. 1967, v. 45, № 4, p. 197-203.
115. Брагинский Л. Н., Бегачев В. И. О взаимосвязи между окружной скоростью и мощностью при перемешивании. ТОХТ, 1972, т.6, № 2, с. 760.

116. 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.
117. 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.
118. 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.
119. Касаткин А.Г., Кафаров В.В., Панфилов М.Н., Исследование процесса перемешивания механическими мешалками в системе газ-жидкость. Труды МХТИ им. Д.И.Менделеева, 1957, вып. 24, с 413-427.
120. Colderbank P.H., Physical Rate Processes in Industrial Fermentatson. Part 2. Mass transfer coefficient in gas-liquid cofacting with without mechanical. Trans. Inst. Chem. Eng. 1959, v. 37, p. 173-185.
121. 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.
122. 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.
123. 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.

124. Гзовский С. Я. Потребляемая мощность, интенсивность и эффективность действия радиально-лопастных мешалок. Химическое и нефтяное машиностроение. - 1965. - № 3. - с. 1-6.
125. 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.
126. Шенк Х Теория инженерного эксперимента / Х. Шенк; пер. с англ. Е.Г. Коваленко; под ред. чл.- корр. АН СССР Н.П. Бусленко. – М.: Мир, 1972. - 374 с.
127. Спиридонов А.А. Планирование эксперимента при исследовании технологических процес сов /А.А. Спиридонов. – М.: Машиностроение, 1981. – 184 с.
128. Горский В.Г. Планирование промышленных экспериментов (модели статистики) В.Г. Горский , Ю.П. Адлер. – М.: Металургия, 1974. - 264 с.
129. Брановицкая С.В. Вычислительная математика в химии и химической технологии / С.В. Брановицкая, Р.Б. Медведев, Ю.Я. Фиалков. – К.: Вища школа. Головне изд-во, 1986. – 216 с.
130. Батунер Л.М. Математические методы в химической технике / Л.М. Батунер, М.Е. Позин; под ред. Проф. М.Е. Позина. – (6-е изд., испр.) – Л.: Химия, 1971. – 824 с.
131. Патент України № 60097 Пристрій для перемішування рідин./ Шабрацький В.І., Белкін Д.І., Барвін В.І., Шабрацький С.В. Опубл. 2011 р., Бюл. № 11.
132. 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.
133. Стороженко В.Я. Удосконалення перемішуючих пристроїв для газорідинних реакторів об'ємного типу / В.Я. Стороженко, В.І. Склабінський, С.В. Шабрацький // Східноєвропейський журнал передових технологій. – 2013 – №2. – С. 46-52.

134. Белкін Д.І. Дослідження витратних характеристик транзитного потоку в самоусмоктуючих мішалках / Д.І. Белкін, В.Я. Стороженко, С.В. Шабрацький, В.І. Шабрацький, В.І. Барвін // Хімічна промисловість України. – 2013 – №4. – С. 53-57.
135. Белкін Д.І. Характеристики мішалок у режимі до виходу газу з порожнистих лопатей / Д.І. Белкін, О.О. Демченко, С.В. Шабрацький, В.Я. Стороженко, В.І. Шабрацький, // Хімічна промисловість України. – 2015 – №1. – С. 25-31.
136. Белкін Д.І. Гідродинаміка газорідних апаратів з відцентрово-ежекційними мішалками. Насосна продуктивність мішалок / Д.І. Белкін, О.О. Демченко, С.В. Шабрацький, В.Я. Стороженко, В.І. Шабрацький, // Хімічна промисловість України. – 2015 – №2. – С.21-31
137. Белкін Д.І. Гідродинаміка газорідних апаратів з відцентрово-ежекційними мішалками. Питомий газовміст середовища і площа поверхні контакту фаз / Д.І. Белкін, О.О. Демченко, С.В. Шабрацький, В.Я. Стороженко, В.І. Шабрацький // Хімічна промисловість України. – 2015 – №3. – С.49-56
138. Стороженко В.Я. Насосна продуктивність самоусмоктуючих мішалок ежекційного типу / В.Я. Стороженко, С.В. Шабрацький // Хімічна промисловість України. – 2016 - №2. – С.25-32
139. Sklabinsky V., Storozhenko V., Shabratsky S. Improve the performance of self-suction mixers in the apparatus of the volume tupe / Chemik – 2015 - № 6, p. 335-341.
140. Shabratsky S., Storozhenko V. A Power Calculation Method for Self-Sucking Mixers / Eureka: Physics and Engineering, 3, 2016, p. 25-30
141. Патент на корисну модель № 65102 Україна, МПК В 01 F 5/00. Пристрій для проведення газорідних реакцій / Шабрацький В.І., Потапенко Е.В.; Заявник та патентовласник Шабрацький В.І.. - № u201105768; заявл. 10.05.2011; опубл. 25.11.2011, Бюл. № 22.

142. Патент на корисну модель № 76528 Україна, МПК В 01 F 5/16. Пристрій для перемішування рідин / Шабрацький С.В., Стороженко В.Я.; Заявник та патентовласник Шабрацький С.В. - № u201206726; заявл. 01.06.2012; опубл. 10.01.2013, Бюл. № 1.
143. Патент на корисну модель № 77986 Україна, МПК В 01 F 5/16. Газорідинний реактор / Шабрацький С.В., Шабрацький В.І.; Заявник та патентовласник Шабрацький С.В. - № u201207476; заявл. 19.06.2012; опубл. 11.03.2013, Бюл. № 5.
144. Патент на корисну модель № 80141 Україна, МПК В 01 F 5/16. Пристрій для перемішування / Шабрацький В.І., Белкін Д.І.; Заявник та патентовласник Шабрацький В.І. - № u201214434; заявл. 17.12.2012; опубл. 13.05.2013, Бюл. № 9.
145. Патент на корисну модель № 87666 Україна, МПК В 01 F 5/16. Самоусмоктувальна мішалка / Шабрацький С.В., Стороженко В.Я.; Заявник та патентовласник Шабрацький С.В. - № u201311518; заявл. 30.09.2013; опубл. 10.02.2014, Бюл. № 3.
146. Патент на корисну модель № 89755 Україна, МПК В 01 F 5/16. Пристрій для проведення газорідинних реакцій / Склабінський В.І., Стороженко В.Я., Шабрацький С.В.; Заявник та патентовласник Склабінський В.І. - № u201314790; заявл. 17.12.2013; опубл. 25.04.2014, Бюл. № 8.
147. Пат. на корисну модель № 97358 U Україна, МПК В01F 5/16. Турбозмішувач для проведення газорідинних реакцій / Склабінський В.І., Стороженко В.Я., Шабрацький С.В.; Заявник та патентовласник Склабінський В.І. — №201410721; Заявлено 01.10.2014; Надрук. 10.03.2015, Бюл. №5.
148. Белкин Д.И. Повышение производительности самовсасывающих мешалок эжекционного типа / Д.И. Белкин, В.И. Шабрацкий, В.И. Барвин, С.В. Шабрацкий // Развитие научных исследований 2011: седьмая междунар. научн.-практич. конф. 28-30 ноября 2011 г.: тезисы докл. – Полтава, 2011. – С. 112.

149. Шабрацкий В.И. Повышение эффективности работы самовсасывающих мешалок / В.И. Шабрацкий, В.И. Барвин, С.В. Шабрацкий, В.Я. Стороженко // Сучасні технології в промисловому виробництві: Друга всеукраїнська міжвузівська науково-технічна конференція, 28-30 жовтня 2012 р.: тези доп. – Суми, 2012. – С. 230.
150. Стороженко В.Я. Гідравлічний опір ротора самоусмоктуючої мішалки / В.Я. Стороженко, В.И. Шабрацький, В.И. Барвін, С.В. Шабрацький // Розвиток наукових досліджень: 8 міжнародна науково-практична конференція 19-21 листопада 2012 р.: тези доп. – Полтава, 2012. – С. 110.
151. Белкін Д.І. Впровадження новітніх випробувань мішалок в апаратах / Д.И. Белкин, В.И. Шабрацкий, С.В. Шабрацкий // Економічні та екологічні проблеми вугільних регіонів СНД: 6 Міжнародна науково-практична конференція 19 квітня 2013 р.: тези доп. – Краснодар, 2013. – С. 124.
152. Стороженко В.Я. Удосконалення пристроїв для перемішування у системі газ-рідина / В.Я. Стороженко, С.В. Шабрацький, А.В. Грудина // II Міжнародна науково-практична конференція, 27–29 листопада 2014 р.: тези доп. — Шостка, 2014. — С. 98.
153. Стороженко В.Я. Потужність, що витрачається самоусмоктуючими перемішувальними пристроями в газорідинних реакторах. / В.Я. Стороженко, С.В. Шабрацький, А.В. Грудина // Сучасні технології в промисловому виробництві.: Науково-технічна конференція 14-16 квітня 2015 р.: тези доп. – Суми. – С.219
154. Шабрацький С.В. Методика визначення потужності, що витрачається самоусмоктуючими перемішувальними пристроями. / Актуальні проблеми науково-промислового комплексу регіонів.: Всеукраїнська науково-технічна конференція 14-17 квітня 2015 р.: тези доп. – Рубіжне. – С.49

ДОДАТОК А

Таблиця А1

Порівняння результатів розрахунку і експерименту

n , 1/с	w_P , м/с	φ_n	$V_P \cdot 10^5$, м ³ /с	$V_E \cdot 10^5$, м ³ /с	n , 1/с	w_P , м/с	φ_n	$V_P \cdot 10^5$, м ³ /с	$V_E \cdot 10^5$, м ³ /с
Тип 1; $d = 0,18$ м; $\zeta_0 = 0,5$; $d_0 = 0,006$ м; $S_E = 2,825 \cdot 10^{-5}$ м ² ; $Z = 2$									
$h_{ГС} = 0,1$ м, $n_0 = 3,76$ 1/с					$h_{ГС} = 0,30$ м, $n_0 = 6,24$ 1/с				
5,83	1,78	0,64	10,05	9,10	8,33	2,20	0,47	12,43	14,28
6,67	2,20	0,72	12,43	11,10	9,22	2,72	0,57	15,37	16,67
7,33	2,52	0,77	14,23	14,30	10,03	3,14	0,64	17,74	16,82
8,33	2,97	0,82	18,71	20,00	10,86	3,56	0,69	20,11	18,33
9,20	3,36	0,86	29,89	28,60	13,32	4,71	0,79	26,61	25,12
10,00	3,70	0,88	37,73	38,30	14,25	5,12	0,81	28,93	27,20
12,50	4,64	0,92	59,37	58,80	16,33	6,04	0,83	41,97	38,67
Тип 1; $d = 0,1$ м; $\zeta_0 = 0,84$; $d_0 = 0,006$ м; $S_E = 0,93 \cdot 10^{-5}$ м ² ; $Z = 2$									
$h_{ГС} = 0,05$ м, $n_0 = 3,92$ 1/с					$h_{ГС} = 0,1$ м, $n_0 = 5,21$ 1/с (27,21)				
6,25	1,40	0,60	2,60	2,22	6,68	1,20	0,39	2,23	1,80
6,67	1,55	0,66	2,89	2,63	7,55	1,57	0,52	2,92	2,22
7,53	1,85	0,73	3,44	4,17	8,37	1,89	0,61	3,51	3,33
9,17	2,39	0,82	6,00	7,35	9,17	2,17	0,68	4,04	5,00
9,98	2,64	0,84	10,05	8,70	10,85	2,74	0,77	5,10	7,13
12,55	3,43	0,90	26,87	24,20	12,53	3,28	0,83	9,66	11,10
13,33	3,67	0,91	30,68	27,80	13,58	3,61	0,85	16,10	14,30
14,23	3,94	0,92	35,49	35,70	14,20	4,04	0,87	22,10	19,80
Тип 1; $d = 0,1$ м; $\zeta_0 = 0,84$; $d_0 = 0,006$ м; $S_E = 0,93 \cdot 10^{-5}$ м ² ; $Z = 4$									
$h_{ГС} = 0,07$ м; $n_0 = 4,49$ 1/с					$h_{ГС} = 0,26$ м; $n_0 = 8,07$ 1/с				
6,73	1,45	0,56	5,37	5,20	9,76	1,58	0,32	5,88	3,75
8,13	1,95	0,70	7,25	7,70	11,08	2,19	0,53	8,13	11,10
9,81	2,51	0,79	9,35	10,20	12,52	2,76	0,58	10,25	14,20
10,91	2,86	0,83	21,42	21,20	14,31	3,40	0,68	12,66	15,60
12,43	3,34	0,87	38,47	36,80	16,15	4,03	0,75	15,00	18,30
14,85	4,08	0,90	62,90	58,22	18,10	7,54	0,80	28,05	25,10
Тип 1; $d = 0,1$ м; $\zeta_0 = 0,84$; $d_0 = 0,055$ м; $S_E = 8,53 \cdot 10^{-5}$ м ² ; $Z = 2$									
$h_{ГС} = 0,09$ м, $n_0 = 4,98$ 1/с					$h_{ГС} = 0,25$ м, $n_0 = 7,90$ 1/с 62,48				
6,85	1,35	0,47	23,11	26,00	10,92	2,17	0,48	37,00	32,30
7,62	1,66	0,57	28,33	32,65	11,75	2,50	0,55	42,70	36,00
8,37	1,94	0,65	33,05	36,50	12,53	2,80	0,60	47,76	38,80
9,20	2,28	0,71	38,00	38,45	13,40	3,11	0,65	53,16	43,50
10,08	2,52	0,76	43,05	45,50	14,32	3,44	0,70	58,66	50,00
11,68	3,04	0,82	53,80	64,50	16,21	4,08	0,76	69,53	61,56

