

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ  
ЗАПОРІЗЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ

ФАКУЛЬТЕТ ЕНЕРГЕТИКИ, ЕЛЕКТРОНИКИ ТА ІНФОРМАЦІЙНИХ  
ТЕХНОЛОГІЙ

КАФЕДРА ТЕПЛОЕНЕРГЕТИКИ ТА ГІДРОЕНЕРГЕТИКИ

**Кваліфікаційна робота**  
**другий магістерський**  
(рівень вищої освіти)

на тему Аналіз роботи циклонно-віскрової камери  
згортання газової пелі

Виконав: студент 2 курсу, групи ТЕ-18мд  
спеціальності 144 Теплоенергетика  
(код і назва спеціальності)  
освітньої програми Теплоенергетика  
(код і назва освітньої програми)  
спеціалізації \_\_\_\_\_  
(код і назва спеціалізації)

ВВ Швайко  
(ініціали та прізвище)

Керівник Юр. Фоч. Н.Т.Н М.Ю. Бердичев  
(посада, вчене звання, науковий ступінь, підпис, ініціали та прізвище)

Рецензент А.П. Сапронов  
(посада, вчене звання, науковий ступінь, підпис, ініціали та прізвище)

Запоріжжя  
2020

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ  
ЗАПОРІЗЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ

Факультет енергетики, електроніки та інформаційних технологій  
Кафедра теплоенергетики та гідроенергетики  
Рівень вищої освіти другий магістерський  
Спеціальність 144 Теплоенергетика  
(код та назва)  
Освітня програма Теплоенергетика  
(код та назва)  
Спеціалізація \_\_\_\_\_  
(код та назва)

ЗАТВЕРДЖУЮ

Завідувач кафедри \_\_\_\_\_

« 26 » 12 2019 року

ЗАВДАННЯ  
НА КВАЛІФІКАЦІЙНУ РОБОТУ СТУДЕНТОВІ (СТУДЕНТЦІ)

Швайко Віталій Вадимович

(прізвище, ім'я, по батькові)

1 Тема роботи (проекту) Аналіз роботи циліндро-вихрової камери згорання газової пали

керівник роботи Гордішев Микола Юрійович доктор К.Т.Н.  
(прізвище, ім'я, по батькові, науковий ступінь, вчене звання)

затверджені наказом ЗНУ від « 10 » вересня 2019 року № 1536-с

2 Строк подання студентом роботи 27.12.2019

3 Вихідні дані до роботи діаметр циліндричного  $D=500$  мм; діаметр твівального патрубку  $d_n=156$  мм; діаметр зливного патрубку  $d=170$  мм; діаметр нікельованої насадки  $\Delta=40$  мм; тиск на виході  $P_2=0,2$  МПа; щільність суміші  $\rho=1000$  кг/м<sup>3</sup>

4 Зміст розрахунково-пояснювальної записки (перелік питань, які потрібні розробити) 1. Конструкція і принцип дії натурних гідродинаміків, основні характеристики. 2. Розрахунок продуктивності гідродинаміків. 3. Ордена кривої

5 Перелік графічного матеріалу (з точним зазначенням обов'язкових креслен Корпус, Циліндрна газова пали, завихритель, кришка ліва, кришка права, кришка

6 Консультанти розділів роботи

| Розділ        | Прізвище, ініціали та посада консультанта | Підпис, дата       |                    |
|---------------|---|--------------------|--------------------|
|               |   | завдання видав     | завдання прийняв   |
| 1             | доц. к.т.н. Бердичев М.ГО                 | <i>[Signature]</i> | <i>[Signature]</i> |
| 2             | доц. к.т.н. Бердичев М.ГО                 | <i>[Signature]</i> | <i>[Signature]</i> |
| 3             | доц. к.т.н. Бердичев М.ГО                 | <i>[Signature]</i> | <i>[Signature]</i> |
| Нормоконтроль | доц. к.т.н. Каложов Ю.М.                  | <i>[Signature]</i> | <i>[Signature]</i> |
|               |   |                    |                    |
|               |   |                    |                    |

7 Дата видачі завдання 2.09.2019

### КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

| № з/п | Назва етапів кваліфікаційної роботи                | Строк виконання етапів роботи | Примітки |
|-------|--|-------------------------------|----------|
| 1     | Ознайомлення з характеристиками зафарбованих ниток | 01.10.19-18.10.19             |          |
| 2     | Ознайомлення з принципом дії нитракрилому          | 21.10.19-04.11.19             |          |
| 3     | Визначення показників роботи нитракрилому          | 05.11.19-20.11.19             |          |
| 4     | Аналіз суттєвих параметрів розрахунок нитракрилому | 21.11.19-29.11.19             |          |
| 5     | Розрахунок розриву внутрішнього в'язу нитракрилому | 02.12.19-13.12.19             |          |
| 6     | Оформлення навчальної записки                      | 16.12.19-27.12.19             |          |
|       |  |                               |          |

Студент *[Signature]* (підпис) Майко В.В. (ініціали та прізвище)

Керівник роботи (проекту) *[Signature]* (підпис) Бердичев М.ГО (ініціали та прізвище)

Нормоконтроль пройдено  
 Нормоконтролер *[Signature]* (підпис) Каложов Ю.М. (ініціали та прізвище)

## АНОТАЦІЯ

Швайко В. Аналіз роботи циклонно-вихрової камери згоряння газової печі.

Кваліфікаційна випускна робота для здобуття ступеня вищої освіти магістра за спеціальністю 144 – Теплоенергетика, науковий керівник М.Ю. Бердишев. Запорізький національний університет. Інженерний інститут. Факультет енергетики, електроніки та інформаційних технологій, 2020.

В магістерській роботі вирішено актуальну науково - технічну задачу визначення аналітичної залежності, що зв'язує розрахунок продуктивності гідроциклону з його коефіцієнтом опору.

Ключові слова: ГІДРОЦИКЛОН, ГІДРОДИНАМІЧНІ ПАРАМЕТРИ, ПРОДУКТИВНІСТЬ, ПІСКОВА НАСАДКА, ЗАГАЛЬНИЙ КОЕФІЦІЄНТ ОПОРУ

## ANNOTATION

Shvaiko V. Investigation of the cyclone vortex combustion chamber of a gas furnace.

Qualification final work for obtaining a higher education degree of a master's degree in specialty 144 - Thermal power engineering, supervisor M. Berdishev. Zaporizhzhya National University. Engineering Institute. Faculty of Energy, Electronics and Information Technology, 2020.

In the master's work, the urgent scientific and technical problem of determining the analytical dependence, linking the calculation of the performance of a hydrocyclone with its drag coefficient, was solved.

Keywords: HYDROCYCLONS, HYDRODYNAMIC PARAMETERS, PERFORMANCE, SAND FILLING, GENERAL RESISTANCE COEFFICIENT

## АННОТАЦИЯ

Швайко В. Исследование работы циклонной вихревой камеры сгорания газовой печи.

Квалификационная выпускная работа для получения степени высшего образования магистра по специальности 144 - Теплоэнергетика, научный руководитель Н.Ю. Бердышев. Запорожский национальный университет. Инженерный институт. Факультет энергетики, электроники и информационных технологий, 2020.

В магистерской работе решено актуальную научно - техническую задачу определения аналитической зависимости, связывающей расчет производительности гидроциклона с его коэффициентом сопротивления.

Ключевые слова: ГИДРОЦИКЛОНЫ, ГИДРОДИНАМИЧЕСКИЕ ПАРАМЕТРЫ, ПРОИЗВОДИТЕЛЬНОСТЬ, ПЕСОЧНАЯ НАСАДКА, ОБЩИЙ КОЭФФИЦИЕНТ СОПРОТИВЛЕНИЯ

## ЗМІСТ

### ВСТУП

## 1 КОНСТРУКЦІЯ І ПРИНЦИП ДІЇ НАПІРНИХ ГІДРОЦИКЛОНІВ, ОСНОВНІ ХАРАКТЕРИСТИКИ

1.1 Характеристики закручених потоків

1.2 Принцип дії гідроциклону

1.3 Рух рідини в гідроциклоні

1.4 Зміна основних властивостей суспензії в гідроциклоні

1.5 Принцип дії циклонно-вихрової газової печі

## 2 РОЗРАХУНКІВ ПРОДУКТИВНОСТІ ГІДРОЦИКЛОНІВ

2.1 Аналіз сучасних методів розрахунків параметрів (продуктивності)  
гідроциклонів

2.2 Розробка методу математичного моделювання опору гідроциклону

2.3 Аналіз впливу конструктивних і режимних параметрів на коефіцієнт  
опору гідроциклону

## 3 ОХОРОНА ПРАЦІ

3.1 Аналіз умов праці

3.2 Заходи з поліпшення умов праці

3.3 Виробнича санітарія

3.4 Електробезпека

3.5 Протипожежна безпека

3.6 Засоби індивідуального захисту

## ВИСНОВОК

## ПЕРЕЛІК ДЖЕРЕЛ ПОСИЛАНЬ

## ВСТУП

Сучасний стан промисловості та економіки України висуває одним з основних вимог подальший розвиток технічного прогресу в країні, зменшення капітальних витрат і людських ресурсів в процесі виробництва.

Головне завдання полягає в забезпеченні зростання добробуту народу на основі сталого, поступального розвитку народного господарства, прискорення науково-технічного прогресу і переведення економіки на інтенсивний шлях розвитку, більш раціональне використання виробничого потенціалу України, всебічної економії всіх видів енергетичних ресурсів.

Останнім часом відзначається поширення циклону-вихрових пристроїв в різних областях техніки, що обумовлено можливістю інтенсифікації робочих процесів. Спеціалізовані дослідження промислових печей показують, що циклон-вихрові пристрої є одними з найбільш перспективних нагрівальних пристроїв. Циклон-вихрові пристрої забезпечують значну інтенсифікацію теплообміну, дозволяють підвищити швидкість і якість нагріву виробів, знизити витрату палива. Все це відповідає сучасним напрямкам у розвитку термічних печей.

Переваги циклон-вихрових пристроїв визначаються аеродинамічною структурою і особливою організацією руху потоків, тому механіка газів набуває тут особливого значення.