Продовження таблиці А1

n , 1/с	w_P , м/с	φ_n	$V_P \cdot 10^5$, м ³ /с	$V_E \cdot 10^5$, м ³ /с	n , 1/с	w_P , м/с	φ_n	$V_P \cdot 10^5$, м ³ /с	$V_E \cdot 10^5$, м ³ /с
Тип 2; $d = 0,068$ м; $\xi_0 = 0,97$; $d_0 = 0,006$ м; $b = 0,026$ м; $S_E = 2,825 \cdot 10^{-5}$ м ² ; $Z = 2$									
$h_{ГС} = 0,07$ м; $n_0 = 6,14$ 1/с					$h_{ГС} = 0,17$ м; $n_0 = 9,06$ 1/с				
10,45	1,75	0,66	9,89	7,85	11,10	1,33	0,33	7,50	5,31
12,13	2,17	0,74	12,23	15,60	12,86	1,89	0,50	10,67	10,70
15,33	2,91	0,84	22,10	25,33	15,40	2,58	0,65	14,57	17,50
19,06	3,74	0,90	43,00	40,26	18,83	3,30	0,76	18,65	24,13
20,05	3,95	0,91	48,09	51,15	21,90	4,53	0,83	31,48	35,70
Тип 3; $d = 0,128$ м; $\xi_0 = 0,90$; $d_0 = 0,006$ м; $S_E = 2,825 \cdot 10^{-5}$ м ² ; $Z = 2$									
$h_{ГС} = 0,1$ м; $n_0 = 3,94$ 1/с					$h_{ГС} = 0,26$ м; $n_0 = 6,09$ 1/с				
7,28	2,33	0,71	13,18	14,10	7,23	1,49	0,29	8,39	2,70
8,45	2,85	0,78	16,09	17,14	8,60	2,31	0,50	13,07	4,50
9,87	3,45	0,84	26,22	25,07	10,05	3,05	0,63	17,21	14,87
10,92	3,88	0,87	37,06	36,63	11,60	3,76	0,72	21,25	19,48
12,02	4,33	0,89	47,75	46,78	13,13	4,43	0,78	25,03	23,79
13,18	4,79	0,91	58,43	57,52	14,30	4,93	0,82	30,64	27,56
14,30	5,24	0,92	67,07	64,34	16,25	5,74	0,86	51,09	48,14
Тип 4; $d = 0,128$ м; $\xi_0 = 0,66$; $d_0 = 0,006$ м; $S_E = 2,21 \cdot 10^{-5}$ м ² ; $Z = 2$									
$h_{ГС} = 0,07$ м, $n_0 = 3,95$ 1/с (15,63)					$h_{ГС} = 0,16$ м, $n_0 = 5,67$ 1/с (32,17)				
5,33	1,17	0,45	5,16	2,6	8,35	2,00	0,54	8,85	7,10
6,77	1,80	0,66	7,94	5,50	10,07	2,72	0,68	12,00	8,30
8,42	2,43	0,78	10,74	12,64	11,72	3,35	0,77	14,82	13,00
10,03	3,01	0,84	19,20	20,10	13,37	3,96	0,82	20,77	18,00
11,72	3,61	0,89	34,73	33,41	14,55	4,38	0,85	30,19	25,00
13,33	4,16	0,91	45,42	42,88	15,70	4,79	0,87	36,69	33,68
14,47	4,55	0,93	54,22	49,96	17,23	5,32	0,89	51,11	48,18
Тип 5; $d = 0,128$ м; $\xi_0 = 0,36$; $d_0 = 0,006$ м, $Z = 2$, $S_E = 1,52 \cdot 10^{-5}$ м ²					Тип 6; $d = 0,130$ м; $\xi_0 = 0,80$; $b = 0,02$ м; $b_l = 0,004$ м; $Z = 2$; $S_E = 5,23 \cdot 10^{-5}$ м ²				
$h_{ГС} = 0,1$ м, $n_0 = 6,22$ 1/с					$h_{ГС} = 0,17$ м, $n_0 = 5,22$ 1/с				
10,20	1,95	0,63	5,91	5,50	6,67	1,52	0,44	15,87	13,86
11,87	2,44	0,72	7,40	6,10	7,50	1,97	0,52	20,57	17,92
13,45	2,87	0,79	8,72	8,30	8,33	2,37	0,61	24,80	21,74
14,90	3,26	0,82	12,03	15,31	9,17	2,75	0,68	28,80	27,23
16,23	3,61	0,85	20,36	21,73	10,00	3,11	0,73	32,57	31,12
17,87	4,04	0,88	30,27	28,65	11,67	3,81	0,80	39,85	41,22
19,33	4,41	0,90	38,10	39,71	12,72	4,23	0,83	50,26	49,10
Примітка – V_P – розрахунок; V_E – експеримент									

Порівняння результатів розрахунку і експерименту

n , 1/с	$V_E \cdot 10^5$, м ³ /с	φ_n	φ_A	φ_A	φ_A	n , 1/с	$V_E \cdot 10^5$, м ³ /с	φ_n	φ_A	φ_A	φ_A
			1	2	експ.				1	2	експ.
			розрах.						розрах.		
Циліндрична; $d = 0,18$ м; $d_O = 0,006$ м; $S_E = 2,825 \cdot 10^{-5}$ м ² ; $Z = 2$											
$h = 0,1$ м, $H_I = 0,138$ м; $n_0 = 3,76$ 1/с						$h = 0,30$ м; $\tau = 4,05$ с; $n_0 = 6,24$ 1/с					
5,00	6,25	0,43	0,021	0,025	0,017	7,48	8,33	0,30	0,020	0,011	0,017
5,83	9,10	0,58	0,031	0,041	0,034	8,33	14,28	0,44	0,034	0,024	0,029
6,67	11,10	0,68	0,038	0,052	0,041	9,22	16,67	0,54	0,040	0,037	0,034
7,33	14,30	0,74	0,049	0,059	0,048	10,03	16,82	0,61	0,041	0,045	0,040
8,33	20,00	0,80	0,068	0,066	0,061	11,65	20,00	0,71	0,054	0,056	0,051
10,08	45,00	0,87	0,148	0,145	0,153	13,32	25,12	0,79	0,060	0,065	0,063
11,67	51,00	0,90	0,169	0,184	0,177	14,25	27,20	0,81	0,065	0,067	0,069
12,50	58,80	0,91	0,190	0,197	0,204	16,33	38,67	0,83	0,090	0,093	0,087
13,30	71,40	0,93	0,226	0,223	0,223	17,54	56,23	0,86	0,129	0,132	0,135
Циліндрична; $d = 0,10$ м; $d_O = 0,006$ м; $S_E = 0,93 \cdot 10^{-5}$ м ² ; $Z = 2$											
$h = 0,1$ м, $H_I = 0,138$ м; $n_0 = 5,19$ 1/с						$h = 0,1$ м, $H_I = 0,138$ м; $n_0 = 5,19$ 1/с					
6,68	1,80	0,40	0,006	0,009	0,07	9,17	0,22	0,12	0,001	0,000	0,001
7,55	2,22	0,53	0,008	0,016	0,010	10,02	2,13	0,26	0,006	0,003	0,006
8,37	3,33	0,61	0,012	0,019	0,012	10,88	3,33	0,37	0,010	0,008	0,010
10,10	6,25	0,74	0,022	0,025	0,021	11,73	6,67	0,46	0,016	0,012	0,015
11,65	8,33	0,80	0,026	0,028	0,028	12,52	7,80	0,53	0,020	0,016	0,016
12,53	11,10	0,83	0,038	0,054	0,043	13,32	8,33	0,58	0,021	0,018	0,018
14,20	19,80	0,86	0,066	0,087	0,075	14,20	10,00	0,63	0,025	0,020	0,023
Циліндрична; $d = 0,10$ м; $d_O = 0,006$ м; $S_E = 0,93 \cdot 10^{-5}$ м ² ; $Z = 4$											
$h = 0,10$ м; $H_I = 0,138$ м; $n_0 = 8,0,7$ 1/с						$h = 0,26$ м/ $H_I = 0,298$ м; $n_0 = 8,0,7$ 1/с					
6,66	2,65	0,39	0,009	0,018	0,014	9,76	3,75	0,32	0,010	0,013	0,011
8,17	7,50	0,60	0,026	0,037	0,042	11,08	11,10	0,47	0,029	0,027	0,026
9,13	10,30	0,68	0,035	0,045	0,048	12,52	14,20	0,64	0,036	0,039	0,042
11,00	14,30	0,78	0,049	0,054	0,052	14,31	15,60	0,68	0,048	0,042	0,045
13,33	35,43	0,85	0,118	0,132	0,123	16,15	18,30	0,75	0,058	0,056	0,052
14,10	44,87	0,86	0,148	0,158	0,140	18,10	25,10	0,80	0,064	0,063	0,058
Циліндрична; $d = 0,10$ м; $d_O = 0,055$ м; $S_E = 8,53 \cdot 10^{-5}$ м ² ; $Z = 2$											
$h = 0,09$ м; $H_I = 0,175$; $n_0 = 4,98$ 1/с						$h = 0,25$ м, $H_I = 0,335$; $n_0 = 7,90$ 1/с					
6,85	26,00	0,47	0,066	0,081	0,072	10,92	32,30	0,48	0,071	0,080	0,080
7,62	32,65	0,57	0,083	0,111	0,094	11,75	36,00	0,55	0,079	0,105	0,100
8,37	36,50	0,65	0,094	0,135	0,116	12,53	38,80	0,60	0,085	0,120	0,110
9,20	38,45	0,71	0,100	0,153	0,135	13,40	43,50	0,65	0,095	0,135	0,116
10,08	45,50	0,76	0,117	0,168	0,141	14,32	50,00	0,70	0,109	0,150	0,120
11,68	64,50	0,82	0,164	0,196	0,183	16,21	61,56	0,76	0,132	0,168	0,143
13,33	87,00	0,86	0,218	0,235	0,229	18,45	79,92	0,82	0,169	0,196	0,178

Продовження таблиці А2

n , 1/с	$V_E \cdot 10^5$, $M^3/с$	φ_n	φ_A	φ_A	φ_A	n , 1/с	$V_E \cdot 10^5$, $M^3/с$	φ_n	φ_A	φ_A	φ_A
			розрах.		експ.				розрах.		експ.
Циліндрична з вертикальними ребрами; $d = 0,068$ м; $d_O = 0,006$ м; $b = 0,026$ м; $S_E = 2,825 \cdot 10^{-5} M^2$; $Z = 2$											
$h = 0,07$ м; $H_I = 0,108$; $n_0 = 6,14$ 1/с						$h = 0,17$ м; $H_I = 0,208$; $n_0 = 9,06$ 1/с					
10,45	7,85	0,66	0,043	0,051	0,046	11,10	5,31	0,33	0,016	0,014	0,012
12,13	15,60	0,74	0,057	0,059	0,061	12,86	10,70	0,50	0,032	0,033	0,035
15,33	25,33	0,84	0,092	0,106	0,101	15,40	17,50	0,65	0,051	0,050	0,054
19,06	40,26	0,89	0,143	0,171	0,162	18,83	24,13	0,76	0,070	0,062	0,067
20,05	51,15	0,91	0,180	0,197	0,188	21,90	35,70	0,83	0,102	0,093	0,093
Циліндрична з горизонтальними пластинами; $d = 0,128$ м; $d_O = 0,006$ м; $S_E = 2,825 \cdot 10^{-5} M^2$; $Z = 2$											
$h = 0,1$ м; $H_I = 0,138$; $n_0 = 3,94$ 1/с						$h = 0,26$ м; $H_I = 0,298$; $n_0 = 6,09$ 1/с					
7,28	14,10	0,71	0,048	0,056	0,050	7,23	2,70	0,29	0,007	0,010	0,009
8,45	17,14	0,78	0,058	0,064	0,062	8,60	4,50	0,50	0,012	0,033	0,019
9,87	25,07	0,84	0,084	0,093	0,089	10,05	14,87	0,63	0,037	0,047	0,039
10,92	36,63	0,87	0,121	0,145	0,132	11,60	19,48	0,72	0,049	0,057	0,051
12,02	46,78	0,89	0,153	0,171	0,167	13,13	23,79	0,78	0,060	0,064	0,059
13,18	57,52	0,91	0,187	0,210	0,196	14,30	27,56	0,82	0,069	0,080	0,072
14,30	64,34	0,92	0,205	0,210	0,223	16,25	48,14	0,86	0,116	0,106	0,109
Щілинна; $d = 0,135$ м; $0,020 \times 0,004$ м; $S_E = 5,65 \cdot 10^{-5} M^2$; $Z = 2$											
$h = 0,09$ м; $H_I = 0,140$; $n_0 = 3,73$ 1/с						$h = 0,140$ м; $H_I = 0,190$; $n_0 = 4,54$ 1/с					
5,00	13,30	0,44	0,043	0,045	0,039	5,73	8,76	0,38	0,025	0,033	0,029
6,67	25,11	0,69	0,080	0,092	0,088	6,67	18,80	0,54	0,055	0,063	0,061
8,33	38,07	0,80	0,119	0,113	0,121	8,33	29,40	0,70	0,085	0,094	0,087
9,17	51,14	0,83	0,141	0,141	0,152	10,00	41,72	0,80	0,119	0,113	0,118
10,00	58,43	0,86	0,180	0,167	0,193	12,21	58,15	0,86	0,162	0,167	0,159

Експериментальні та розрахункові дані продуктивності самоусмоктуючих
мішалок по газовій фазі

Глибина занурення $h=0,08$ Діаметр мішалки $0,18$ м				
1	2	3	4	5
3,00	0	0,00	0,29	0,000
4,00	0,00003	0,01	0,52	0,051
5,50	0,00007	0,03	0,98	0,304
8,00	0,00020	0,11	2,07	2,261
10,00	0,00036	0,18	3,24	7,325
12,40	0,00058	0,23	4,98	19,455
Діаметр мішалки $0,168$ м				
1	2	3	4	5
3,00	0	0,00	0,29	0,000
4,50	0,000013	0,01	0,66	0,010
5,50	0,000053	0,03	0,98	0,161
7,50	0,00014	0,11	1,82	1,108
8,50	0,00020	0,18	2,34	2,261
10,50	0,00033	0,23	3,57	6,279
11,50	0,00044	0,23	4,28	11,278
13,00	0,00058	0,23	5,48	19,455
Діаметр мішалки $0,126$ м				
1	2	3	4	5
5,00	0	0,00	0,81	0,000
9,50	0,000067	0,01	2,92	0,251
10,50	0,000087	0,03	3,57	0,425
12,70	0,00014	0,11	5,23	1,108
14,00	0,00018	0,18	6,35	1,831
Діаметр мішалки $0,065$ м				
1	2	3	4	5
5,00	0,00	0,00	0,81	0,000
9,50	0,000013	0,01	2,92	0,010
10,50	0,000020	0,03	3,57	0,023
14,00	0,000047	0,11	6,35	0,123

Продовження таблиці А3

d _b =0,006 м, b=0,008 м, d _м =0,18 м Глибина занурення мішалки 0,1 м				
1	2	3	4	5
4,17	0,000012	0,01	0,56	0,009
5,00	0,000045	0,03	0,81	0,114
5,83	0,000091	0,11	1,10	0,466
6,67	0,00011	0,18	1,44	0,684
7,50	0,00014	0,23	1,82	1,140
8,33	0,00020	0,29	2,25	2,261
9,17	0,00028	0,36	2,72	4,591
10,00	0,00037	0,42	3,24	7,000
10,83	0,00045	0,48	3,80	10,450
11,67	0,00050	0,53	4,41	14,130
12,50	0,00058	0,57	5,06	19,555
13,33	0,00071	0,62	5,76	28,830
Глибина занурення мішалки 0,15 м				
1	2	3	4	5
5,78	0,000061	0,03	1,08	0,210
6,73	0,00010	0,07	1,47	0,577
7,55	0,00012	0,10	1,85	0,883
8,33	0,00016	0,13	2,25	1,447
9,20	0,00020	0,18	2,74	2,261
10,03	0,00025	0,23	3,26	3,533
10,85	0,00029	0,30	3,81	4,753
11,68	0,00033	0,37	4,42	6,267
12,50	0,00041	0,42	5,06	9,501
13,35	0,00051	0,46	5,77	14,701
Глибина занурення мішалки 0,20 м				
1	2	3	4	5
5,80	0,00002	0,02	1,09	0,023
6,72	0,000075	0,04	1,46	0,318
7,57	0,00010	0,08	1,86	0,623
8,38	0,00014	0,10	2,28	1,188
9,17	0,00017	0,13	2,72	1,633
10,00	0,00020	0,20	3,24	2,261
10,80	0,00022	0,24	3,78	2,861
11,68	0,00025	0,30	4,42	3,533
12,53	0,00029	0,34	5,09	4,753
13,30	0,00033	0,42	5,73	6,267
14,18	0,00040	0,46	6,51	9,043

Продовження таблиці А3

Глибина занурення мішалки 0,25 м				
1	2	3	4	5
6,72	0,00005	0,04	1,46	0,141
7,47	0,00007	0,08	1,81	0,277
8,40	0,000112	0,10	2,29	0,709
9,15	0,00013	0,12	2,71	0,955
10,00	0,00017	0,15	3,24	1,557
10,80	0,00020	0,17	3,78	2,261
11,67	0,00023	0,20	4,41	2,861
12,53	0,00025	0,25	5,09	3,533
13,37	0,00029	0,29	5,79	4,753
14,15	0,00033	0,33	6,49	6,155
15,05	0,00041	0,40	7,34	9,501

Експериментальні та розрахункові величини об'ємних витрат по газу
самоусмоктуючих мішалок

Мішалка з вертикально розташованими лопатями, ежекційною перегородкою та пробкою

n, с ⁻¹	V _г , м ³ /с	V _г /nd ³	φ	φ ₀	Re	Fr	N, Вт
1	2	3	4	5	6	7	8
D _м =0,13 м; H _ж =0,21 м; h _п =0,18 м							
1	2	3	4	5	6	7	8
6,67	0,00013	0,00793	0,300	0,583	10730,16	0,590	11,94
7,50	0,00020	0,01084	0,307	0,591	12071,43	0,746	16,02
8,33	0,00025	0,01219	0,311	0,596	13412,70	0,921	18,00
9,17	0,00030	0,01330	0,323	0,609	14753,97	1,115	24,00
10,83	0,00037	0,01407	0,338	0,625	17436,51	1,557	32,40
11,67	0,00042	0,01481	0,344	0,632	18777,78	1,806	36,00
12,50	0,00047	0,01528	0,358	0,648	20119,05	2,073	45,00
13,33	0,00052	0,01585	0,364	0,654	21460,32	2,358	48,00
D _м =0,13 м; H _ж =0,17 м; h _п =0,12 м							
1	2	3	4	5	6	7	8
5,83	0,00013	0,01014	0,298	0,580	9388,89	0,451	9,53
6,67	0,00020	0,01365	0,309	0,593	10730,16	0,590	13,52
8,33	0,00030	0,01655	0,315	0,599	13412,70	0,921	16,28
9,17	0,00038	0,01887	0,328	0,615	14753,97	1,115	21,31
10,00	0,00043	0,01957	0,341	0,629	16095,24	1,327	26,08
10,83	0,00050	0,02101	0,346	0,635	17436,51	1,557	28,27
11,67	0,00056	0,02167	0,358	0,648	18777,78	1,806	33,19
12,50	0,00060	0,02185	0,386	0,678	20119,05	2,073	43,06
13,33	0,00065	0,02209	0,393	0,685	21460,32	2,358	46,59
D _м =0,13 м; H _ж =0,14 м; h _п =0,075 м							
1	2	3	4	5	6	7	8
5,00	0,00013	0,01187	0,275	0,553	8047,62	0,332	6,28
5,83	0,00019	0,01463	0,286	0,566	9388,89	0,451	8,70
6,67	0,00024	0,01626	0,293	0,574	10730,16	0,590	10,68
7,50	0,00031	0,01897	0,303	0,587	12071,43	0,746	13,43
8,33	0,00038	0,02101	0,317	0,602	13412,70	0,921	15,97
9,17	0,00045	0,02257	0,327	0,614	14753,97	1,115	18,58
10,00	0,00050	0,02276	0,349	0,638	16095,24	1,327	24,36
10,83	0,00056	0,02334	0,386	0,678	17436,51	1,557	33,00

Експериментальні та розрахункові величини об'ємних витрат по газу
самоусмоктуючих мішалок

Мішалка з вертикально розташованими лопатями, ежекційна перегородка

n, c ⁻¹	V _г , м ³ /с	V _г /nd ³	φ	φ ₀	Re	Fr	N, Вт
1	2	3	4	5	6	7	8
D _м =0,13 м; H _ж =0,21 м; h _п =0,18 м							
1	2	3	4	5	6	7	8
5,00	0	0	0,000	0,000	8047,62	0,332	11,62
5,83	0,00005	0,004	0,278	0,557	9388,89	0,451	14,66
6,67	0,00012	0,0082	0,288	0,569	10730,16	0,590	18,77
7,50	0,00019	0,0115	0,307	0,591	12071,43	0,746	18,14
8,33	0,00023	0,0124	0,311	0,596	13412,70	0,921	21,73
9,17	0,00025	0,0124	0,318	0,604	14753,97	1,115	25,8
10,00	0,00028	0,0126	0,325	0,611	16095,24	1,327	30,79
10,83	0,00027	0,0115	0,340	0,628	17436,51	1,557	34,71
D _м =0,13 м; H _ж =0,17 м; h _п =0,12 м							
1	2	3	4	5	6	7	8
4,58	0	0	0,000	0,000	7376,98	0,279	8,06
5,33	0,00005	0,0044	0,295	0,576	8584,13	0,377	11,9
5,83	0,00009	0,007	0,306	0,590	9388,89	0,451	14,66
6,67	0,00016	0,0108	0,317	0,603	10730,16	0,590	14,24
7,50	0,00022	0,0135	0,323	0,609	12071,43	0,746	16,45
8,33	0,00027	0,0149	0,328	0,615	13412,70	0,921	19,9
9,17	0,00030	0,0147	0,346	0,635	14753,97	1,115	23,04
10,00	0,00031	0,0141	0,358	0,648	16095,24	1,327	26,08
D _м =0,13 м; H _ж =0,14 м; h _п =0,075 м							
1	2	3	4	5	6	7	8
4,33	0,00001	0,0008	0,267	0,543	6974,60	0,249	6,85
5,00	0,00009	0,0085	0,286	0,566	8047,62	0,332	8,48
5,83	0,00017	0,0136	0,296	0,579	9388,89	0,451	10,08
6,67	0,00022	0,015	0,300	0,583	10730,16	0,590	12,15
7,50	0,00029	0,0176	0,310	0,595	12071,43	0,746	15,32
8,33	0,00032	0,0175	0,317	0,602	13412,70	0,921	18,27
9,17	0,00036	0,0181	0,330	0,617	14753,97	1,115	21,31
10,00	0,00036	0,0164	0,349	0,638	16095,24	1,327	25,13

Експериментальні та розрахункові величини об'ємних витрат по газу
самоусмоктуючих мішалок

Мішалка з вертикально розташованими лопатями та пробкою

n, c^{-1}	$V_r, M^3/c$	V_r/nd^3	φ	φ_0	Re	Fr	N, Вт
1	2	3	4	5	6	7	8
$D_M=0,13 \text{ м}; H_{ж}=0,21 \text{ м}; h_{п}=0,18 \text{ м}$							
1	2	3	4	5	6	7	8
5,83	0,00003	0,0021	0,181	0,430	9388,89	0,451	13,56
6,67	0,00013	0,0089	0,192	0,446	10730,16	0,590	12,15
7,50	0,00020	0,0121	0,203	0,461	12071,43	0,746	14,37
8,33	0,00024	0,013	0,208	0,468	13412,70	0,921	19,37
9,17	0,00029	0,0144	0,218	0,481	14753,97	1,115	22,17
10,00	0,00032	0,0146	0,226	0,491	16095,24	1,327	26,08
10,83	0,00036	0,0151	0,238	0,507	17436,51	1,557	31,31
$D_M=0,13 \text{ м}; H_{ж}=0,17 \text{ м}; h_{п}=0,12 \text{ м}$							
1	2	3	4	5	6	7	8
4,67	0,00003	0,0002	0,295	0,576	7511,11	0,289	7,95
5,83	0,00013	0,0101	0,306	0,590	9388,89	0,451	9,53
6,67	0,00020	0,0137	0,315	0,599	10730,16	0,590	11,52
7,50	0,00025	0,0152	0,320	0,606	12071,43	0,746	13,67
8,33	0,00029	0,0161	0,333	0,621	13412,70	0,921	17,8
9,17	0,00035	0,0174	0,344	0,632	14753,97	1,115	21,31
10,00	0,00040	0,0182	0,358	0,648	16095,24	1,327	25,13
$D_M=0,13 \text{ м}; H_{ж}=0,14 \text{ м}; h_{п}=0,075 \text{ м}$							
1	2	3	4	5	6	7	8
4,67	0,00003	0,0002	0,295	0,576	7511,11	0,289	7,95
5,83	0,00013	0,0101	0,306	0,590	9388,89	0,451	9,53
6,67	0,00020	0,0137	0,315	0,599	10730,16	0,590	11,52
7,50	0,00025	0,0152	0,320	0,606	12071,43	0,746	13,67
8,33	0,00029	0,0161	0,333	0,621	13412,70	0,921	17,8
9,17	0,00035	0,0174	0,344	0,632	14753,97	1,115	21,31
10,00	0,00040	0,0182	0,358	0,648	16095,24	1,327	25,13

Експериментальні та розрахункові величини об'ємних витрат по газу
самоусмоктуючих мішалок