Одним з ефективних енергозберігаючих методів при термообробці довгомірних виробів є застосування місцевого нагріву в термічній печі. Організація місцевого нагріву дозволяє відмовитися від будівництва і експлуатації печей великих розмірів, що дає значну економію палива і матеріальних засобів, а також дозволяє більш раціонально використовувати виробничі площі підприємств для інших технологічних цілей.

Найбільш привабливим для цих цілей є застосування циклонних топків, або циклон-вихрових камер згоряння.

Циклон-вихрові камери згоряння у вигляді циклонних топок знайшли застосування в різних галузях народного господарства. Для плавлення кольорових металів в електронній та радіотехнічній промисловості використовуються циклонні тигельні печі, застосування яких поліпшило як процес плавлення, так і збільшило коефіцієнт використання тепла палива. Для спалювання мазуту в котельних агрегатах розроблена циклона топка. Для місцевого нагріву довгомірних прутків з тугоплавких металів розроблена і впроваджена прохідна циклонна піч, яка показала задовільні результати.

При створенні такої печі необхідно було розглянути ряд питань, що стосуються як конструктивного виконання печі, так і питань теплообміну і аеродинаміки. При виборі конструктивного виконання печі прагнули розробити піч, яка при мінімальних витратах палива забезпечувала б мінімум шумових ефектів. Для інтенсифікації процесів горіння і теплообміну в печі застосована циклон-вихрова камера згоряння.

*Актуальність роботи* полягає в розробці енергоефективної системи термообробки довгомірних виробів в термічних печах.

*Метою дипломної роботи* є отримання аналітичної залежності, що зв'язує розрахунок продуктивності гідроциклону з його коефіцієнтом опору.

*Об'єктом дослідження* є енергоефективні циклон-вихрові пристрої термічних печей.

*Предметом дослідження* є процес створення системи ефективного використання тепла палива в циклонних топках термічних печей.

*Методи дослідження.* Використано розрахунково-дослідницький метод, заснований на результатах досліджень і експлуатаційних даних, а також, розрахунок окремих складових технологічного процесу.

*Особистий внесок.* Наукові результати, які викладено в дипломній роботі, отримані особисто автором.

*Апробація роботи.* Положення роботи викладені в XXIII студентській науково – технічній конференції студентів, магістрантів, аспірантів і викладачів Інженерного інституту Запорізького національного університету



«Металургія та енергозбереження як основа сучасної промисловості»  
(м. Запоріжжя, 2018).

*Структура та обсяг роботи.* Магістерська робота включає вступ, три розділи, висновки та перелік джерел посилань з 46 позиції. Загальний обсяг складає 92 сторінки, у тому числі 10 ілюстрації та 12 таблиць.

## 1 КОНСТРУКЦІЯ І ПРИНЦИП ДІЇ НАПІРНИХ ГІДРОЦИКЛОНІВ, ОСНОВНІ ХАРАКТЕРИСТИКИ

Топковим пристроєм або топкою називається частина котельного агрегату, призначена для спалювання палива, при цьому хімічна енергія палива перетворюється на теплову енергію димових газів [1]. Димові газу цю теплову енергію передають екранним трубам, всередині яких відбувається утворення пароводяної суміші.

До топок ставляться такі вимоги:

- надійність в роботі;
- простота конструкції;
- робота з мінімальним хімічним і механічним недожогом;
- можливість роботи на резервному паливі;
- можливість роботи при широкому діапазоні регулювання

теплового навантаження.

Основні способи спалювання палива:

- шаровий;
- факельний;
- вихровий;
- в киплячому шарі.

Шарові топки використовують тільки тверде паливо та підрозділяються на топки з щільним шаром і топки з киплячим шаром.

У топках з щільним шаром паливо спалюється в шарі, який лежить на колосникових ґратах і продувається повітрям знизу вгору. Застосовують в котельних агрегатах продуктивністю до 40 т/год пари для спалювання бурого і кам'яного вугілля, кускового торфу, горючого сланцю і деревних відходів. Недоцільно використовувати шарові топки для спалювання антрацитів, антрацитового штибу, бурого вугілля, фрезерного торфу та відходів вуглезбагачення, тому що спалювання цих видів палива відбувається з

великими втратами від механічного та хімічного недопоу. Шарові топки - перші пристрої для спалювання твердого палива, які широко застосовують.

Шарові топки поділяють на 3 класи [2]:

- з нерухомими колосниковими ґратами і нерухомим шаром палива;
- з нерухомими колосникових ґратами і рухомим шаром палива;
- з рухомими ґратами.

### 1.1 Характеристики закручених потоків

Головне завдання полягає в тому, щоб на основі всебічного використання досягнень науки і техніки забезпечити подальше значне зростання промисловості і підвищення продуктивності праці.

Необхідно прискорити науково-технічний прогрес на основі широкого розвитку наукових досліджень і швидкого використання їх результатів у виробництві. У нашій країні за останні роки розгорнута велика робота по створенню прогресивних конструкцій машин і впровадження їх у виробництво. До такого обладнання відносяться гідроциклони, які одержали поширення у вугільній, металургійній, хімічній, паперовій, харчовій та інших галузях промисловості.

У різних галузях промисловості поряд з перемішуванням до числа робочих процесів, що протікають в системах тверде тіло - рідина і рідина - рідина, відносять поділ, згущення і зневоднення.

Гідроциклони є найбільш простими за конструкцією і дешевими апаратами, що використовують дію відцентрових сил. Вони компактні, мають високу продуктивність і нескладні в експлуатації.

Вперше гідроциклони були застосовані в 1939 р для згущення лесової суспензії, яка використовувалася в якості середовища для збагачення вугілля. У металургійній промисловості гідроциклони застосовуються для відділення

окалини, що потрапляє в воду, що охолоджує внутрішні поверхні прокатних станів.

У хімічній промисловості за допомогою гідроциклонів відокремлюють проміжні продукти або відходи у вигляді суспензії, наприклад, при вилуговуванні, осадженні, кристалізації, полімеризації і конденсації, для попереднього згущення тонких опадів гідрату окису алюмінію, цинкового і свинцевого пилу і ін.

Гідроциклони діаметром менше 25мм знайшли застосування в гомогенних атомних реакторах для видалення твердих нерозчинних продуктів поділу та корозії з пального і теплоносія. В умовах високих температур і тисків гідроциклон незамінний, так як не має рухомих частин і ущільнень.

Це свідчить про можливість застосування гідроциклонів для видалення суспензій з систем високого тиску і температур в енергетичних установках.

Гідроциклони доцільно застосовувати для освітлення виробничих стічних вод, так як при цьому різко скорочуються розміри відстійників (або вони зовсім відсутні), а також необхідну кількість води.

Останнім часом гідроциклони стали застосовувати в харчовій промисловості. При виробництві крохмалю необхідно розділяти злиплі частки крохмалю та клейковини, що дуже добре досягається в полі зрізу зусиль гідроциклону. Крім того за допомогою гідроциклонів проводиться попереднє очищення від піску і промивка крохмального молока. І, нарешті, для очищення вапняного молока від піску та відділення твердої фази від соку другої сатурації в цукровому виробництві застосування гідроциклонів також дало позитивні результати.

У м'ясній промисловості гідроциклони в основному застосовуються для знежирення робочої води, що йде в каналізацію, і відділення шматочків кістки при виробництві харчових жирів.

Гідроциклони широко використовуються в різних галузях промисловості з метою згущення, освітлення, промивання твердої фази, класифікації суспензій і збагаченні природних копалин, також гідроциклони застосовуються для класифікації та збагачення в рідкому середовищі високообразівних матеріалів, згущення пульпи, очищення різних рідин від нафтопродуктів і інших забруднюючих домішок.

На збагачувальних фабриках гідроциклони застосовують при класифікації в замкнутих циклах подрібнення, класифікації у відкритому циклі, збагачення у водному середовищі (по гідравлічній крупності), збагачення у важких суспензіях.

Цими загальними напрямками охоплюються різноманітні конкретні завдання. Найбільш важливим напрямком є класифікація в циклах подрібнення, де зайнято переважну кількість гідроциклонов, встановлених на збагачувальних фабриках. Особливо доцільно використовувати гідроциклони в поєднанні з іншими апаратами.

У практиці очисних стічних вод в нашій країні гідроциклони застосовуються з 1940 року. До виробничих стічних вод відносяться води, використані в процесах виробництва і забруднені тими чи іншими домішками. По складу вони можуть бути дуже різними. Залежно від виду оброблюваної сировини і технологічного процесу виробництва кількість забруднень в цих водах різко змінюється. Виробничі стічні води підрозділяються на забруднені і незабруднені.

Фізико-хімічні методи очищення підрозділяються на реагентні і безреагентніє.

До реагентних відносяться методи, при яких для осадження і виділення сполук з стоків застосовуються спеціальні речовини - коагулянти (солі алюмінію і заліза, аміачна вода та ін.) і флокулянти (поліакриламід, синтетичні полімери, природні полімери, неорганічні речовини, наприклад активна кремнієва кислота) .

Очищення стічних вод реагентним способом включає кілька стадій: приготування і дозування реагентів, змішання їх з водою, пластівців, відділення хлопьевидний домішок від води.

До безреагентних методів належать: сорбційні, електрохімічні, радіаційні та ін. При цих методах виділення або розкладання шкідливих компонентів протікає без введення в реакційну систему додаткових хімічних сполук. Проте, здійснення процесу вимагає підведення додаткової енергії ззовні і використання нейтральних речовин в якості сорбентів, які при регенерації дають вторинне забруднення у вигляді шламу.

До електрохімічних методів очищення відносяться іонний обмін, електроліз та ін. Іонний обмін - це оборотна хімічна реакція між твердою речовиною (іонітом) і розчином електроліту. Іоніти представляють собою тверді нерозчинні речовини, здатні обмінювати свої іони з іонами зовнішнього середовища. Найбільш широке застосування знайшли синтетичні іонообмінні смоли, цеоліти (алюмосилікати), гідроксиди та солі полівалентних металів. Іонний обмін є одним з основних способів знесолення, опріснення і пом'якшення води, їм можна досягти будь-якого ступеня очищення, утилізувати компоненти, від яких проводиться очищення. При очищенні стічні води проходять через іонітові фільтри, заповнені смолою, цеолітами і ін.