Мішалка з лопатями розташованими під кутом 60° , ежекційною перегородкою і пробкою

n, c ⁻¹	V _г , м ³ /с	V _г /nd ³	φ	φ ₀	Re	Fr	N, Вт
1	2	3	4	5	6	7	8
D _м =0,13 м; H _ж =0,21 м; h _п =0,18 м							
1	2	3	4	5	6	7	8
5,42	0,00002	0	0,405	0,697	8718,25	0,389	13,1
6,67	0,00015	0,0105	0,429	0,722	10730,16	0,590	15,92
8,33	0,00022	0,0121	0,476	0,769	13412,70	0,921	21,47
10,00	0,00029	0,013	0,524	0,814	16095,24	1,327	30,79
11,67	0,00038	0,0146	0,533	0,823	18777,78	1,806	38,48
13,33	0,00050	0,0171	0,571	0,858	21460,32	2,358	54,37
D _м =0,13 м; H _ж =0,17 м; h _п =0,12 м							
1	2	3	4	5	6	7	8
4,67	0,00002	0	0,292	0,573	7511,11	0,289	9,4
5,83	0,00010	0,0078	0,292	0,573	9388,89	0,451	10,63
6,67	0,00017	0,0119	0,320	0,606	10730,16	0,590	12,78
8,33	0,00027	0,0149	0,331	0,618	13412,70	0,921	18,33
10,00	0,00033	0,0152	0,351	0,640	16095,24	1,327	25,13
11,67	0,00046	0,0179	0,370	0,661	18777,78	1,806	35,19
12,50	0,00056	0,0204	0,382	0,673	20119,05	2,073	44,77
D _м =0,13 м; H _ж =0,14 м; h _п =0,075 м							
1	2	3	4	5	6	7	8
4,17	0,00002	0	0,000	0,000	6706,35	0,230	7,2
5,00	0,00009	0,0083	0,000	0,000	8047,62	0,332	8,17
5,83	0,00015	0,0117	0,000	0,000	9388,89	0,451	10,08
6,67	0,00022	0,0152	0,310	0,595	10730,16	0,590	11,73
7,50	0,00025	0,0152	0,317	0,602	12071,43	0,746	13,67
8,33	0,00029	0,0156	0,333	0,621	13412,70	0,921	17,02
10,00	0,00038	0,0173	0,343	0,631	16095,24	1,327	24,19
11,67	0,00048	0,0187	0,364	0,654	18777,78	1,806	29,32

Експериментальні та розрахункові величини об'ємних витрат по газу
самоусмоктуючих мішалок

Мішалка з лопатями розташованими під кутом 60° та ежекційною
перегородкою

n, c^{-1}	$V_r, m^3/c$	V_r/nd^3	φ	φ_0	Re	Fr	N, Вт
1	2	3	4	5	6	7	8
$D_M=0,13 \text{ м}; H_J=0,21 \text{ м}; h_{П}=0,18 \text{ м}$							
1	2	3	4	5	6	7	8
6,00	0,00002	0	0,145	0,377	9657,14	0,478	19,1
6,67	0,00006	0,0041	0,157	0,395	10730,16	0,590	21,36
8,33	0,00017	0,0091	0,176	0,423	13412,70	0,921	29,32
10,00	0,00020	0,0091	0,181	0,430	16095,24	1,327	35,81
10,83	0,00022	0,0092	0,198	0,455	17436,51	1,557	40,09
11,67	0,00024	0,0094	0,207	0,466	18777,78	1,806	46,18
12,50	0,00025	0,0091	0,207	0,466	20119,05	2,073	51,84
$D_M=0,13 \text{ м}; H_J=0,17 \text{ м}; h_{П}=0,12 \text{ м}$							
1	2	3	4	5	6	7	8
4,67	0,00002	0	0,414	0,707	7511,11	0,289	11,15
5,83	0,00008	0,0059	0,414	0,707	9388,89	0,451	16,42
6,67	0,00014	0,0096	0,428	0,721	10730,16	0,590	18,85
8,33	0,00021	0,0115	0,439	0,732	13412,70	0,921	24,09
10,00	0,00024	0,0109	0,446	0,739	16095,24	1,327	32,67
11,67	0,00027	0,0105	0,455	0,748	18777,78	1,806	42,52
12,50	0,00029	0,0106	0,465	0,758	20119,05	2,073	51,44
$D_M=0,13 \text{ м}; H_J=0,14 \text{ м}; h_{П}=0,075 \text{ м}$							
1	2	3	4	5	6	7	8
4,17	0,00002	0	0,417	0,710	6706,35	0,230	7,98
5,00	0,00005	0,0046	0,417	0,710	8047,62	0,332	11,15
6,67	0,00017	0,0114	0,429	0,722	10730,16	0,590	15,5
8,33	0,00023	0,0126	0,455	0,748	13412,70	0,921	20,94
10,00	0,00027	0,0123	0,462	0,755	16095,24	1,327	27,02
11,67	0,00031	0,0121	0,472	0,765	18777,78	1,806	33,72

Експериментальні та розрахункові величини об'ємних витрат по газу
самоусмоктуючих мішалок

Мішалка з лопатями розташованими під кутом 60° та пробкою

n, c ⁻¹	V _г , м ³ /с	V _г /nd ³	φ	φ ₀	Re	Fr	N, Вт
1	2	3	4	5	6	7	8
D _м =0,13 м; H _ж =0,21 м; h _п =0,18 м							
1	2	3	4	5	6	7	8
6,67	0,00010	0,0068	0,162	0,403	10730,16	0,590	14,87
7,50	0,00018	0,0109	0,169	0,413	12071,43	0,746	15,08
8,33	0,00023	0,0126	0,176	0,423	13412,70	0,921	18,33
9,17	0,00028	0,0139	0,185	0,436	14753,97	1,115	23,04
10,00	0,00033	0,0152	0,190	0,442	16095,24	1,327	26,08
10,83	0,00038	0,0158	0,198	0,455	17436,51	1,557	30,49
11,67	0,00042	0,0164	0,209	0,469	18777,78	1,806	35,92
12,50	0,00046	0,0168	0,213	0,475	20119,05	2,073	40,84
D _м =0,13 м; H _ж =0,17 м; h _п =0,12 м							
1	2	3	4	5	6	7	8
5,00	0,00003	0	0,385	0,282	8047,62	0,332	9,11
5,83	0,00012	0,0094	0,389	0,284	9388,89	0,451	9,53
6,67	0,00020	0,0137	0,392	0,285	10730,16	0,590	11,52
7,50	0,00025	0,0152	0,395	0,287	12071,43	0,746	13,43
8,33	0,00030	0,0164	0,400	0,289	13412,70	0,921	16,76
9,17	0,00034	0,0169	0,403	0,290	14753,97	1,115	20,73
10,00	0,00040	0,0182	0,412	0,294	16095,24	1,327	25,13
10,83	0,00044	0,0185	0,415	0,295	17436,51	1,557	29,27
11,67	0,00048	0,0187	0,422	0,298	18777,78	1,806	33,72
D _м =0,13 м; H _ж =0,14 м; h _п =0,075 м							
1	2	3	4	5	6	7	8
5,00	0,00009	0,0082	0,358	0,270	8047,62	0,332	7,07
5,83	0,00018	0,014	0,362	0,272	9388,89	0,451	8,91
6,67	0,00025	0,0171	0,367	0,274	10730,16	0,590	11,52
8,33	0,00040	0,0218	0,373	0,277	13412,70	0,921	16,76
9,17	0,00045	0,0226	0,383	0,281	14753,97	1,115	19,58
10,00	0,00050	0,0228	0,387	0,283	16095,24	1,327	24,19
10,83	0,00054	0,0227	0,395	0,286	17436,51	1,557	27,91
11,67	0,00057	0,0222	0,414	0,294	18777,78	1,806	32,84
12,50	0,00059	0,0215	0,424	0,299	20119,05	2,073	36,13
13,33	0,00062	0,0212	0,441	0,306	21460,32	2,358	42,73

Експериментальні та розрахункові величини об'ємних витрат по газу
самоусмоктуючих мішалок

n, с-1	V_{Γ} , м ³ /с	V_{Γ}/nd^3	φ	$\varphi_{розр}$	φ_0	Re	Fr
1	2	3	4		5	6	7
$D_{ан}=0,15$ м; $d_M=0,12$ м; $h_3=0,145$ м							
1	2	3	4	5	6	7	8
4,30	0,000005	0,00035	0,020	0,019	0,07	8610,24	0,127
5,93	0,000054	0,00299	0,030	0,027	0,17	11880,79	0,176
6,68	0,000087	0,00428	0,040	0,036	0,24	13382,58	0,198
7,53	0,000112	0,00488	0,100	0,097	0,45	15084,60	0,223
8,33	0,000145	0,00571	0,094	0,080	0,52	16686,51	0,247
9,27	0,000181	0,00641	0,104	0,083	0,55	18555,40	0,274
10,05	0,000221	0,00721	0,121	0,087	0,6	20123,93	0,297
10,88	0,000265	0,00799	0,147	0,140	0,64	21792,58	0,322
11,77	0,000340	0,00948	0,180	0,167	0,65	23561,35	0,348
12,60	0,000390	0,01015	0,190	0,173	0,7	25230,00	0,373
13,43	0,000463	0,01131	0,200	0,184	0,72	26898,65	0,398
14,27	0,000481	0,01106	0,216	0,203	0,73	28567,30	0,422
15,13	0,000555	0,01203	0,237	0,230	0,74	30302,70	0,448
15,92	0,000588	0,01212	0,256	0,223	0,75	31871,23	0,471
16,67	0,000625	0,01230	0,267	0,259	0,77	33373,02	0,493
17,60	0,000667	0,01243	0,267	0,243	0,78	35241,90	0,521
18,42	0,000699	0,01245	0,275	0,248	0,78	36877,18	0,545
19,33	0,000730	0,01239	0,293	0,278	0,78	38712,70	0,572
20,03	0,000725	0,01187	0,293	0,310	0,79	40114,37	0,593
20,97	0,000730	0,01142	0,290	0,320	0,79	41983,25	0,620
21,82	0,000735	0,01105	0,290	0,340	0,79	43685,28	0,646
22,58	0,000735	0,01068	0,300	0,358	0,79	45220,44	0,668
23,37	0,000735	0,01032	0,310	0,371	0,79	46788,97	0,691

Дап=0,15м; dм=0,12 м; hп=0,2 м							
1	2	3	4	5	6	7	8
5,67	0,000019	0,00041	0,010	0,010	0,04	21587,30	0,231
6,57	0,000046	0,00087	0,020	0,018	0,14	25015,87	0,268
7,58	0,000096	0,00159	0,034	0,031	0,25	28888,89	0,310
8,40	0,000128	0,00190	0,043	0,042	0,35	32000,00	0,343
9,30	0,000158	0,00212	0,057	0,048	0,42	35428,57	0,380
10,00	0,000181	0,00226	0,065	0,052	0,42	38095,24	0,408
10,75	0,000212	0,00247	0,078	0,056	0,61	40952,38	0,439
11,78	0,000284	0,00301	0,100	0,095	0,64	44888,89	0,481
12,48	0,000312	0,00312	0,107	0,100	0,65	47555,56	0,510
13,33	0,000379	0,00355	0,140	0,127	0,7	50793,65	0,544
14,20	0,000427	0,00376	0,160	0,147	0,71	54095,24	0,580
14,97	0,000500	0,00418	0,170	0,160	0,73	57015,87	0,611
15,83	0,000518	0,00409	0,167	0,162	0,72	60317,46	0,646
16,80	0,000599	0,00446	0,174	0,151	0,72	64000,00	0,686
17,57	0,000610	0,00434	0,180	0,175	0,75	66920,63	0,717
18,45	0,000640	0,00434	0,190	0,173	0,77	70285,71	0,753
19,20	0,000676	0,00440	0,210	0,189	0,79	73142,86	0,784
20,00	0,000694	0,00434	0,213	0,202	0,79	76190,48	0,816
20,88	0,000704	0,00421	0,230	0,219	0,79	79555,56	0,852
21,83	0,000709	0,00406	0,240	0,228	0,79	83174,60	0,891
22,17	0,000720	0,00406	0,250	0,238	0,79	84444,44	0,905
23,00	0,000720	0,00391	0,260	0,242	0,79	87619,05	0,939
23,50	0,000720	0,00383	0,260	0,247	0,79	89523,81	0,959

Продовження таблиці А10

D _{ан} =0,15 м; d _м =0,12 м; h _п =0,24 м							
1	2	3	4	5	6	7	8
6,70	0,000023	0,00025	0,016	0,015	0,06	36754,29	0,328
7,40	0,000051	0,00050	0,031	0,028	0,1	40594,29	0,362
8,38	0,000092	0,00079	0,061	0,055	0,22	45988,57	0,411
9,20	0,000132	0,00104	0,070	0,068	0,3	50468,57	0,451
10,00	0,000159	0,00115	0,080	0,068	0,35	54857,14	0,490
11,00	0,000192	0,00126	0,089	0,071	0,47	60342,86	0,539
11,70	0,000220	0,00136	0,098	0,071	0,45	64182,86	0,573
12,45	0,000270	0,00157	0,102	0,097	0,5	68297,14	0,610
13,40	0,000320	0,00173	0,115	0,107	0,5	73508,57	0,656
14,33	0,000396	0,00200	0,127	0,116	0,55	78628,57	0,702
15,00	0,000420	0,00203	0,147	0,135	0,6	82285,71	0,735
16,07	0,000490	0,00221	0,174	0,164	0,6	88137,14	0,787
16,92	0,000510	0,00218	0,192	0,186	0,65	92800,00	0,829
17,67	0,000560	0,00229	0,203	0,177	0,62	96914,29	0,865
18,53	0,000595	0,00232	0,209	0,203	0,65	101668,57	0,908
19,47	0,000610	0,00227	0,219	0,209	0,7	106788,57	0,953
20,00	0,000640	0,00231	0,229	0,206	0,75	109714,29	0,980
21,07	0,000645	0,00221	0,236	0,224	0,77	115565,71	1,032
21,83	0,000670	0,00222	0,242	0,230	0,8	119771,43	1,069
22,57	0,000690	0,00221	0,254	0,241	0,8	123794,29	1,105
23,43	0,000710	0,00219	0,260	0,247	0,75	128548,57	1,148
24,53	0,000714	0,00211	0,272	0,263	0,8	134582,86	1,202