В останні роки широке застосування знайшли мембранні процеси очищення стічних вод (ультрафільтрація, зворотний осмос, мікрофільтрація, витяг через мембрани, діаліз, електродіаліз). Мембрани виготовляють з ацетатів целюлози, поліаміду, фторопласту, полікарбонату, полівінілхлориду та інших полімерів, скла, графіту, оксидів металу.

Ультрафільтрація характеризується великими швидкостями руху, що розділяє рідини. При підвищенні тиску і зменшення швидкості руху рідини настає зворотний осмос. При зворотноосмотичних процесах мембрани можуть затримувати практично всі розчинні речовини і взвісі мінерального і

органічного характеру (в тому числі мікроби, бактерії, віруси, спори грибків та ін.).

Мембранні процеси поділу рідин, сумішей, демінералізації води, поділу та концентрування стічних вод є найбільш ефективними в екологічному відношенні, так як дозволяють отримувати від стічних вод цінні речовини, повторно використовувати воду, регенерувати відпрацьовані розчини.

Біохімічний (біологічний) метод застосовується для очищення води від багатьох розчинних органічних речовин, іонів важких металів (наприклад, від іонів хрому за допомогою бактерій, які назвали дехроматіканс) і деяких неорганічних речовин (сірководню, аміаку, нітритів та ін.). Контроль здійснюється шляхом здатності мікроорганізмів використовувати ці речовини для харчування. Контактуючи з органічними речовинами, мікроорганізми частково руйнують їх, перетворюючи в воду, діоксид вуглецю та інші речовини. Інша частина органічних речовин йде на утворення біомаси. Відомі аеробні та анаеробні методи біохімічного очищення стічних вод.

Аеробний метод заснований на використанні аеробних мікроорганізмів, для життєдіяльності яких необхідні постійний приплив кисню і температура (20...40) °С.

Найбільш доцільним методом очищення стічних вод є застосування гідроциклонов, вони компактні, мають високу продуктивність і нескладні в експлуатації.

Таким чином, застосування гідроциклонов в промисловості дозволить спростити технологічні процеси, замінити громіздкі обладнання компактними установками гідроциклонов, автоматизувати управління і полегшити важку фізичну працю.

## 1.2 Принцип дії гідроциклону

Гідроциклони (рис.1.1) - апарати для класифікації тонкоподрібнених матеріалів за гравітаційною крупністю в відцентровому полі, створюваному в результаті обертання пульпи. Вони застосовуються також для збагачення дрібно- і середньозернистих руд, у важких суспензіях.

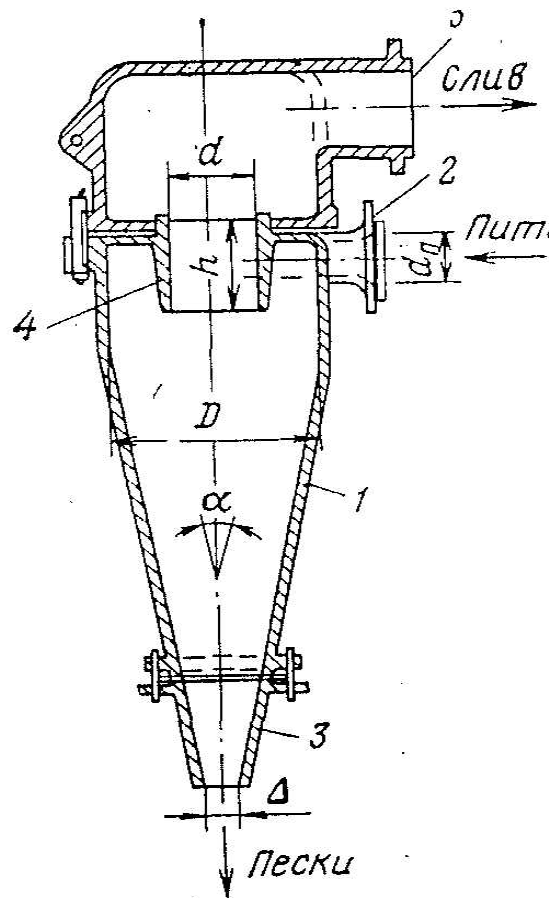


Рисунок 1.1 - Схема гідроциклону

На рисунку 1.1 прийнято наступні позначення: 1 - циліндричний посуд; 2 - живильна насадка; 3 - піщана насадка; 4 - зливний патрубок; 5 - зливна труба.

Гідроциклони представляють собою апарат, що складається з циліндричної частини, до якої до низу примикає широкою основою конічна частина (1), а зверху кріпиться проміжна зливна камера з патрубком для відводу верхнього продукту (5). Між циліндричною частиною і



зливною камерою встановлюється діафрагма з патрубком (4), а в нижній частині конуса закріплюються змінні насадки (3). Рухомих частин в гідроциклоні немає.

Зазвичай гідроциклон встановлюють вертикально (вершиною конуса вниз), але він може бути встановлений і горизонтально або похило.

Вихідна пульпа подається в гідроциклон під тиском через живильну насадку (2), установлену тангенціально безпосередньо під кришкою апарату, в верхню частину циліндра і набуває круговий рух. При цьому виникають значні відцентрові сили інерції, що виникають при обертанні пульпи завдяки тангенціальній подачі живлення і осьовому розвантаженню продуктів, що перевищують в десятки і сотні разів силу тяжіння, під дією яких важча фаза (більш великі і важкі частинки), відкидаються до стінки корпусу (1) гідроциклону, тобто важка фаза рухається від осі гідроциклону до його стінок по спіральній траєкторії вниз і через нижню піщану насадку (3) викидається з гідроциклону. Більш легка фаза (більш тонкі і легкі частинки) рухається у внутрішньому спіральному потоці, направленому вгору, і викидається з гідроциклону через патрубок для відводу верхнього продукту.

Уздовж осі гідроциклону утворюється повітряний стовп, що має важливе значення для дії гідроциклону.

Характер руху рідини в гідроциклоні визначається швидкістю рідини в тангенціально розташованому живильному патрубку.

На зважені частинки діють досить великі тангенціальні сили, що підтримують їх в безперервному відносному русі.

Окружна швидкість рідини змінюється, підвищуючись зі зменшенням радіуса конічної частини гідроциклону. Радіальне прискорення сильно зростає зі зменшенням радіуса обертання. Тому корпус гідроциклону має звуження від входу до виходу: при такій формі досягається збільшення відцентрового прискорення.

### 1.3 Рух рідини в гідроциклоні

Картина ліній струму (точніше, проєкцій поверхонь струму на площину, що проходить через вісь гідроциклону) була підтверджена роботами цілого ряду авторів, які застосовували різні методи досліджень. Завдяки тангенціальній подачі і осьового розвантаження в гідроциклоні створюються обертання пульпи і радіальне її переміщення від стінок до розвантажувальних отворів. Обертання пульпи виникає навіть і в разі відсутності тангенціальної подачі живлення, наприклад при подачі живлення через кільцеву щілину по периферії гідроциклону, проте такий спосіб малоефективний і на практиці не застосовується.

Досліди показали, що в перший момент при подачі води в порожній гідроциклон її потік, з живильної насадки потрапляючи на стінку гідроциклону, розтікається по ній тонким шаром, розширюється в міру віддалення від місця подачі. Частина потоку зустрічає опір кришки, і набігає на нижню поверхню останньої. Частина потоку йде по спіралі уздовж стінок конуса до піщаної насадки, через яку виходить тільки частина загального потоку, тому гідроциклон швидко заповнюється рідиною і уздовж його осі утворюється обертовий потік, спрямований до зливного патрубку. Поступальний рух зовнішнього потоку від місця подачі до вершини конуса обумовлюється також зменшенням радіусу обертання і тертям об стінки, що викликають зниження тиску в нижній частині конуса по порівнянню з тиском у верхній частині на тому ж радіусі. Поблизу осі гідроциклону відцентрова сила стає настільки великою, що рідина розривається, утворюється повітряне ядро (вихровий шнур) у вигляді повітряного стовпа.

Таким чином, в гідроциклоні виникають два основних обертових потоки: в одну сторону потоку - зовнішній, який має поступальний рух по спіралі вниз, і внутрішній, що рухається по спіралі вгору до зливного патрубку. Зовнішній потік, підходячи до вершини конуса, ділиться на дві

частини: нижню, яка не змінюючи напрямку поступального руху, йде з гідроциклона через піщану насадку, і верхню, яка утворює внутрішній потік, змінюючи напрямок поступального руху. Між зовнішнім і внутрішнім потоками на рівні трохи нижче кінця зливного патрубку утворюється замкнений кільцевий вихор, в якому рідина одночасно з обертанням навколо осі гідроциклона пересувається з зовнішньої сторони в напрямку до піскової насадки, а з внутрішньої - в напрямку до кришки. Крім цих потоків є так званий подкришечний потік, утворений частиною вихідного живлення, що обтікає кришку, який направляється потім вниз по стінках патрубку і йде в злив, разом з внутрішнім потоком.

У внутрішньому потоці, що представляє циліндричний вихор з повітряним стовпом по осі, можна розрізнити внутрішню і зовнішню частини, обертання в яких проходить за різними законами. Описаний характер вихрового потоку в гідроциклоні зберігається при робочому тиску на вході. Коли тиск дуже низький.

Слід зазначити, що всі без винятку дослідники, які займалися вивченням розподілу потоків в гідроциклоні, відзначають наявність двох основних потоків - зовнішнього і внутрішнього. Відмінність полягає лише в поданні про становище.

Таким чином, при вихровому русі рідини в гідроциклоні утворюються два обертових потоки - зовнішній, що переміщається уздовж стінок конуса вниз до піщаної насадки, і внутрішній циліндричний, спрямований вгору вздовж осі до зливного патрубку. Режим руху рідини в гідроциклоні турбулентний. Передача обертання від периферії всередину відбувається дифузійною і конвекційною під дією крутного моменту сил, в'язкості і переміщення самої рідини. Поблизу геометричної осі апарату відцентрова сила стає настільки великою, що відбувається розрив рідини - навколо осі утворюється повітряне ядро (повітряний стовп). Діаметр його складає 0,6-0,7 діаметра зливного патрубку.

Гідравліка потоків в гідроциклоні вкрай складна, тому що поряд з круговими потоками виникають радіальні і циркуляційні струми, тому точного математичного виразу руху потоків в гідроциклоні досі немає.

У будь-якій точці гідроциклону швидкість руху рідини може бути розкладена на наступні три складові:

- тангенціальну швидкість, спрямовану перпендикулярно радіусу обертання в даній точці на горизонтальній площині. Тангенціальна швидкість пульпи збільшується зі зменшенням відстані від осі, тому в гідроциклоні спостерігається різке зростання відцентрової сили від стінок до осі;

- радіальну швидкість, спрямовану по радіусу гідроциклону всередину його;

- осьову або вертикальну швидкість, спрямовану під прямим кутом до тангенціальної і радіальної швидкостей уздовж осі гідроциклону. Осьова швидкість в зовнішньому потоці спрямована вниз, а у внутрішньому - вгору. Таким чином, між внутрішнім і зовнішнім потоками є конічна поверхня, на якій осьові швидкості дорівнюють нулю. Характер зміни радіальних швидкостей вивчений ще не достатньо.

У кожній точці гідроциклону в площині, перпендикулярній його осі, рідина буде мати швидкість руху, що складається з тангенціальною і радіальною швидкостей.

Абсолютні значення швидкості рідини залежать від великого числа вихідних умов. Тому спроби аналітичного виразу призводять до надзвичайно складних рівнянь, що дає лише якісну характеристику процесу.

При нормальних умовах роботи гідроциклону відцентрова сила, під дією якої знаходиться пульпа, набагато перевищує силу тяжіння. Доказ цьому є також зміна показників роботи зі зміною кута установки гідроциклону, особливо при великих розмірах останнього і при роботі гідроциклону в перевернутому стані. Вплив дій сили тяжіння збільшується зі зменшенням тиску пульпи на вході в гідроциклон.

#### 1.4 Зміна основних властивостей суспензії в гідроциклоні

Під час роботи гідроциклону на рудних пульпах або важких суспензіях частинки твердої фази під дією сукупності сил розподіляються за обсягом апарату відповідно за їх значущістю, щільністю, формою і концентрацією. При цьому дотримується наступна основна закономірність: щільність суспензії, крупність і щільність твердих частинок збільшуються в напрямку від осі гідроциклону до його стінок і від зливного патрубку до піщаної насадки. Виняток з цього правила становить лише розподіл зерен легкої фракції при збагаченні у важкій суспензії. В цьому випадку в гідроциклоні, особливо поблизу піщаної насадки, створюється середовище, щільність якого перевищує щільність зерен легкої фракції, тому навіть найбільші зерна останньої не можуть проникнути до стінок апарату в його нижній частині і витісняються через зливний патрубок.

Тверді частинки, потрапляючи в гідроциклон разом з потоком пульпи, залучаються в обертальний рух зі швидкістю, близькою до окружної швидкості рідкої фази. Одночасно вони рухаються щодо пульпи в осьовому і радіальному напрямках у відповідності з діючими на них силами, у тому числі головними являються: відцентрова сила; сила тяжіння; сили, зумовлені впливом рідини.

Чим дрібніше частинки, або чим ближче їх щільність до щільності рідкої фази пульпи, тим відносно більший вплив робить на них опір середовища, тому тим ближче збігаються траєкторії їх руху з лініями струму рідини.

Найтонші і легкі по щільності частки розподіляються в тому ж співвідношенні, між зливом і пісками, що і рідина.

На збагачувальних фабриках гідроциклони працюють на порівняно щільних пульпах. Під дією сукупності сил частинки твердої фази пульпи розподіляються по всьому об'єму апарату, причому зберігається наступна основна закономірність: щільність пульпи, крупність і щільність твердих

частинок збільшуються в напрямку від геометричної осі гідроциклону до його стінок і від зливного патрубку до піщаної насадки.

В результаті підвищення щільності пульпи і крупності часток в нижній частині гідроциклону ущільнена пульпа обертається майже як тверде тіло. Можна виділити чотири зони в обсязі працюючого гідроциклону: зону пісків, що займає простір поблизу піщаної насадки; зону живлення вихідної пульпи, що розташовується концентрично всередині зони пісків; проміжну зону, в якій крупність твердої фази і щільність пульпи змінюються від крупності і щільності вихідної пульпи до крупності і щільності зливу; зону зливу, що знаходиться безпосередньо під зливним патрубком. Залежно від конструкції гідроциклону (зокрема від кута конусності) і від умов роботи відносний проєм цих зон може істотно змінитися. У гідроциклоні утворюються поверхні постійної щільності і постійної крупності.

Зі зміною параметрів роботи в гідроциклоні, головним чином, розвантажувального відношення, буде змінюватися і розподіл суспензії в ньому.

Описаний характер розподілу суспензії обумовлює високу якість розділення мінералів по щільності в важкосередовищному гідроциклоні. Підвищення щільності суспензії і крупності матеріалу в нижній частині гідроциклону впливає на швидкість. Тут суспензія обертається майже як тверде тіло - окружна швидкість збільшується прямопропорційно радіусу, причому абсолютна її величина менше, ніж при роботі гідроциклону на воді. Гранична щільність, по якій поділяється збагачуваний матеріал, завжди більша за густину суспензії, яка подається в гідроциклон, і залежить як від характеристики утяжелителя, так і від параметрів роботи гідроциклону, головним чином від розвантажувального відношення.

Розвантажувальне відношення (відношення діаметра піщаної насадки до діаметру дренажного патрубка) є найважливішим геометричним параметром роботи промислових гідроциклонів.

Зміна розвантажувального відношення суттєво впливає на всі показники роботи гідроциклону і перш за все на перерозподіл обсягів пісків і зливу. З його збільшенням відносна кількість пісків зростає, відповідно до цього зменшується вихід зливу і вміст твердої фази в пісках; тверда фаза зливу і пісків стає тоншою. Однак крупність твердої фази зливу знижується тільки до певної межі. Подальше збільшення розвантажувального відношення тільки погіршує ефективність класифікації, розріджує і забруднює піски шлаками.

Необхідно відзначити, що при зміні щільності і характеристики крупності живлення гідроциклону одним і тим же розвантажувальним відношенням відповідають різні значення показників.

Ефективність класифікації досягає максимуму при оптимальному розвантажувальному відношенні. Якщо зміна розвантажувального відношення проводиться за рахунок зміни діаметра піщаної насадки, то об'ємна продуктивність гідроциклону при цьому змінюється мало, якщо ж за рахунок діаметра зливного патрубку, то продуктивність змінюється прямопропорційно цьому діаметру.

### 1.5 Принцип дії циклонно-вихрової газової печі

Циклонні топки знайшли застосування в різних галузях народного господарства. Так для плавлення кольорових металів в електронній та радіотехнічній промисловості використовуються циклонні тигельні печі, застосування яких поліпшило як процес плавлення, так і збільшило коефіцієнт використання тепла палива [1].

Для розробки таких печей і вибору тягодуттьових машин необхідно знати аеродинамічний опір топки, який визначається її коефіцієнтом опору. Визначення розрахункового визначення коефіцієнта аеродинамічного опору однокамерних циклонних топок без урахування зміни температурного чинника в топці в якійсь мірі вивчені [3]. Тому визначення аналітичної

залежності за розрахунком коефіцієнта циклонних топок, з урахуванням впливу температурного чинника в топці, є актуальною і може істотно розширити діапазон пізнання в області неізотермічних течій закручених потоків.

В даний час на заводах з виробництва дроту для електролампової промисловості одна з технологічних операцій - нагрівання прутків довжина яких у багато разів (в 100 і більше) перевершує діаметр. Нагрівання таких виробів здійснюється шляхом просування їх з певною швидкістю всередині газової печі, в якій заздалегідь підготовлена газоповітряна суміш під великим тиском (понад 0,5 МПа) подається в топку, де вона згорає, а полум'я з великим шумом залишає топку через ряд отворів, розташованих по всій довжині камери, і потрапляє безпосередньо в атмосферу цеху. Рівень шуму перевищує допустимі санітарні норми, а димові гази в складі яких є оксиди металупідвищують температуру повітря і забруднюють атмосферу. Недоліками таких печей є також наявність великих втрат теплоти з газами і застосування повітря великого тиску, що збільшує енерговитрати і нагрів виробів. У зв'язку із зазначеним виникла необхідність розробки печі, позбавленої перерахованих недоліків.

Аналіз літературних джерел показав, що і за кордоном нагрівальні печі для термообробки довгомірних виробів мають ті ж недоліки, тому на основі досліджень була розроблена і введена в експлуатацію прохідна газова піч для нагрівання довгомірних прутків.

Піч складається з циліндричного муфеля, що представляє собою камеру згоряння, укладеного в два концентрично розташованих циліндра, що утворюють внутрішню і зовнішню концентричні порожнини. За внутрішньої порожнини проходять відходять димові гази, що утворюються в результаті згоряння природного газу в закрученому факелі всередині муфеля, а по зовнішній - повітря, яке нагрівається за рахунок теплоти відхідних газів і надходить в тангенціально розташовані канали завихрителя. У ці канали тонкими струмками подається природний газ, що



забезпечує якісне сумішоутворення і повноту згоряння. Підведення газу в піч здійснюється по патрубку, а повітря по патрубку, тангенціального до корпусу печі. Пруток проходить через осьовий отвір корпусу, а виходить через осьовий отвір завихрителя.

Для запобігання виходу продуктів згоряння в робочу зону через осьовий отвір конуса в ньому виконані похилі отвори, через які з порожнини кришки під невеликим тиском (до 0,15 МПа) подається повітря. Розпалювання печі і стабілізація полум'я здійснюється від дифузійного факела запальника, що всмоктується всередину топки за рахунок завихрителя. Димові гази відводяться через трубу.