Продовження таблиці А10

D _{ан} =0,15 м; d _м =0,12 м; h _з =0,3 м							
1	2	3	4	5	6	7	8
7,50	0,000078	0,00039	0,040	0,038	0,15	64285,71	0,459
8,37	0,000140	0,00062	0,055	0,050	0,2	71714,29	0,512
9,20	0,000190	0,00076	0,079	0,071	0,25	78857,14	0,563
10,07	0,000230	0,00085	0,078	0,076	0,28	86285,71	0,616
10,92	0,000280	0,00095	0,100	0,085	0,32	93571,43	0,668
11,67	0,000330	0,00105	0,104	0,083	0,35	100000,00	0,714
12,57	0,000370	0,00109	0,124	0,089	0,37	107714,29	0,769
13,40	0,000440	0,00122	0,135	0,128	0,4	114857,14	0,820
14,20	0,000540	0,00141	0,140	0,130	0,44	121714,29	0,869
15,05	0,000590	0,00145	0,160	0,146	0,52	129000,00	0,921
15,92	0,000650	0,00151	0,180	0,166	0,58	136428,57	0,974
16,77	0,000690	0,00152	0,180	0,169	0,6	143714,29	1,027
17,58	0,000770	0,00162	0,200	0,194	0,62	150714,29	1,077
18,40	0,000830	0,00167	0,230	0,200	0,64	157714,29	1,127
19,23	0,000870	0,00168	0,250	0,243	0,66	164857,14	1,178
20,03	0,000930	0,00172	0,250	0,228	0,65	171714,29	1,227
20,95	0,001000	0,00177	0,270	0,243	0,7	179571,43	1,283
21,70	0,001000	0,00171	0,280	0,266	0,72	186000,00	1,329
22,53	0,001060	0,00174	0,280	0,266	0,74	193142,86	1,380
23,50	0,001110	0,00175	0,300	0,285	0,75	201428,57	1,439
24,30	0,001250	0,00191	0,326	0,310	0,76	208285,71	1,488

Експериментальні та розрахункові величини об'ємних витрат по газу та рідині
самоусмоктуючої мішалки

n, с-1	$V_r, \text{M}^3/\text{с}$	$V_p, \text{M}^3/\text{с}$	V_r/nd^3	φ	φ_0	Re	Fr
1	2	3	4	5	6	7	8
$D_{an}=0,15 \text{ м}; d_m=0,06 \text{ м}; h_3=0,06 \text{ м}$							
1	2	3	4	5	6	7	8
10,83	9,17E-05	1,950	0,039174	0,143	0,373	3714,29	0,719
11,67	0,000138	2,145	0,054894	0,167	0,410	4000,00	0,833
12,50	0,0002	2,438	0,074074	0,200	0,457	4285,71	0,957
13,33	0,000203	2,730	0,070602	0,231	0,498	4571,43	1,088
14,17	0,000227	2,925	0,074074	0,250	0,522	4857,14	1,229
15,00	0,000253	3,120	0,078189	0,231	0,498	5142,86	1,378
15,83	0,00027	3,062	0,078947	0,231	0,498	5428,57	1,535
16,67	0,000293	3,062	0,081481	0,231	0,498	5714,29	1,701
18,33	0,000333	3,413	0,084175	0,259	0,534	6285,71	2,058
20,00	0,000373	3,773	0,08642	0,302	0,585	6857,14	2,449
21,67	0,000417	3,998	0,089031	0,355	0,644	7428,57	2,874
23,33	0,000455	4,193	0,090278	0,412	0,705	8000,00	3,333
25,00	0,000432	4,427	0,079938	0,464	0,757	8571,43	3,827
26,67	0,0005	4,680	0,086806	0,528	0,818	9142,86	4,354
28,33	0,000555	4,875	0,090686	0,556	0,843	9714,29	4,915
30,00	0,000562	5,168	0,086677	0,571	0,858	10285,71	5,510
$D_{an}=0,15 \text{ м}; d_m=0,06 \text{ м}; h_3=0,08 \text{ м}$							
1	2	3	4	5	6	7	8
12,50	0,000102	2,145	0,037654	0,111	0,321	4285,71	0,957
13,33	0,000185	2,438	0,064236	0,111	0,321	4571,43	1,088
14,17	0,0002	2,633	0,065359	0,111	0,321	4857,14	1,229
15,00	0,000247	2,730	0,076132	0,130	0,354	5142,86	1,378
15,83	0,000258	2,925	0,075536	0,158	0,396	5428,57	1,535
16,67	0,000303	3,062	0,084259	0,158	0,396	5714,29	1,701
18,33	0,000313	3,413	0,078914	0,158	0,396	6285,71	2,058
20,00	0,000333	3,998	0,07716	0,192	0,446	6857,14	2,449
21,67	0,000385	4,193	0,082265	0,200	0,457	7428,57	2,874
23,33	0,000417	4,427	0,082672	0,259	0,534	8000,00	3,333
25,00	0,000463	4,485	0,085802	0,304	0,588	8571,43	3,827
26,67	0,00048	4,680	0,083333	0,385	0,676	9142,86	4,354
28,33	0,00051	4,875	0,083333	0,412	0,705	9714,29	4,915
30,00	0,000555	5,070	0,085648	0,429	0,722	10285,71	5,510

D _{ан} =0,15 м; d _м =0,06 м; h ₃ =0,1 м							
1	2	3	4	5	6	7	8
13,33	8,67E-05	2,340	0,030093	0,074	0,252	4571,43	1,088
14,17	0,000152	2,340	0,049564	0,091	0,285	4857,14	1,229
15,00	0,000202	2,633	0,062243	0,091	0,285	5142,86	1,378
15,83	0,000213	2,828	0,062378	0,091	0,285	5428,57	1,535
16,67	0,000272	3,120	0,075463	0,091	0,285	5714,29	1,701
18,33	0,000293	3,315	0,074074	0,130	0,354	6285,71	2,058
20,00	0,000307	3,647	0,070988	0,130	0,354	6857,14	2,449
21,67	0,000333	3,900	0,071225	0,167	0,410	7428,57	2,874
23,33	0,000378	4,095	0,075066	0,180	0,429	8000,00	3,333
25,00	0,000417	4,290	0,07716	0,200	0,457	8571,43	3,827
26,67	0,00048	4,485	0,083333	0,231	0,498	9142,86	4,354
28,33	0,000543	4,739	0,08878	0,259	0,534	9714,29	4,915
D _{ан} =0,15 м; d _м =0,06 м; h ₃ =0,12 м							
1	2	3	4	5	6	7	8
15,00	0,000102	2,633	0,031379	0,063	0,227	5142,86	1,378
15,83	0,000138	2,672	0,040448	0,063	0,227	5428,57	1,535
16,67	0,000222	2,828	0,061574	0,077	0,258	5714,29	1,701
18,33	0,000275	2,984	0,069444	0,098	0,297	6285,71	2,058
20,00	0,000305	3,354	0,070602	0,111	0,321	6857,14	2,449
21,67	0,000333	3,773	0,071225	0,111	0,321	7428,57	2,874
23,33	0,000333	4,095	0,066138	0,111	0,321	8000,00	3,333
25,00	0,000397	4,232	0,073457	0,143	0,373	8571,43	3,827
26,67	0,000455	4,739	0,078993	0,143	0,373	9142,86	4,354
D _{ан} =0,15 м; d _м =0,08 м; h ₃ =0,14 м							
1	2	3	4	5	6	7	8
11,67	0,00025	2,048	0,041295	0,200	0,457	7111,11	1,111
13,33	0,00029	2,438	0,04248	0,294	0,576	8126,98	1,451
15,00	0,00033	2,730	0,042318	0,368	0,659	9142,86	1,837
16,67	0,00036	2,925	0,042383	0,400	0,692	10158,73	2,268
18,33	0,00042	3,315	0,044389	0,520	0,811	11174,60	2,744
20,00	0,00048	3,705	0,046875	0,556	0,843	12190,48	3,265
21,67	0,00050	3,900	0,045072	0,556	0,843	13206,35	3,832
23,33	0,00053	4,290	0,044503	0,571	0,858	14222,22	4,444
25,00	0,00058	4,583	0,045443	0,600	0,883	15238,10	5,102
26,67	0,00061	4,875	0,044678	0,615	0,897	16253,97	5,805
28,33	0,00064	5,070	0,044233	0,636	0,915	17269,84	6,553
30,00	0,00066	5,363	0,04286	0,647	0,924	18285,71	7,347

Продовження таблиці А11

D _{ан} =0,15 м; d _м =0,08 м; h ₃ =0,08 м								
1	2	3	4	5	6	7	8	9
11,67	0,00024	1,83	2,145	0,0399	0,091	0,285	7111,11	1,111
13,33	0,00031	2,08	2,438	0,044922	0,158	0,396	8126,98	1,451
15,00	0,00032	2,33	2,730	0,04145	0,200	0,457	9142,86	1,837
16,67	0,00035	2,5	2,925	0,041211	0,238	0,507	10158,73	2,268
18,33	0,00040	2,75	3,218	0,042259	0,304	0,588	11174,60	2,744
20,00	0,00045	2,92	3,413	0,04362	0,360	0,650	12190,48	3,265
21,67	0,00050	3,25	3,803	0,045072	0,429	0,722	13206,35	3,832
23,33	0,00052	3,58	4,193	0,043666	0,500	0,792	14222,22	4,444
25,00	0,00057	3,83	4,485	0,044401	0,543	0,832	15238,10	5,102
26,67	0,00060	4,17	4,875	0,043579	0,543	0,832	16253,97	5,805
D _{ан} =0,15 м; d _м =0,08 м; h ₃ =0,1 м								
1	2	3	4	5	6	7	8	9
11,67	0,00017	1,75	2,048	0,027623	0,091	0,285	7111,11	1,111
13,33	0,00027	2,08	2,438	0,039795	0,130	0,354	8126,98	1,451
15,00	0,00029	2,42	2,828	0,03776	0,167	0,410	9142,86	1,837
16,67	0,00033	2,50	2,925	0,039063	0,200	0,457	10158,73	2,268
18,33	0,00036	2,75	3,218	0,037997	0,231	0,498	11174,60	2,744
20,00	0,00039	2,92	3,413	0,037923	0,259	0,534	12190,48	3,265
21,67	0,00042	3,25	3,803	0,038161	0,355	0,644	13206,35	3,832
23,33	0,00048	3,58	4,193	0,0399	0,412	0,705	14222,22	4,444
25,00	0,00050	3,83	4,485	0,039063	0,444	0,738	15238,10	5,102
26,67	0,00052	4,17	4,875	0,03772	0,459	0,753	16253,97	5,805
D _{ан} =0,15 м; d _м =0,08 м; h ₃ =0,12 м								
1	2	3	4	5	6	7	8	9
13,33	0,00010	4,58	5,363	0,014648	0,040	0,174	8126,98	1,451
15,00	0,00011	4,58	5,363	0,013824	0,063	0,227	9142,86	1,837
16,67	0,00019	4,75	5,558	0,022656	0,084	0,271	10158,73	2,268
18,33	0,00025	4,75	5,558	0,026634	0,098	0,297	11174,60	2,744
20,00	0,00033	4,87	5,694	0,032064	0,118	0,332	12190,48	3,265
21,67	0,00040	4,95	5,792	0,036058	0,130	0,354	13206,35	3,832
23,33	0,00046	4,95	5,792	0,038365	0,143	0,373	14222,22	4,444
25,00	0,00051	5,20	6,084	0,039974	0,149	0,383	15238,10	5,102
26,67	0,00056	5,45	6,377	0,041016	0,155	0,392	16253,97	5,805
28,33	0,00058	5,45	6,377	0,040097	0,167	0,410	17269,84	6,553
30,00	0,00060	5,58	6,533	0,038954	0,195	0,449	18285,71	7,347
31,67	0,00060	5,58	6,533	0,037109	0,200	0,457	19301,59	8,186
33,33	0,00061	5,72	6,689	0,03584	0,216	0,478	20317,46	9,070

Таблиця А12

Експериментальні та розрахункові величини витрати газового реагенту самоусмоктуючих мішалок при різному куту нахилу порожнистих лопатей

n, c^{-1}	$V_{г}, M^3/c$	$V_{г}/nd^3$	$V_{г \text{ розр}}, M^3/c$	φ
1	2	3	4	5
$d_M=0,1 \text{ м}; h_{п}=0,24 \text{ м}; \text{ кут нахилу лопаті } \alpha=90^\circ$				
6,17	0,00000	0,0005	0,000002	0,150
8,33	0,00003	0,0040	0,00002	0,157
10,00	0,00020	0,0200	0,00022	0,169
11,67	0,00029	0,0249	0,00033	0,175
13,33	0,00038	0,0285	0,00042	0,182
15,00	0,00048	0,0320	0,00045	0,193
16,67	0,00052	0,0312	0,00055	0,210
18,33	0,00063	0,0344	0,00067	0,230
20,00	0,00064	0,0322	0,00068	0,268
21,67	0,00069	0,0317	0,00069	0,280
23,33	0,00070	0,0300	0,00072	0,310
25,00	0,00070	0,0280	0,00072	0,380
$d_M=0,1 \text{ м}; h_{п}=0,24 \text{ м}; \text{ кут нахилу лопаті } \alpha=60^\circ$				
1	2	3	4	5
5,00	0,00000	0,0007	0,000002	0,160
6,67	0,00001	0,0018	0,00002	0,187
8,33	0,00002	0,0020	0,00002	0,210
10,00	0,00008	0,0083	0,00005	0,210
11,67	0,00020	0,0169	0,000212	0,222
13,33	0,00027	0,0200	0,00031	0,225
15,00	0,00035	0,0233	0,00033	0,230
16,67	0,00041	0,0244	0,00042	0,245
18,33	0,00047	0,0256	0,00047	0,268
20,00	0,00050	0,0250	0,00053	0,280
21,67	0,00053	0,0245	0,00053	0,310
23,33	0,00058	0,0249	0,00058	0,330

Продовження таблиці А12

n, c^{-1}	$V_{\Gamma}, M^3/c$	V_{Γ}/nd^3	$V_{\Gamma \text{ расч}}, M^3/c$	φ
1	2	3	4	5
$d_m=0,1 \text{ м}; h_{\Pi}=0,24 \text{ м}; \text{ кут нахилу лопаті } \alpha=45^{\circ}$				
4,17	0,00000	0,0004	0,000002	0,150
8,33	0,00000	0,0004	0,00002	0,157
10,00	0,00001	0,0013	0,00003	0,169
11,67	0,00008	0,0071	0,00006	0,175
13,33	0,00014	0,0108	0,00017	0,182
15,00	0,00025	0,0167	0,00027	0,193
16,67	0,00031	0,0186	0,00033	0,210
18,33	0,00040	0,0216	0,00035	0,230
20,00	0,00042	0,0210	0,00047	0,268
21,67	0,00045	0,0208	0,00048	0,280
23,33	0,00048	0,0206	0,00048	0,310
25,00	0,00050	0,0200	0,00053	0,280

Експериментальні та розрахункові величини продуктивності та потужності самоусмоктуючих мішалок при наявності статора (16 пластин)

Мішалка з вертикально розташованими лопатями та пробкою

n, c^{-1}	$V_r, M^3/c$	V_r/nd^3	φ	φ_0	Re	Fr	N, Вт
1	2	3	4	5	6	7	8
$D_M=0,13 \text{ м}; H_{Ж}=0,21 \text{ м}; h_{П}=0,18 \text{ м}$							
1	2	3	4	5	6	7	8
5,83	0,000023	0,0018	0,171	0,430	9388,89	0,451	14,26
6,67	0,00008	0,0086	0,184	0,446	10730,16	0,590	15,85
7,50	0,00015	0,0110	0,193	0,461	12071,43	0,746	17,43
8,33	0,00016	0,012	0,200	0,468	13412,70	0,921	21,69
9,17	0,00020	0,0131	0,210	0,481	14753,97	1,115	23,19
10,00	0,00023	0,0132	0,218	0,491	16095,24	1,327	28,12
10,83	0,00029	0,0138	0,230	0,507	17436,51	1,557	33,54
$D_M=0,13 \text{ м}; H_{Ж}=0,17 \text{ м}; h_{П}=0,12 \text{ м}$							
1	2	3	4	5	6	7	8
4,67	0,00003	0,0001	0,283	0,576	7511,11	0,289	8,18
5,83	0,00013	0,0101	0,306	0,590	9388,89	0,451	10,72
6,67	0,00020	0,0137	0,312	0,599	10730,16	0,590	13,62
7,50	0,00025	0,0152	0,315	0,606	12071,43	0,746	15,78
8,33	0,00029	0,0161	0,318	0,621	13412,70	0,921	19,92
9,17	0,00035	0,0174	0,323	0,632	14753,97	1,115	23,51
10,00	0,00040	0,0182	0,339	0,648	16095,24	1,327	27,33
$D_M=0,13 \text{ м}; H_{Ж}=0,14 \text{ м}; h_{П}=0,075 \text{ м}$							
1	2	3	4	5	6	7	8
4,67	0,00003	0,0001	0,295	0,581	7511,11	0,289	8,05
5,83	0,00013	0,0111	0,316	0,597	9388,89	0,451	11,67
6,67	0,00023	0,0127	0,320	0,603	10730,16	0,590	13,22
7,50	0,00029	0,0144	0,337	0,610	12071,43	0,746	15,77
8,33	0,00031	0,0161	0,346	0,625	13412,70	0,921	18,9
9,17	0,00039	0,0179	0,352	0,644	14753,97	1,115	22,33
10,00	0,00042	0,0185	0,367	0,657	16095,24	1,327	27,13

Експериментальні та розрахункові величини продуктивності та потужності
самоусмоктуючих мішалок при наявності статора (8 пластин)

Мішалка з вертикально розташованими лопатями та пробкою

n, c^{-1}	$V_r, M^3/c$	V_r/nd^3	φ	φ_0	Re	Fr	N, Вт
1	2	3	4	5	6	7	8
$D_M=0,13 \text{ м}; H_{Ж}=0,21 \text{ м}; h_{П}=0,18 \text{ м}$							
1	2	3	4	5	6	7	8
5,83	0,000029	0,0019	0,181	0,430	9388,89	0,451	14,26
6,67	0,00010	0,0087	0,192	0,446	10730,16	0,590	15,85
7,50	0,00020	0,0116	0,203	0,461	12071,43	0,746	17,43
8,33	0,00022	0,012	0,208	0,468	13412,70	0,921	21,69
9,17	0,00025	0,0134	0,218	0,481	14753,97	1,115	23,19
10,00	0,00029	0,0136	0,226	0,491	16095,24	1,327	28,12
10,83	0,00033	0,0141	0,238	0,507	17436,51	1,557	33,54
$D_M=0,13 \text{ м}; H_{Ж}=0,17 \text{ м}; h_{П}=0,12 \text{ м}$							
1	2	3	4	5	6	7	8
4,67	0,00003	0,0001	0,295	0,576	7511,11	0,289	8,18
5,83	0,00013	0,0101	0,306	0,590	9388,89	0,451	10,72
6,67	0,00020	0,0137	0,315	0,599	10730,16	0,590	13,62
7,50	0,00025	0,0152	0,320	0,606	12071,43	0,746	15,78
8,33	0,00029	0,0161	0,333	0,621	13412,70	0,921	19,92
9,17	0,00035	0,0174	0,344	0,632	14753,97	1,115	23,51
10,00	0,00040	0,0182	0,358	0,648	16095,24	1,327	27,33
$D_M=0,13 \text{ м}; H_{Ж}=0,14 \text{ м}; h_{П}=0,075 \text{ м}$							
1	2	3	4	5	6	7	8
4,67	0,00003	0,0001	0,295	0,581	7511,11	0,289	8,05
5,83	0,00013	0,0111	0,316	0,597	9388,89	0,451	11,67
6,67	0,00023	0,0127	0,320	0,603	10730,16	0,590	13,22
7,50	0,00029	0,0144	0,337	0,610	12071,43	0,746	15,77
8,33	0,00031	0,0161	0,346	0,625	13412,70	0,921	18,9
9,17	0,00039	0,0179	0,352	0,644	14753,97	1,115	22,33
10,00	0,00042	0,0185	0,367	0,657	16095,24	1,327	27,13

Експериментальні та розрахункові величини продуктивності та потужності
самоусмоктуючих мішалок при наявності статора (6 пластин)

Мішалка з вертикально розташованими лопатями та пробкою

n, c^{-1}	$V_r, M^3/c$	V_r/nd^3	φ	φ_0	Re	Fr	N, Вт
1	2	3	4	5	6	7	8
$D_M=0,13 \text{ м}; H_{Ж}=0,21 \text{ м}; h_{П}=0,18 \text{ м}$							
1	2	3	4	5	6	7	8
5,83	0,000032	0,0019	0,181	0,430	9388,89	0,451	13,76
6,67	0,00011	0,0087	0,192	0,446	10730,16	0,590	15,65
7,50	0,00021	0,0116	0,203	0,461	12071,43	0,746	17,10
8,33	0,00024	0,012	0,208	0,468	13412,70	0,921	22,10
9,17	0,00027	0,0134	0,218	0,481	14753,97	1,115	22,10
10,00	0,00029	0,0136	0,226	0,491	16095,24	1,327	27,82
10,83	0,00033	0,0141	0,238	0,507	17436,51	1,557	32,01
$D_M=0,13 \text{ м}; H_{Ж}=0,17 \text{ м}; h_{П}=0,12 \text{ м}$							
1	2	3	4	5	6	7	8
4,67	0,00002	0,0001	0,295	0,576	7511,11	0,289	8,08
5,83	0,00013	0,0101	0,306	0,590	9388,89	0,451	10,37
6,67	0,00021	0,0137	0,315	0,599	10730,16	0,590	13,25
7,50	0,00026	0,0152	0,320	0,606	12071,43	0,746	15,12
8,33	0,00031	0,0161	0,333	0,621	13412,70	0,921	19,32
9,17	0,00037	0,0174	0,344	0,632	14753,97	1,115	23,01
10,00	0,00039	0,0182	0,358	0,648	16095,24	1,327	26,92
$D_M=0,13 \text{ м}; H_{Ж}=0,14 \text{ м}; h_{П}=0,075 \text{ м}$							
1	2	3	4	5	6	7	8
4,67	0,000013	0,0001	0,295	0,581	7511,11	0,289	7,05
5,83	0,00015	0,0111	0,316	0,597	9388,89	0,451	11,37
6,67	0,00025	0,0127	0,320	0,603	10730,16	0,590	12,76
7,50	0,00032	0,0144	0,337	0,610	12071,43	0,746	14,97
8,33	0,00033	0,0161	0,346	0,625	13412,70	0,921	17,91
9,17	0,00039	0,0179	0,352	0,644	14753,97	1,115	21,53
10,00	0,00041	0,0185	0,367	0,657	16095,24	1,327	26,73

Експериментальні та розрахункові величини продуктивності та потужності самоусмоктуючих мішалок при наявності статора (4 пластини)

Мішалка з вертикально розташованими лопатями та пробкою

n, с-1	V _Г , м ³ /с	V _Г /nd ³	φ	φ ₀	Re	Fr	N, Вт
1	2	3	4	5	6	7	8
d _М =0,13 м; Н _ж =0,21 м; h _п =0,18 м							
1	2	3	4	5	6	7	8
5,83	0,000032	0,0019	0,181	0,430	9388,89	0,451	13,26
6,67	0,00011	0,0087	0,192	0,446	10730,16	0,590	15,16
7,50	0,00021	0,0116	0,203	0,461	12071,43	0,746	16,10
8,33	0,00024	0,012	0,208	0,468	13412,70	0,921	20,12
9,17	0,00027	0,0134	0,218	0,481	14753,97	1,115	21,10
10,00	0,00029	0,0136	0,226	0,491	16095,24	1,327	27,22
10,83	0,00033	0,0141	0,238	0,507	17436,51	1,557	31,01
d _М =0,13 м; Н _ж =0,17 м; h _п =0,12 м							
1	2	3	4	5	6	7	8
4,67	0,00002	0,0001	0,295	0,576	7511,11	0,289	8,08
5,83	0,00013	0,0101	0,306	0,590	9388,89	0,451	10,37
6,67	0,00021	0,0137	0,315	0,599	10730,16	0,590	12,17
7,50	0,00026	0,0152	0,320	0,606	12071,43	0,746	15,02
8,33	0,00031	0,0161	0,333	0,621	13412,70	0,921	19,05
9,17	0,00037	0,0174	0,344	0,632	14753,97	1,115	22,01
10,00	0,00039	0,0182	0,358	0,648	16095,24	1,327	25,92
d _М =0,13 м; Н _ж =0,14 м; h _п =0,075 м							
1	2	3	4	5	6	7	8
4,67	0,000013	0,0001	0,295	0,581	7511,11	0,289	7,05
5,83	0,00015	0,0111	0,316	0,597	9388,89	0,451	10,27
6,67	0,00025	0,0127	0,320	0,603	10730,16	0,590	11,76
7,50	0,00032	0,0144	0,337	0,610	12071,43	0,746	13,67
8,33	0,00033	0,0161	0,346	0,625	13412,70	0,921	17,91
9,17	0,00039	0,0179	0,352	0,644	14753,97	1,115	20,73
10,00	0,00041	0,0185	0,367	0,657	16095,24	1,327	25,93

ДОДАТОК Б

ЗАТВЕРДЖУЮ
Технічний директор
ТОВ «Завод органічного синтезу
В.П. Помьотов
« _____ » 2014 року



АКТ

Дійсним актом підтверджується, що в період з 17 лютого по 18 квітня 2014 року проведено дослідно-промислове випробування апарату з самоусмоктуючою мішалкою виконаною у відповідності до патенту України № 60097 Пристрій для перемішування рідин. – Оуб. в Бюл. №11, 2011, у виробництві стимуляторів росту рослин.