## 2 РОЗРАХУНКІВ ПРОДУКТИВНОСТІ ГІДРОЦИКЛОНІВ

### 2.1 Аналіз сучасних методів розрахунків параметрів (продуктивності) гідроциклонів

Для того щоб підійти до технологічного розрахунку гідроциклонів, необхідно зупинитися спочатку на методах практичних розрахунків основних показників їх роботи, таких, як продуктивність, гранулометричний склад продуктів класифікації і змісту в них твердого. Практичні розрахунки ґрунтуються на теоретичних положеннях, і в той же час вимагають залучення великого експериментального матеріалу і даних практики.

Розглянемо методи розрахунку продуктивності і крупності граничних зерен.

Гідроциклон можна розглядати як своєрідний гідравлічний опір на живильному трубопроводі. Його пропускна здібність залежить від втрати напору, яка визначається, перш за все, розмірами його живильного і розвантажувального отворів, а також конструкцією і шорсткістю стінок.

Для того щоб через гідроциклон пропустити необхідну кількість пульпи і отримати певні технологічні показники, необхідно створити в живильному трубопроводі, безпосередньо перед входною насадкою, такий тиск, який подолав би гідравлічний опір в останній, а також в зливному патрубку і відцентровий тиск, що виникає при обертанні рідини. Найбільшу частку серед загальних втрат напору займають втрати, пов'язані з відцентровим тиском. Втрати на вході становлять, для нормального співвідношення діаметрів зливного і живильного отворів (1 – 1,2), близько 20%.

До визначення втрат напору в гідроциклоні підходять різними шляхами. Одним з таких шляхів є визначення відцентрового тиску у стінки при обертанні рідини, а іншим - застосування рівняння Бернуллі.

Виходячи з рівняння Бернуллі, була виведена розрахункова формула продуктивності  $Q$  (в л/хв) гідроциклонов :

$$Q = 5 \cdot k_D \cdot k_\alpha \cdot d_n \cdot d \cdot \sqrt{g \cdot p};$$

$$k_D = 0,8 + \frac{1,2}{1 + 0,1 \cdot D};$$

$$k_\alpha = 0,79 + \frac{0,044}{0,0379 + \operatorname{tg} \frac{\alpha}{2}}.$$

де  $k_D$  - поправочний коефіцієнт на діаметр гідроциклону  $D$ ;

$k_\alpha$  - поправочний коефіцієнт на кут конуса гідроциклону  $\alpha$ ;

$d_n$  - діаметр живильного отвору, см;

$d$  - діаметр зливного патрубку, см;

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

$p$  - тиск на вході в гідроциклон,  $\text{кгс/см}^2$ ;

$\alpha$  - кут конусності гідроциклону, градуси.

В останні роки в технічній літературі з'явилося багато різних формул для розрахунку продуктивності і крупності граничного зерна. Велика розмаїтість формул ускладнює виконання практичних розрахунків і вибір гідроциклонів. Тому слід зупинитися на зіставленні цих формул з метою вибору найбільш прийнятних з них для розрахунків в практиці збагачення. В таблиці 2.1 наведені деякі формули для визначення продуктивності. Для зручності зіставлення формул вони дані в одиницях, прийнятих авторами. При цьому прийнято, що розвантаження продуктів вільна, без протитиску.

Зіставляючи ці формули, можна розподілити їх за чотирма основними групами, кожна з яких містить певні геометричні параметри.

Загальний вигляд формул цих груп наступний:

- 1 група  $Q = k_1 \times d_n^a \times \sqrt{p}$ ;
- 2 група  $Q = k_2 \times d_n^a \times d^b \times \sqrt{p}$ ;
- 3 група  $Q = k_3 \times d_n^a \times d^b \times f(D, \alpha) \times \sqrt{p}$ ;
- 4 група  $Q = k_4 \times f(D, d_n, d, \alpha, \alpha_0, T, \rho_0 \dots) \times \sqrt{p}$ .

До групи 1 відносяться найпростіші формули, що враховують тільки діаметр живильного отвору і які відрізняються між собою лише величиною коефіцієнта  $\kappa$ , що становить 18,5...26,6. У більшості випадків, продуктивність, розрахована за формулами групи 1, значно відрізняється від експериментальної.

До групи 2 відносяться формули, що враховують поряд з діаметром живильного отвору  $d_n$  ще й діаметр зливного патрубку  $d$ .

У формулах групи 3, поряд з головними параметрами, визначаючими пропускну здатність ( $d_n$  і  $d$ ), зроблена спроба врахувати також кут конусності і діаметр гідроциклону. Ці формули відрізняються між собою видом і складністю функцій залежно від  $D$  і  $\alpha$  і показниками ступеня при  $d_n$  і  $d$ .

До групи 4 належать формули складного типу, в яких автори намагаються врахувати вплив деяких додаткових факторів.

Складні формули групи 4, автори яких намагалися врахувати цілий ряд другорядних факторів, здавалося б, повинні були давати більш високу точність у порівнянні з більш простими формулами груп 2 або 3. Однак на практиці застосування складних формул пов'язані з використанням низки емпіричних коефіцієнтів, придатних тільки в вузьких межах експериментів, проведених авторами цих формул, в зв'язку, з чим ці формули в загальному випадку дають меншу точність, ніж більш прості, що враховують головні параметри, що впливають на продуктивність гідроциклонів. Тому постало завдання визначення можливості застосування існуючих формул по розрахунку продуктивності для гідроциклону, розрахованого за формулами, запропонованими різними авторами і представлені в таблиці 3.1.

Для з'ясування застосовності існуючих формул виконаний розрахунок продуктивності гідроциклону наступних параметрів:

- діаметр гідроциклону  $D = 500$  мм;
- діаметр живильного патрубку  $d_n = 156$  мм;
- діаметр зливного патрубку  $d = 170$  мм;
- діаметр піскової насадки  $\Delta = 40$  мм;

-тиск на вході  $P_{вх} = 0,2$  МПа;

-щільність суспензії  $\rho = 1000$  кг/м<sup>3</sup>.

Результати розрахунку, представлені в таблиці 2.1 і на рисунку 2.1. Розкид пояснюється індивідуальністю проведення дослідів на гідроциклонах властивому кожному автору і отримання емпіричної формули, властивою досліджуваному гідроциклону. Тому виникає необхідність розробки єдиної теорії розрахунку продуктивності гідроциклонів справедливою для розрахунку будь-яких гідроциклонів з різними геометричними параметрами.

| Таблиця 2.1 - Розрахунок продуктивності гідроциклону |   |  |  |   |
|--|---|--|--|---|
| Автор  | Формула в одиницях, прийнятих автором                                   | Розмірність величин  | Розрахунок   | Результат розрахунку, м <sup>3</sup> /ГОД |
| 1  | 2   | 3  | 4  | 5   |
| <b>Перша група</b>                                   |   |  |  |   |
| Честон   | $Q = 21 \cdot d_n^2 \cdot \sqrt{p}$ , м <sup>3</sup> /ГОД               | $d_n$ в см;<br>Р в кгс/см <sup>2</sup> ;                                   | $Q = 21 \cdot 15,6^2 \cdot \sqrt{2}$   | 433,6                                     |
| Смірняков  | $Q = 1,53 \cdot k \cdot F \cdot \sqrt{H}$ , м <sup>3</sup> /ГОД         | F в см <sup>2</sup> ; H в м вод. ст.;<br>к=0,42                            | $Q = 1,53 \cdot 0,42 \cdot \frac{3,14 \cdot 15,6^2}{4} \cdot \sqrt{20}$        | 549                                       |
| Замбровський   | $Q = 1,53 \cdot d_n^2 \cdot \sqrt{H}$ , м <sup>3</sup> /ГОД             | $d_n$ в см; H в кгс/см <sup>2</sup>  | $Q = 1,53 \cdot 15,6^2 \cdot \sqrt{2}$   | 526,57                                    |
| Аконов   | $Q = 23,6 \cdot F \cdot \sqrt{H}$ , л/хв                                | F в см <sup>2</sup> ;<br>H в кгс/см <sup>2</sup>                           | $Q = 23,6 \cdot \frac{3,14 \cdot 15,6^2}{4} \cdot \sqrt{2}$                    | 382,56                                    |
| Курбатов   | $Q = 0,36 \cdot F \cdot \sqrt{2 \cdot g \cdot H}$ , м <sup>3</sup> /ГОД | F в см <sup>2</sup> ;<br>H в кгс/см <sup>2</sup><br>g=9,81м/с <sup>2</sup> | $Q = 0,36 \cdot \frac{3,14 \cdot 15,6^2}{4} \cdot \sqrt{2 \cdot 9,81 \cdot 2}$ | 430,81                                    |

Продовження таблиці 2.1

| 1                  | 2   | 3   | 4  | 5      |
|--------------------|---|---|--|--------|
| Нехороший          | $Q = \frac{\pi \cdot d_n^2}{4} \cdot \sqrt{\frac{2 \cdot g \cdot H}{\xi \cdot \rho}}, \text{ м}^3/\text{год}$ | $d_n$ в см;<br>$H$ в кгс/см <sup>2</sup> ;<br>$\rho$ в г/см <sup>3</sup> ;<br>$g=9,81$ м/с <sup>2</sup> ;<br>$\xi = 6$ при<br>вертикальному<br>розташуванні<br>гідроциклону | $Q = \frac{3,14 \cdot 15,6^2}{4} \cdot \sqrt{\frac{2 \cdot 9,81 \cdot 2}{6 \cdot 1}}$                  | 488,55 |
| <i>Друга група</i> |   |   |  |        |
| Механобр           | $Q = 5 \cdot k \cdot d_n \cdot d \cdot \sqrt{g \cdot H}, \text{ л/хв}$ $k = \frac{0,81}{\alpha^{0,2}}$        | $\alpha$ в радіанах; $d_n$ і<br>$d$ в см; $H$ в кгс/<br>см <sup>2</sup> ; $g=9,81$ м/с <sup>2</sup> ;   | $Q = 5 \cdot 0,98 \cdot 15,6 \cdot 17 \cdot \sqrt{9,81 \cdot 2}$ $k = \frac{0,81}{0,384^{0,2}} = 0,98$ | 345,36 |
| Жангарін           | $Q = 0,25 \cdot \frac{\pi}{4} \cdot d_n \cdot d \cdot \sqrt{2 \cdot g \cdot H},$ $\text{ м}^3/\text{год}$     | $d_n$ і $d$ в см; ; $H$ в<br>кгс/см <sup>2</sup> ; $g=9,81$ м/<br>с <sup>2</sup> ;  | $Q = 0,25 \cdot \frac{3,14}{4} \cdot 15,6 \cdot 17 \cdot \sqrt{2 \cdot 9,81 \cdot 2}$                  | 326,02 |

Продовження таблиці 2.1

| 1                    | 2  | 3  | 4   | 5      |
|----------------------|--|--|---|--------|
| Травинський          | $Q = 15,8 \cdot d_n \cdot d \cdot \sqrt{\frac{H}{\rho}}$ , л/хв                                      | $d_n$ і $d$ в см; ; Н в<br>кгс/см <sup>2</sup> ; $\rho$ в г/см <sup>3</sup><br>;       | $Q = 15,8 * 15,6 * 17 * \sqrt{\frac{2}{1}}$                   | 355,5  |
| Модер і<br>Дальстром | $Q = k \cdot (d_n \cdot d)^{0,9} \cdot \sqrt{H}$ , м <sup>3</sup> /год                               | $d_n$ і $d$ в см; ; Н в м<br>вод. ст.  | $Q = 0,433 \cdot (15,6 \cdot 17)^{0,9} \cdot \sqrt{20}$       | 300,7  |
| Ізмайлова            | $Q = \mu \cdot d_n \cdot \sqrt{d^2 \cdot \Delta^2} \cdot \sqrt{2 \cdot g \cdot H}$ ,<br>$\mu = 0,27$ | $d_n$ і $d, \Delta$ в см; Н в<br>кгс/см <sup>2</sup> ; $g=9,81$ м/<br>с <sup>2</sup> ; | $Q = 0,27 * 15,6 * \sqrt{17^2 * 0,4^2} * \sqrt{2 * 9,81 * 2}$ | 448,66 |
| Фонтейн              | $Q = d_n \cdot d \cdot \sqrt{P}$ , м <sup>3</sup> /год   | $d_n$ і $d$ в см; P в<br>кгс/см <sup>2</sup>   | $Q = 15,6 \cdot 17 \cdot \sqrt{2}$                            | 375,05 |



Продовження таблиці 2.1

| 1                      | 2   | 3  | 4   | 5    |
|------------------------|---|--|---|------|
| <b>Третя група</b>     |   |  |   |      |
| Циперович і Долинський | $Q = 2,4 \cdot F \cdot \frac{d}{D} \cdot \sqrt{\frac{2 \cdot g \cdot H}{\rho}}, \text{ м}^3/\text{ГОД}$ | F в $\text{см}^2$ ; diD в м; H<br>в м вод. ст.; $\rho$ в<br>$\text{т}/\text{м}^3$ ;    | $Q = 2,4 \cdot \frac{3,14 \cdot 15,6^2}{4} \cdot \frac{170}{500} \cdot \sqrt{\frac{2 \cdot 9,81 \cdot 20}{10}}$ | 1106 |
| Фальстром              | $Q = 1,7 \cdot F \cdot \frac{d}{D} \cdot \sqrt{2 \cdot g \cdot H}, \text{ см}^3/\text{ГОД}$             | F в $\text{см}^2$ ;<br>diD в см;<br>H в м вод. ст.;<br>$g=9,81 \text{ м}/\text{с}^2$ ; | $Q = 1,7 \cdot \frac{3,14 \cdot 15,6^2}{4} \cdot \frac{17}{50} \cdot \sqrt{2 \cdot 9,81 \cdot 20}$              | 787  |

Продовження таблиці 2.1

| 1                       | 2   | 3  | 4  | 5      |
|-------------------------|---|--|--|--------|
| Курочитський і Шипунова | $Q = 3,48 \cdot k_k \cdot d_n^2 \cdot \sqrt{H}, \text{ м}^3/\text{год}$ $k_k = k_n \cdot \left[ \left( 1,45 - 3,72 \cdot \frac{\Delta}{D} \right) \cdot \frac{d}{D} + 1,35 \cdot \frac{\Delta}{D} - 0,17 \right]$ $k_n = \frac{1}{27,3 \cdot \frac{d_n}{D} - 51,8 \cdot \left( \frac{d_n}{D} \right)^2 - 2,56}$ | $d_n$ в см; ;<br>$H$ в кгс/см <sup>2</sup> ; | $Q = 3,48 \cdot 0,354 \cdot 15,6^2 \cdot \sqrt{2}$ $k_k = 1,092 \cdot \left[ \left( 1,45 - 3,72 \cdot \frac{0,4}{50} \right) \cdot \frac{17}{50} + 1,35 \cdot \frac{0,4}{50} - 0,17 \right] = 0,354$ $k_n = \frac{1}{27,3 \cdot \frac{15,6}{50} - 51,8 \cdot \left( \frac{15,6}{50} \right)^2 - 2,56} = 1,092$ | 423,98 |
| Де Кок                  | $Q = 8 \cdot (d_n \cdot d)^{0,9} \cdot D^{0,5} \cdot \sqrt{\text{tg} \frac{\alpha}{2} \cdot \frac{P}{\rho}},$ <p style="text-align: center;">л/хв</p>   | Перетворена формула;                         | $Q = 8 \cdot (15,6 \cdot 17)^{0,9} \cdot 50^{0,5} \cdot \sqrt{\text{tg} \frac{20}{2} \cdot \frac{2}{1}}$   | 289,9  |

Продовження таблиці 2.1

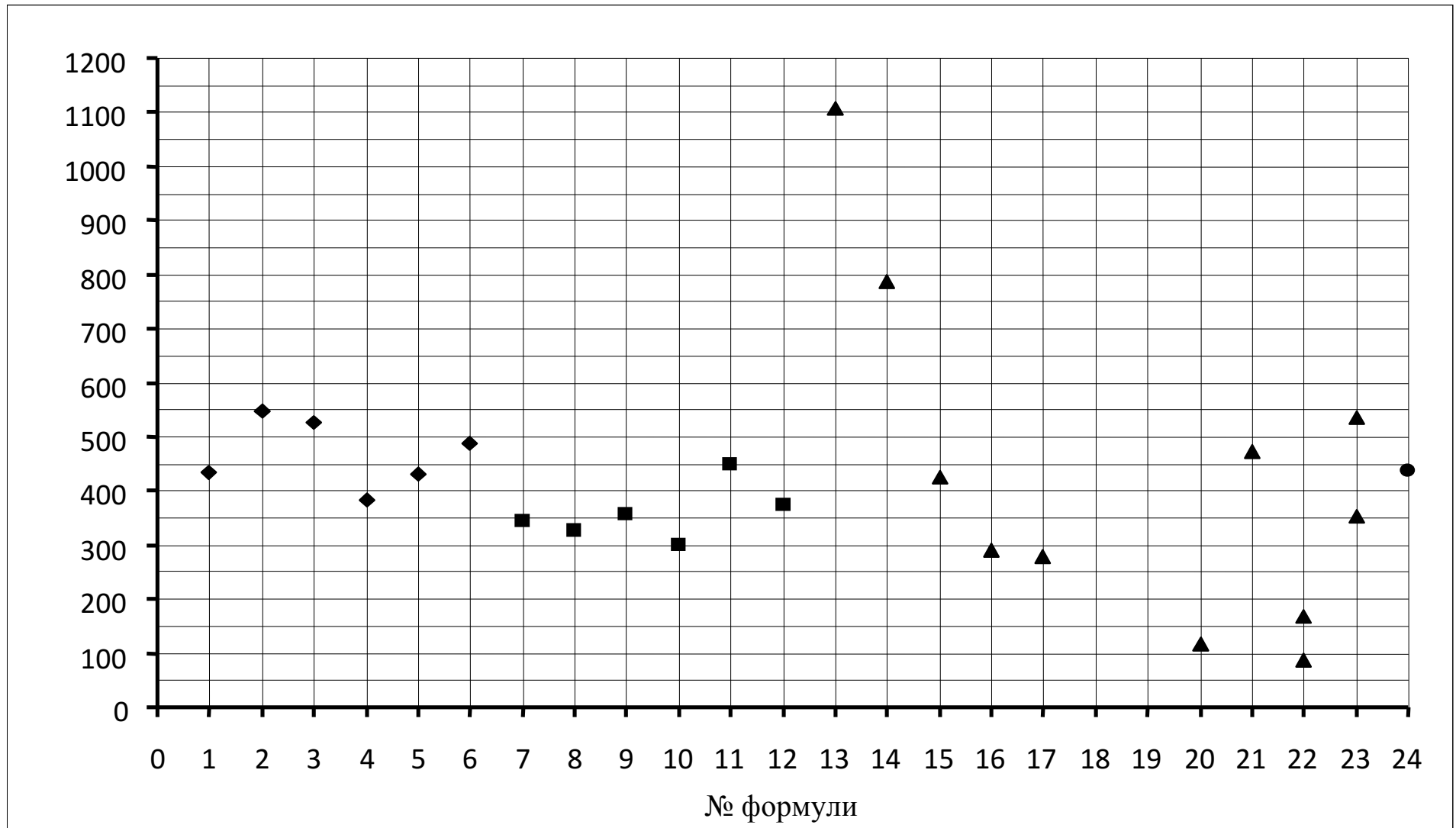
| 1              | 2   | 3   | 4  | 5      |
|----------------|---|---|--|--------|
| Рундквист      | $Q = 28,5 \cdot \sqrt{D \cdot d_n \cdot d \cdot H}$ , л/хв  | D, $d_n$ і d в см;<br>H в кгс/см <sup>2</sup> ;                         | $Q = 28,5 \cdot \sqrt{50 \cdot 15,6 \cdot 17 \cdot 2}$   | 278,47 |
| Херкенкофф     | $Q = \frac{d^2}{D^2 - d^2} \cdot \sqrt{2 \cdot g \cdot H}$<br>$S = \frac{\pi}{4} \cdot D^2$   | —   | Немає інформації   | —      |
| Фуїтомо и Моро | $Q = k_F \cdot D \cdot \frac{d_n}{D} \cdot \frac{d_0}{D} \left(\operatorname{ctg} \frac{\alpha}{2}\right)^{0,5} \sqrt{H}$                                   | —   | Немає інформації   | —      |
| Фуїтомо        | $Q = k_F \cdot d_n^{0,95} \cdot d^{0,85} \cdot D^{0,2} \cdot \left(\operatorname{tg} \frac{\alpha}{2}\right)^{-0,45} \cdot \sqrt{H}$<br>л/хв<br>$k_F = 1,8$ | Перетворена формула;<br>D, $d_n$ і d в см;<br>H в кгс/см <sup>2</sup> ; | $Q = 1,8 \cdot 15,6^{0,95} \cdot 17^{0,85} \cdot 50^{0,2} \cdot \left(\operatorname{tg} \frac{20}{2}\right)^{-0,45} \cdot \sqrt{2}$<br>$k_F = 1,8$ | 115,67 |