В період випробування у було напрацьовано 16,5 тон продукції.

Умови проведення процесу абсорбції аміаку водою з метою отримання аміачної води для подальшого повернення на стадію комплексоутворення цілком відтворювали умови, що вказані в технологічному регламенті виробництва. Якість отриманих речовин аналізували на відповідність вимогам, які пред'являються в технологічному регламенті.

В процесі випробувань досягнуто вихід цільового продукту 98%

Висновки:

1. Розроблений реактор з самоусмоктуючою мішалкою може бути рекомендованим для впровадження на стадіях абсорбції аміаку водою на підприємствах хімічної промисловості.

Нач. виробництва _____ Шевченко О.М.

Гол. технолог виробництва _____ Чаліна М.М.

Механік _____ Фурсов А.В.



**АКТ
про впровадження результатів
кандидатської дисертаційної роботи Шабрацького С.В.**

Комісія у складі: Шевчук А.В., Коломієць В.М., Ляпощенко О.О. склали даний акт про те, що результати дисертаційної роботи Шабрацького С.В. «Гідродинаміка газорідних систем в апаратах з самоусмоктуючими перемішувачами», представлені на здобуття наукового ступеня кандидата технічних наук, використані у виробничій діяльності ТОВ «Агросервіс» під час виконання дослідно-конструкторських робіт (ДКР) на стадії ескізного проектування перемішувача обладнання установки для виробництва рідких азотних добрив у вигляді:

1. Математичного опису процесу перемішування газорідної суміші;
2. Методики інженерного розрахунку параметрів апарату для проведення процесу перемішування;
3. Розрахунку потужності, що використовується самоусмоктуючими мішалками;
4. Визначення газомісту в апараті.

Використання зазначених результатів дозволяє здійснити моделювання гідромеханічних процесів, що супроводжуються міжфазним масообміном, проектування високоефективних багатофункціональних апаратів. Отримані наукові результати та практичні рекомендації представляють високу науково-практичну цінність і перспективи впровадження в технологіях перемішування газорідних сумішей.

Результати впроваджені при виконанні ДКР за темою «Гідродинаміка газорідних систем в апаратах з самоусмоктуючими перемішувачами» (договір №51.18-05.15.СП від 12 липня 2015 р. на створення (передачу) науково-технічної продукції, замовник - ТОВ «Агросервіс», виконавець - Сумський державний університет (СумДУ), кафедра процесів та обладнання хімічних і нафтопереробних виробництв). Здобувач виступив у якості відповідального виконавця виконуваних робіт.

Члени комісії:

від ТОВ «Агросервіс»
Головний агроном

від СумДУ
Науковий керівник НДДКР




В.М.Коломієць



О.О.Ляпощенко

«ЗАТВЕРДЖУЮ»
 Генеральний директор
 Науково-промислового центру
 «ПЕРСПЕКТИВА»
 Української технологічної академії


 академік Пономарьов В.Н.
 « 24 » 06 2016 року

СПРАВКА

про впровадження результатів наукових випробувань

проведених в Сумському державному університеті Шабрацьким С.В. під керівництвом професора Стороженко В.Я. по темі «Гідродинаміка газорідних систем в реакторах з самоусмоктуючими перемішувальними пристроями».

Дослідження гідродинаміки газорідних систем в апаратах об'ємного типу з різними конструкціями самоусмоктуючих ежекційних мішалок в науково-дослідній лабораторії кафедри процесів та обладнання хімічних і нафтопереробних виробництв дозволили удосконалити конструкцію перемішувальних пристроїв, виявити найбільш ефективні перемішувальні пристрої, отримати для них емпіричні залежності з продуктивності по газовому реагенту та визначити інженерну методику розрахунку запропонованих самоусмоктуючих ежекційних мішалок і алгоритм розрахунку газорідних апаратів.

Лабораторні випробування самоусмоктуючих ежекційних мішалок при сульфуванні вуглеводнів дали можливість отримати цільовий продукт з світлим відтінком, значно підвищеної якості, зменшити витрати сірчаного ангідриду та їх викиди в атмосферу, а також скоротити час сульфування. Сукупність вирішених проблем привела до здешевлення отриманого продукту на 15-20% в порівнянні з існуючим методом на виробництві.

Конструкції запропонованих авторами самоусмоктуючих ежекційних мішалок в даний час розглядаються в якості базових перемішувальних пристроїв при проектуванні стадії сульфування вуглеводнів газоподібним сірчанам ангідридом в сульфураторах об'ємного типу в виробництві поверхнево-активних добавок до технічних мастил, які планується впроваджувати на підприємствах нафтопереробної промисловості КНР.

Заступник директора ННЦ
 «ПЕРСПЕКТИВА» по виробництву





Семикопний О.М.

ДОДАТОК В

УКРАЇНА

UKRAINE



ПАТЕНТ

НА КОРИСНУ МОДЕЛЬ

№ 60097

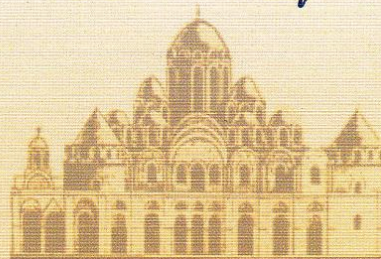
ПРИСТРІЙ ДЛЯ ПЕРЕМІШУВАННЯ РІДИН

Видано відповідно до Закону України "Про охорону прав на винаходи і корисні моделі".

Зареєстровано в Державному реєстрі патентів України на корисні моделі 10.06.2011.

Голова Державного департаменту
інтелектуальної власності

М.В. Паладій



(11) 60097

(19) UA

(51) МПК
B01F 5/16 (2006.01)

<p>(21) Номер заявки: u 2010 13870</p> <p>(22) Дата подання заявки: 22.11.2010</p> <p>(24) Дата, з якої є чинними права на корисну модель: 10.06.2011</p> <p>(46) Дата публікації відомостей про видачу патенту та номер бюлетеня: 10.06.2011, Бюл. № 11</p>	<p>(72) Винахідники: Шабрацький Віктор Іванович, UA, Бєлкін Давид Ілліч, UA, Барвін Володимир Іванович, UA, Шабрацький Сергій Володимирович, UA</p> <p>(73) Власник: Шабрацький Віктор Іванович, вул. Леніна, 2, кв. 7, м. Рубіжне, Луганська обл., 93010, Україна, UA</p>
--	---

(54) Назва корисної моделі:

ПРИСТРІЙ ДЛЯ ПЕРЕМІШУВАННЯ РІДИН

(57) Формула корисної моделі:

1. Пристрій для перемішування рідин, що містить порожнистий ротор з осьовими вхідними каналами, радіальні порожнисті лопаті з вихідними отворами, порожнина яких з'єднана з порожниною ротора, який відрізняється тим, що для інтенсифікації масообмінного процесу за рахунок збільшення насосної продуктивності вхідний канал з фронтальної сторони циліндричної лопаті має округлу форму, радіус якої складає 0,5-1 діаметр лопаті.

2. Пристрій за п. 1, який відрізняється тим, що для інтенсифікації масообмінного процесу за рахунок збільшення насосної продуктивності вхідний канал з фронтальної сторони сплющеної лопаті має округлу форму, радіус якої складає 0,5-5 ширин лопаті.

3. Пристрій за п. 2, який відрізняється тим, що вхідний канал, спряжений з фронтальною поверхнею лопаті, має похилу площину з кутом нахилу 40-55° до осі лопаті.

4. Пристрій за пп. 1, 2, який відрізняється тим, що порожниста лопать тангенціально приєднана до ротора.



(11) **71183**(19) **UA**(51) МПК
B01F 5/16 (2006.01)

<p>(21) Номер заявки: u 2011 13988</p> <p>(22) Дата подання заявки: 28.11.2011</p> <p>(24) Дата, з якої є чинними права на корисну модель: 10.07.2012</p> <p>(46) Дата публікації відомостей про видачу патенту та номер бюлетеня: 10.07.2012, Бюл. № 13</p>	<p>(72) Винахідники: Бєлкін Давид Ілліч, UA, Стороженко Віталій Яковлевич, UA, Шабрацький Віктор Іванович, UA, Барвін Володимир Іванович, UA, Шабрацький Сергій Володимирович, UA</p>
--	--

(73) Власники:
Шабрацький Сергій Володимирович,
вул. Леніна, 2-7, м. Рубіжне, Луганська обл., 93010, UA,
Бєлкін Давид Ілліч,
вул. Визволителів, 77-13, м. Рубіжне, Луганська обл., 93000, UA,
Стороженко Віталій Яковлевич,
вул. Харківська, 3-191, м. Суми, 40024, UA,
Шабрацький Віктор Іванович,
вул. Донецька, 8, м. Привілля, Луганська обл., 93012, UA,
Барвін Володимир Іванович,
вул. Менделєєва, 36-50, м. Рубіжне, Луганська обл., 93000, UA

(54) Назва корисної моделі:

ПРИСТРІЙ ДЛЯ ПЕРЕМІШУВАННЯ

(57) Формула корисної моделі:

1. Пристрій для перемішування, що містить порожнистий ротор з осьовими вхідними каналами, які з фронтальної сторони мають округлу або похилу площину, радіальні порожнисті лопаті з вихідними отворами, порожнина яких з'єднана з порожниною ротора, який відрізняється тим, що з метою інтенсифікації масообміну за рахунок збільшення газовмісту перемішуючої рідини на верхній частині лопаті розміщене з зазором, рівним 0,5-0,7 діаметра лопаті, плоске дискове кільце, шириною 0,25-0,35 діаметра порожнистої лопаті, з радіальними пластинчатими лопатями, розташованими в секторі між порожнистими лопатями.

2. Пристрій для перемішування за п. 1, який відрізняється тим, що порожниста лопать розташована в секторі між пластинчатими лопатями по медіані або в межах сектору за тильною або перед фронтальною стороною пластинчатої лопаті.

3. Пристрій для перемішування за пп. 1, 2, який відрізняється тим, що основа ротора має кут нахилу, рівний 30-60°.

УКРАЇНА



ПАТЕНТ

НА КОРИСНУ МОДЕЛЬ

№ 80141

ПРИСТРІЙ ДЛЯ ПЕРЕМІШУВАННЯ

Видано відповідно до Закону України "Про охорону прав на винаходи і корисні моделі".

Зареєстровано в Державному реєстрі патентів України на корисні моделі **13.05.2013**.

Голова Державної служби
інтелектуальної власності України

М.В. Ковіня



(11) **80141**(19) **UA**(51) МПК
B01F 5/16 (2006.01)

- | | |
|---|--|
| <p>(21) Номер заявки: u 2012 14434</p> <p>(22) Дата подання заявки: 17.12.2012</p> <p>(24) Дата, з якої є чинними права на корисну модель: 13.05.2013</p> <p>(46) Дата публікації відомостей про видачу патенту та номер бюлетеня: 13.05.2013, Бюл. № 9</p> | <p>(72) Винахідники:
Шабрацький Віктор Іванович, UA,
Белкін Давид Ілліч, UA,
Стороженко Віталій Якович, UA,
Шабрацький Сергій Володимирович, UA,
Барвін Володимир Іванович, UA</p> <p>(73) Власники:
Шабрацький Віктор Іванович,
вул. Леніна, 2-7, м. Рубіжне, Луганська обл., 93010, UA,
Белкін Давид Ілліч,
вул. Визволителів, 77-13, м. Рубіжне, Луганська обл., 93000, UA,
Стороженко Віталій Якович,
вул. Харківська, 3-191, м. Суми, 40024, UA,
Шабрацький Сергій Володимирович,
вул. Леніна, 2-7, м. Рубіжне, Луганська обл., 93010, UA,
Барвін Володимир Іванович,
вул. Менделєєва, 36-50, м. Рубіжне, Луганська обл., 93000, UA</p> |
|---|--|

(54) Назва корисної моделі:

ПРИСТРІЙ ДЛЯ ПЕРЕМІШУВАННЯ

(57) Формула корисної моделі:

1. Пристрій для перемішування, який складається з корпусу апарата з патрубками для введення реагентів та виводу продуктів реакції, по осі апарата на краю вала розміщений пристрій для перемішування, який відрізняється тим, що з метою підвищення ефективності перемішування та насосної продуктивності пристрій для перемішування виконаний у вигляді циліндричної маточини з привареними центральними плоскими лопатями, на периферії яких закріплене дискове кільце з периферійними радіальними лопатями, яке поділяє центральні плоскі лопаті по висоті навпіл, розташованими під кутом до центральних плоских лопатей з зазором між ними і які перекривають останні в площині обертання пристрою.
2. Пристрій для перемішування за п. 1, який відрізняється тим, що зазор складає 2-5 товщини периферійної лопаті.
3. Пристрій для перемішування за п. 1, який відрізняється тим, що периферійна лопать перекриває центральну лопать на 1/5-1/3 її довжини.
4. Пристрій для перемішування за п. 1, який відрізняється тим, що для зменшення коефіцієнта місцевого опору край периферійної лопаті, розташований в межах площини дискового кільця, має скіс або скруглення.