Продовження таблиці 2.1

| 1           | 2   | 3  | 4  | 5     |
|-------------|---|--|--|-------|
| Баттагліа   | $Q = k \cdot \frac{d_n \cdot d}{\sqrt{\frac{d_n}{d} + 1 + \frac{d}{d_n}}} \cdot \sqrt{\frac{H}{\rho_n}}, \text{ л/хв}$ $k = 20,8 + \frac{1,189 \cdot D - 4,75}{0,073 \cdot D - 0,311 + \operatorname{tg} \frac{\alpha}{2}}$ | <p>Q в л/хв;<br/> <math>d_n</math> і d в см;<br/> H в кгс/см<sup>2</sup><br/> <math>\rho_n</math> в г/м<sup>3</sup>;</p> | $Q = 36,44 \cdot \frac{15,6 \cdot 17}{\sqrt{\frac{15,6}{17} + 1 + \frac{17}{15,6}}} \cdot \sqrt{\frac{2}{1}}$ $k = 20,8 + \frac{1,189 \cdot 50 - 4,75}{0,073 \cdot 50 - 0,311 + \operatorname{tg} \frac{20}{2}} = 36,44$ | 472,8 |
| Бернарський | $Q = k_{B1} \cdot d_n \cdot d \cdot \sqrt{\Delta P} \cdot \frac{l^{0,23}}{D^{0,4}}, \text{ м}^3/\text{ГОД}$ $k_{B1} = 1,5 - 1,8$ $l = \frac{P}{2} \cdot \operatorname{tg} \frac{\alpha}{2}$                                 | <p><math>d_n</math> і d, l, D, в см;<br/> P в кгс/см<sup>2</sup></p>   | $Q = 1,7 \cdot 15,6 \cdot 17 \cdot \sqrt{2} \cdot \frac{0,158^{0,23}}{50^{0,4}}$ $k_{B1} = 1,5 - 1,8$ $l = \frac{2}{2} \cdot \operatorname{tg} \frac{20}{2} = 0,158$   | 87,22 |
| Бернарський | $Q = 22 \cdot d_n \cdot d \cdot \sqrt{P} \cdot \left(\operatorname{tg} \frac{\alpha}{2}\right)^{0,23} \cdot D^{-0,17},$ <p style="text-align: center;">л/хв</p>   | Перетворена формула;   | $Q = 22 \cdot 15,6 \cdot 17 \cdot \sqrt{2} \cdot \left(\operatorname{tg} \frac{20}{2}\right)^{0,23} \cdot 50^{-0,17}$  | 166,6 |

Продовження таблиці 2.1

| 1                    | 2  | 3   | 4  | 5     |
|----------------------|--|---|--|-------|
| Поваров,<br>Шербаков | $Q = 5 \cdot k_D \cdot k_\alpha \cdot d_n \cdot d \cdot \sqrt{g \cdot H}, \text{ л/хв}$ $k_D = \frac{0,08 \cdot D + 2}{0,1 \cdot D - 1}$ $k_\alpha = 0,79 + \frac{0,044}{0,0379 + \operatorname{tg} \frac{\alpha}{2}}$ | $d_n$ і $d$ в см;<br>$H$ в кгс/см <sup>2</sup> ;<br>$\alpha$ в градусах;<br>$g=9,81$ м/с <sup>2</sup> ; | $Q = 5 \cdot 1,5 \cdot 1,014 \cdot 15,6 \cdot 17 \cdot \sqrt{9,81 \cdot 2}$ $k_D = \frac{0,08 \cdot 50 + 2}{0,1 \cdot 50 - 1} = 1,5$ $k_\alpha = 0,79 + \frac{0,044}{0,0379 + \operatorname{tg} \frac{20}{2}} = 1,014$ | 536   |
| Поваров,<br>Шербаков | $Q = 15,5 \cdot k_D \cdot k_\alpha \cdot d_n \cdot d \cdot \sqrt{P}, \text{ л/хв}$ $k_D = 0,8 + \frac{1,2}{1 + 0,1 \cdot D}$ $k_\alpha = 0,79 + \frac{0,044}{0,0379 + \operatorname{tg} \frac{\alpha}{2}}$             | Перетворена<br>формула;   | $Q = 15,5 \cdot 1 \cdot 1,014 \cdot 15,6 \cdot 17 \cdot \sqrt{2}$ $k_D = 0,8 + \frac{1,2}{1 + 0,1 \cdot 50} = 1$ $k_\alpha = 0,79 + \frac{0,044}{0,0379 + \operatorname{tg} \frac{20}{2}} = 1,014$                     | 353,7 |



◆ - 1 група; ■ - 2 група; ▲ - 3 група; ● - за формулою (24).

Рисунок 2.1 - Розрахункова продуктивність гідроциклону за формулами різних авторів

## 2.2 Розробка методу математичного моделювання опору гідроциклона

Незважаючи на те, що гідроциклони застосовуються вже кілька десятків років, все ж вони ще не повністю досліджені. Причиною цього є складність явищ, що протікають в гідроциклоні. Зважаючи на недостатність наявних теоретичних досліджень роботи циклонів, підбір їх поки проводиться на підставі досвідчених даних. Наприклад, для ряду циклонів наводяться відносні розміри їх елементів, або значення їх коефіцієнтів опору. Такий метод придатний для розрахунку подібних циклонів і не дозволяє розрахувати циклони, конструкція яких відрізняється від наведених. Тому метою даної роботи було визначення аналітичної залежності, що зв'язує опір гідроциклона з його геометричними і режимними параметрами.

Опір в гідроциклонах визначимо його коефіцієнтом опору, який по зливній лінії визначається різницею повного тиску між входом в циклон і статичним на виході зі зливної насадки за наступною залежністю

$$\xi_{\text{вх}} = \frac{2\Delta P}{\rho_0 W_0^2},$$

де  $\Delta P$  - різниця між повним тиском на вході в гідроциклон і статичним на виході зі зливної насадки, Па;

$W_0^2$  - швидкість на вході в гідроциклон, м/с;

$\rho_0$  - щільність суспензії, кг/м<sup>3</sup>.

На відміну від газових циклонів [33] в гідроциклонах, частина рідини (суспензії), у вигляді збагаченої пульпи безперервно зливається через шламову насадку, а інша частина, як освітлена вода, через зливну насадку залишає циклон.

Тому гідроциклон будемо розглядати як гідравлічний опір, що має дві гідравлічні лінії: злив і пісок. У зв'язку з цим кожна лінія має гідравлічний опір, який визначається власним коефіцієнтом опору:

- по лінії зливу

$$\zeta_{\text{вх1}} = \frac{\Delta P_{0\ 1}}{\frac{\rho_0 W_{01}^2}{2}};$$

- по лінії пісків

$$\zeta_{\text{вх2}} = \frac{\Delta P_{0\ 2}}{\frac{\rho_0 W_{02}^2}{2}},$$

де  $\Delta P_{01} = P_0 - P_1$  - різниця між повним тиском на вході в циклон і статичним у зливній трубі, Па;

$\Delta P_{02} = P_0 - P_2$  - різниця між повним тиском на вході в циклон і статичним в піскової насадки, Па;

$\rho_0$  - щільність суспензії, кг/м<sup>3</sup>;

$W_{01}^2$  - швидкість суспензії зливної насадки, віднесеної до входу в циклон, м/с;

$W_{02}^2$  - швидкість пульпи піскової насадки, віднесеної до входу в циклон, м/с;

- сумарна площа входу суспензії через вхідну насадку, м<sup>2</sup>.

Відповідно продуктивності складуть:

- по лінії зливу

$$m_{01} = \rho_0 \Sigma f W_{01};$$

- по лінії пісків

$$m_{02} = \rho_0 \Sigma f W_{02}.$$

Продуктивність циклону в цілому визначиться сумою продуктивностей, тобто

$$m_0 = m_{0\ 1} + m_{0\ 2} = Q_0 = Q_{01} + Q_{02} = \Sigma f W_0.$$



Звідки, швидкість на вході в циклон, що відповідає загальній продуктивності циклону, визначиться

$$W_0 = W_{01} + W_{02} = \sqrt{\frac{2\Delta P_{01}}{\xi_{\text{BX1}}\rho_0}} + \sqrt{\frac{2\Delta P_{02}}{\xi_{\text{BX2}}\rho_0}} = \sqrt{\frac{2\Delta P_{01}}{\rho_0}} \left( \sqrt{\frac{1}{\xi_{\text{BX1}}}} + \sqrt{\frac{1}{\xi_{\text{BX2}}} \frac{\Delta P_{02}}{\Delta P_{01}}} \right).$$

Визначивши  $\Delta P_{01}$  і  $\Delta P_{02}$ , розділивши одне на інше, отримаємо залежність, що визначає зв'язок між продуктивністю зливу і піску (розвантажувальне відношення) в наступному вигляді

$$\frac{\Delta P_{02}}{\Delta P_{01}} = \left( \frac{Q_{02}}{Q_{01}} \right)^2 \cdot \frac{\xi_{\text{BX2}}}{\xi_{\text{BX1}}}.$$

Обробка результатів випробування модельного циклону показала, що співвідношення  $\frac{\Delta P_{02}}{\Delta P_{01}} = 1$ , звідки  $\Delta P_{02} = \Delta P_{01} = \Delta P$  і відповідно до цього отримаємо залежність, що визначає опір гідроциклону в наступному вигляді

$$\Delta P = \left( \frac{1}{\frac{1}{\sqrt{\xi_{\text{BX1}}}} + \frac{1}{\sqrt{\xi_{\text{BX2}}}}} \right)^2 \frac{\rho_0 W_0^2}{2} = \xi_{\text{BX0}} \frac{\rho_0 W_0^2}{2},$$

звідки коефіцієнт опору гідроциклону віднесений до входу в гідроциклон визначиться наступною залежністю

$$\xi_{\text{BX0}} = \left( \frac{1}{\sqrt{\frac{1}{\xi_{\text{BX1}}}} + \sqrt{\frac{1}{\xi_{\text{BX2}}}}} \right)^2.$$

Таким чином, завдання зводиться до визначення коефіцієнтів опору гідроциклону по лінії зливу і лінії пісків.