(11) 87666

(19) UA

(51) МПК
B01F 5/16 (2006.01)

(21) Номер заявки: **u 2013 11518**

(22) Дата подання заявки: **30.09.2013**

(24) Дата, з якої є чинними права на корисну модель: **10.02.2014**

(46) Дата публікації відомостей про видачу патенту та номер бюлетеня: **10.02.2014, Бюл. № 3**

(72) Винахідники:
Шабрацький Сергій Володимирович, UA, Стороженко Віталій Якович, UA, Белкін Давид Ілліч, UA, Шабрацький Віктор Іванович, UA, Барвін Володимир Іванович, UA

(73) Власники:
Шабрацький Сергій Володимирович, вул. Леніна, 2-7, м. Рубіжне, Луганська обл., 93010, UA, Стороженко Віталій Якович, вул. Харківська, 3-191, м. Суми, 40024, UA, Белкін Давид Ілліч, вул. Визволителів, 77-13, м. Рубіжне, Луганська обл., 93000, UA, Шабрацький Віктор Іванович, вул. Донецька, 8, м. Привілля, Луганська обл., 93012, UA, Барвін Володимир Іванович, вул. Менделєєва, 36-50, м. Рубіжне, Луганська обл., 93000, UA

(54) Назва корисної моделі:

САМОУСМОКТУВАЛЬНА МІШАЛКА

(57) Формула корисної моделі:

1. Самоусмоктувальна мішалка для проведення газорідних реакцій, що містить порожнистий ротор з осьовими вхідними каналами, які з фронтальної сторони мають округлу або похилу площину, радіальні порожнисті лопаті з вихідними отворами, порожнина яких з'єднана з порожниною ротора, яка відрізняється тим, що для інтенсифікації масообміну між газовим реагентом і рідиною всередині ротора розміщена ежекційна перегородка, яка поділяє порожнину ротора на дві частини, виконана у вигляді плоского диска із скошеною з верхньої сторони кромкою, а з нижньої сторони диск закінчується кільцевим буртиком, поділяє вхідний канал лопаті в співвідношенні 1:5-1:2.
2. Самоусмоктувальна мішалка за п. 1, яка відрізняється тим, що торець порожнистої лопаті має скіс з тильної сторони лопаті під кутом 15-60°.
3. Самоусмоктувальна мішалка за пп. 1, 2 яка відрізняється тим, що на нижній частині ежекційної перегородки розташовані направляючі елементи, виконані у вигляді пластинок, що мають форму прямокутника або трикутника, або $\frac{1}{4}$ твірної частини еліпса.



(11) **89755**(19) **UA**(51) МПК
B01F 5/16 (2006.01)

(21) Номер заявки: **u 2013 14790**
 (22) Дата подання заявки: **17.12.2013**
 (24) Дата, з якої є чинними права на корисну модель: **25.04.2014**
 (46) Дата публікації відомостей про видачу патенту та номер бюлетеня: **25.04.2014, Бюл. № 8**

(72) Винахідники:
Склабінський Всеволод Іванович, UA,
Стороженко Віталій Якович, UA,
Шабрацький Сергій Володимирович, UA

(73) Власники:
Склабінський Всеволод Іванович,
 вул. Дем'яна Короченка, 35-208, м. Суми, 40034, UA,
Стороженко Віталій Якович,
 вул. Харківська, 3-191, м. Суми, 40024, UA,
Шабрацький Сергій Володимирович,
 вул. Леніна, 2-7, м. Рубіжне, Луганська обл., 93010, UA

(54) Назва корисної моделі:

ПРИСТРІЙ ДЛЯ ПРОВЕДЕННЯ ГАЗОРІДИННИХ РЕАКЦІЙ

(57) Формула корисної моделі:

Пристрій для проведення газорідних реакцій, що містить порожнистий ротор з осьовими вхідними каналами, які з фронтальної сторони мають округлу або похилу площину, радіальні порожнисті лопаті з вихідними отворами, порожнина яких з'єднана з порожниною ротора, який відрізняється тим, що порожнисті лопаті розташовані в два ряди попарно або в шаховому порядку вертикально, або з різними кутами нахилу відносно до осі обертання ротора, всередині якого розміщені дві перегородки, які поділяють пристрій для проведення газорідних реакцій на три частини, причому верхня перегородка через центральний отвір поєднується з аксіально розташованою трубою відносно до порожнистого вала.

УКРАЇНА



ПАТЕНТ

НА КОРИСНУ МОДЕЛЬ

№ 97358

ТУРБОЗМІШУВАЧ ДЛЯ ПРОВЕДЕННЯ ГАЗОРІДИННИХ
РЕАКЦІЙ

Видано відповідно до Закону України "Про охорону прав на винаходи і корисні моделі".

Зареєстровано в Державному реєстрі патентів України на корисні моделі **10.03.2015**.

Голова Державної служби
інтелектуальної власності України

А.Г. Жарінова



(11) **97358**(19) **UA**(51) МПК
B01F 5/16 (2006.01)

(21) Номер заявки: **u 2014 10721**

(22) Дата подання заявки: **01.10.2014**

(24) Дата, з якої є чинними права на корисну модель: **10.03.2015**

(46) Дата публікації відомостей про видачу патенту та номер бюлетеня: **10.03.2015, Бюл. № 5**

(72) Винахідники:
Склабінський Всеволод Іванович, UA,
Стороженко Віталій Якович, UA,
Шабрацький Сергій Володимирович, UA

(73) Власники:
Склабінський Всеволод Іванович,
вул. Дем'яна Коротченка, б. 35,
кв. 208, м. Суми, 40034, UA,
Стороженко Віталій Якович,
вул. Харківська, б. 3, кв. 191,
м. Суми, 40024, UA,
Шабрацький Сергій Володимирович,
вул. Леніна, б. 2, кв. 7, м.
Рубіжне, Луганська обл.,
93010, UA

(54) Назва корисної моделі:

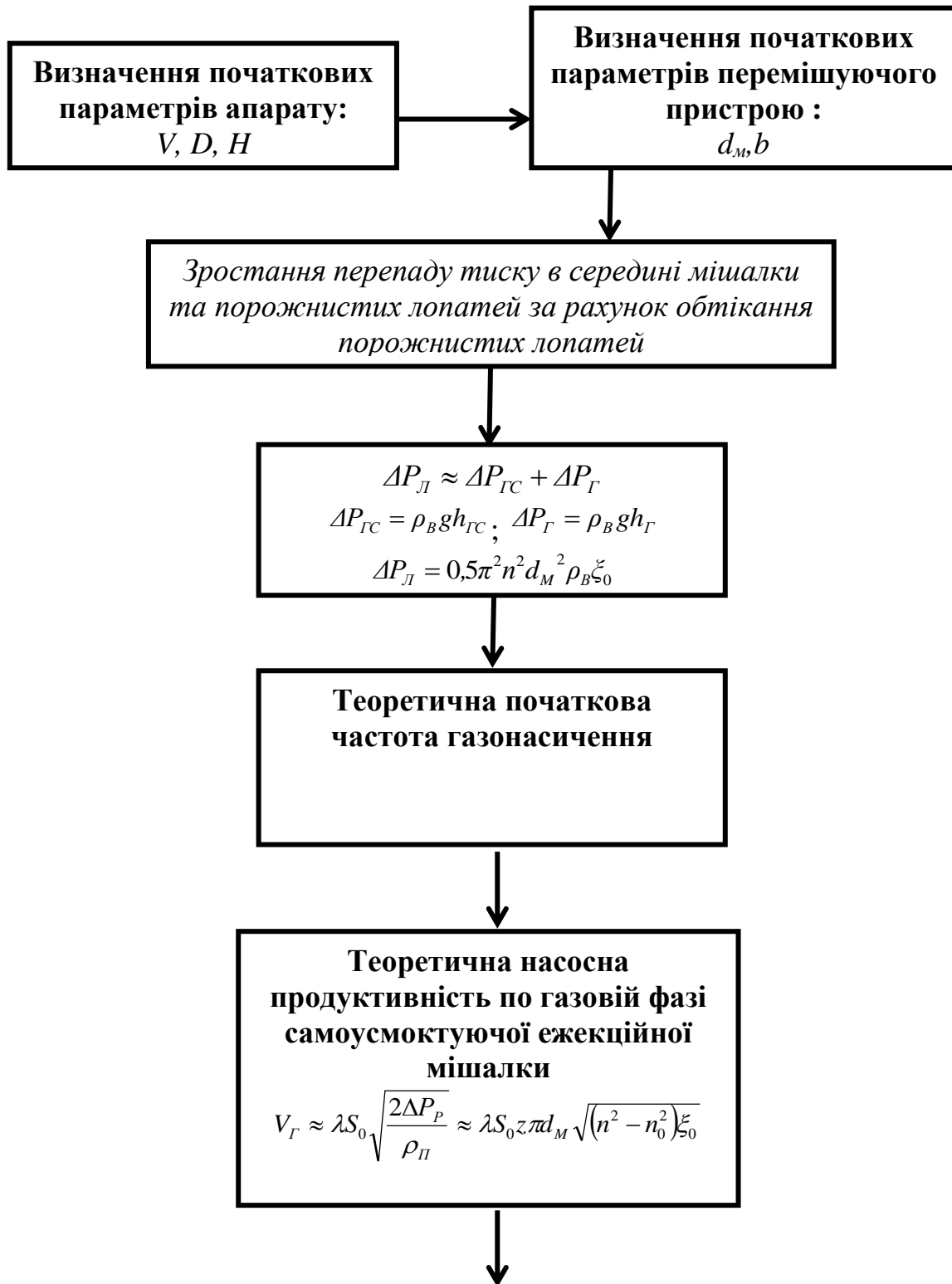
ТУРБОЗМІШУВАЧ ДЛЯ ПРОВЕДЕННЯ ГАЗОРІДИННИХ РЕАКЦІЙ

(57) Формула корисної моделі:

Турбозмішувач для проведення газорідних реакцій, що виконаний у вигляді двох урізаних порожнистих конусів, з'єднаних поміж собою по більшій основі за допомогою циліндричної обичайки, в середині якої розміщена ежекційна перегородка у вигляді диска, на поверхні обичайки розташовані щілинні прорізи, з'єднані з порожнистими лопатями, який відрізняється тим, що порожнисті лопаті спрямовані під кутом 15-30 до площини обертання мішалки поперемінно в різні напрями.

ДОДАТОК Г

Блок-схема алгоритму інженерного розрахунку апаратів з самоусмоктуючими ежекційними мішалками



Коефіцієнт опору порожнистої лопаті мішалки

$$\xi_0 = 1,3 \cdot \sin \alpha - 3,75d_M - 10(0,35 - 5,56d_M^2)(\mu - 1 \cdot 10^{-3})$$

Початкова частота обертання мішалки

$$n_0 = 7,425 + 30,5h_{TC} - 61,3d_M$$

Коефіцієнт витрат в середині порожнистої лопаті

$$\lambda = 0,5 + \cos^2 \alpha - 0,17 \cos \alpha$$



Емпіричні рівняння для визначення робочих параметрів в апаратах об'ємного типу з запропонованими самоусмоктуючими ежекційними мішалками



**Насосна продуктивність самоусмоктуючої мішалки:
з ежекційною перегородкою**

по газовій фазі $\frac{V_G}{nd^3} = 0,03 \cdot \sin \alpha^{1,5} \cdot \left(\frac{a}{b}\right)^{0,5} \cdot \left(\frac{h}{d}\right)^{-0,9}$

по рідині $\frac{V_P}{nd^3} = 0,0033 \cdot \left(\frac{a}{b}\right)$



**Середній газовміст
перемішуючого середовища**

$$\bar{\varphi} = 0,21(n - n_0)^{1,8} \cdot d^{1,5} \left(\frac{b}{d_M}\right)^{0,1} \cdot \left(\frac{H}{D_A}\right)^{0,6}$$



**Витрата потужності на
перемішування однорідної рідини:**

в апараті без статора

$$N_p = 5,36\zeta \cdot \rho \cdot n^3 d^5 \cdot \sin \alpha^{0,32} \cdot \left(\frac{d}{D}\right)^{0,007} \cdot \left(\frac{b}{d}\right)^{-0,03}$$

в апараті зі статором

$$N_p = 6,12\zeta \rho \cdot n^3 d^5 \cdot \sin \alpha^{0,32} \cdot \left(\frac{d}{D}\right)^{0,02} \cdot \left(\frac{b}{d}\right)^{-0,05}$$



**Витрата потужності на
перемішування газорідної
суміші:**

в апараті без статора

$$N_{G-P} = 4,4 \cdot \zeta \cdot \rho \cdot n^3 d^5 \cdot \sin \alpha^{0,3} \cdot \varphi \cdot \left(\frac{d}{D}\right)^{0,01} \cdot \left(\frac{b}{d}\right)^{-0,03}$$

в апараті зі статором

$$N_{G-P} = 5,02 \cdot \zeta \cdot \rho \cdot n^3 d^5 \cdot \sin \alpha^{0,3} \cdot \varphi \cdot \left(\frac{d}{D}\right)^{0,01} \cdot \left(\frac{b}{d}\right)^{-0,03}$$