В аналітичному плані завдання вирішується із застосуванням рівнянь нерозривності, моменту кількості руху, енергії і принципу мінімуму коефіцієнта опору, написаних для перетинів на вході в циклон камеру 0-0, на виході зі зливної труби I-I і на виході зі шламової насадки II-II. Рівняння нерозривності

$$m_0 = m_1 + m_2,$$

де  $m_0$  - масова витрата суспензії через вхідну насадку циклону, кг/с;

$m_1$  - масова витрата освітленої води через зливну насадку, кг/с;

$m_2$  - масова витрата пульпи через шламову насадку, кг/с.

Масова витрата суспензії через вхідну насадку циклону

$$m_0 = \rho_0 W_0 \Sigma f_0,$$

де  $\rho_0$  - щільність суспензії на вході в гідроциклон, кг/м<sup>3</sup>;

$W_0$  - швидкість суспензії на вході в гідроциклон, м/с;

$\Sigma f_0$  - сумарна площа входу суспензії через вхідну насадку гідроциклону, м<sup>2</sup>.

Масова витрата освітленої води через зливну насадку

$$m_1 = \pi \rho_1 W_1 \sin \alpha_1 (R_{TR}^2 - R_B^2),$$

де  $\rho_1$  - щільність суспензії на виході зі зливної насадки, кг/м<sup>3</sup>;

$W_1$  - швидкість суспензії на виході з зливний насадки, м/с;

$\alpha_1$  - кут крутки на виході зі зливної насадки гідроциклону (кут між вектором абсолютної швидкості  $\omega_1$  і його окружним напрямком  $\omega_{1u}$ ), град;

- внутрішній радіус труби зливної насадки, м;

$R_B$  - радіус повітряного вихору в зливній насадці, м.

Масова витрата пульпи через шламову насадку

$$m_2 = \pi \rho_2 W_2 \sin \alpha_2 (R_K - R_{BK}),$$

де  $\rho_2$  - щільність пульпи на виході зі шламової насадки, кг/м<sup>3</sup>;

$W_2$  - швидкість пульпи на виході зі шламової насадки, м/с;

$\alpha_2$  - кут крутки на виході зі шламової насадки гідроциклону (кут між вектором абсолютної швидкості  $\omega_2$  і його окружним напрямком  $\omega_{2u}$ ), град;

$R_K$  - внутрішній радіус конуса шламової насадки, м;

$R_{BK}$  - радіус повітряного вихору у шламовій насадці, м.

Рішення щодо  $m_1$  призводить до наступного результату

$$m_0 \left( 1 - \frac{m_2}{m_0} \right) = \pi \rho_1 W_1 \sin \alpha_1 (R_{TR}^2 - R_B^2),$$

звідки

$$\sin \alpha_1 = \frac{m_0 \left( 1 - \frac{m_2}{m_0} \right)}{\pi \rho_1 W_1 (R_{TR}^2 - R_B^2)}.$$

Рівняння моменту кількості руху

$$\varepsilon M_0 = M_1 + M_2,$$

де  $M_0 = m_0 W_0 R_0$  - момент кількості руху суспензії на вході в циклон;

$M_1 = m_1 W_1 \cos \alpha_1 \frac{R_{TR} + R_B}{2}$  - момент кількості руху освітленої води на виході

зі зливної насадки;

$M_2 = m_2 W_2 \cos \alpha_2 \frac{R_K + R_{BK}}{2}$  - момент кількості руху пульпи на виході зі

шламової насадки;

$\varepsilon = \frac{M_1}{M_0 \left( 1 - \frac{M_2}{\varepsilon M_0} \right)}$  - коефіцієнт зменшення початкового моменту кількості

руху освітленої води.

Рішення щодо  $M_1$  рівняння моменту кількості руху перетвориться до виду

$$\varepsilon M_0 \left( 1 - \frac{M_2}{\varepsilon M_0} \right) = m_1 W_1 \cos \alpha_1 \frac{R_{TP} + R_B}{2}.$$

Звідки

$$\cos \alpha_1 = \frac{\varepsilon M_0 \left( 1 - \frac{M_2}{\varepsilon M_0} \right)}{m_1 W_1 \frac{R_{TP} + R_B}{2}}.$$

Отримаємо вираз, що визначає середньорасходний кут крутки на виході зі зливної насадки (труби)

$$\operatorname{tg} \alpha_1 = \frac{\rho_0}{\rho_1} \frac{\Sigma f_0}{2\pi R_0 (R_{TP} - R_B)} \frac{\left( 1 - \frac{m_2}{m_0} \right)^2}{\varepsilon \left( 1 - \frac{M_2}{\varepsilon M_0} \right)},$$

звідки радіус внутрішнього вихору в зливній трубі визначиться за такою залежністю

$$R_B = R_{TP} - \frac{\Sigma f_0}{2\pi R_0 \operatorname{tg} \alpha_1} \cdot \frac{\rho_0}{\rho_1} \cdot \frac{\left(1 - \frac{m_2}{m_0}\right)^2}{\varepsilon \left(1 - \frac{M_2}{\varepsilon M_0}\right)}.$$

Вектор абсолютної швидкості освітленої води в перерізі на виході зі зливної насадки циклону визначимо виходячи з рівняння витрати освітленої води через зливну насадку в наступному вигляді

$$W_1 = \frac{m_0 \left(1 - \frac{m_2}{m_0}\right)}{\pi \rho_1 \sin \alpha_1 (R_{TP}^2 - R_B^2)}.$$

Отримаємо вираз, що визначає опір циклону по лінії зливу

$$\Delta P = \frac{\rho_1}{2^2} \left[ \frac{m_0 \left(1 - \frac{m_2}{m_0}\right)}{\pi \rho_1 \sin \alpha_1 (R_{TP}^2 - R_B^2)} \right]^2.$$

Виконавши рішення, отримаємо залежність, що визначає коефіцієнт опору гідроциклону по лінії зливу, що працює при зливі пульпи зі шламової насадки в наступному вигляді

$$\xi_{\text{вх}_1} = \frac{\rho_1}{\rho_0} \left[ \frac{\frac{R_0}{R_y} \varepsilon \left(1 - \frac{M_2}{\varepsilon M_0}\right)}{\frac{R_{TP}}{R_y} \left(1 - \frac{m_2}{m_0}\right) \left[ 1 - \frac{\Sigma f_0}{\pi R_0 R_{TP}} \frac{\left(1 - \frac{m_2}{m_0}\right)^2}{\varepsilon \left(1 - \frac{M_2}{\varepsilon M_0}\right)} \frac{1}{4 \operatorname{tg} \alpha_1} \right] \cos \alpha_1} \right]^2.$$

Рішення рівняння приводить до наступного результату

$$\frac{4\varepsilon \sin^3 \alpha_1}{(1 + \sin^2 \alpha_1) \cos \alpha_1} = \frac{\Sigma f_0}{\pi R_0 R_{\text{ТР}}} \cdot \frac{\left(1 - \frac{m_2}{m_0}\right)^2}{\left(1 - \frac{M_2}{\varepsilon M_0}\right)}.$$

З залежностей випливає, що опір гідроциклону, що працює при зливі пульпи зі шламової насадки, визначається його геометричним параметром крутки  $\frac{\Sigma f}{\pi R_0 R_{\text{ТР}}}$ , відносною величиною маси, що пройшла через шламову насадку, їх моментами кількості руху, реальністю процесу, що визначається коефіцієнтами  $\phi_0$  і  $\varepsilon$ .

Виробляючи аналогічні рішення для лінії пісків отримали коефіцієнт опору для конічної частини гідроциклону

$$\xi_{\text{вих}_1}^z = \frac{\frac{R_0}{R_y} \cdot \varepsilon \cdot \left(1 - \frac{M_1}{\varepsilon M_0}\right)}{\frac{R_\kappa}{R_y} \left(1 - \frac{m_1}{m_0}\right) \left[ 1 - \frac{\Sigma f_0}{\pi R_0 R_\kappa} - \frac{\left(1 - \frac{m_1}{m_0}\right)^2}{\varepsilon \left(1 - \frac{M_1}{\varepsilon M_0}\right)} - \frac{1}{4 \text{tg} \alpha_2} \right] \cos \alpha_2}.$$

Кут скручування на виході з піскової насадки  $\alpha_2$

$$\frac{4\varepsilon \sin^3 \alpha_2}{(1 + \sin^2 \alpha_2) \cos \alpha_2} = \frac{\Sigma f_0}{\pi R_0 R_\kappa} \cdot \frac{\left(1 - \frac{m_1}{m_0}\right)^2}{\left(1 - \frac{M_1}{\varepsilon M_0}\right)},$$

при  $m_2 = 0$ , тобто немає зливу через піскову насадку, і вся пульпа виходить через зливну трубу, отримаємо коефіцієнт опору по лінії зливу в наступному вигляді

$$\zeta_{\text{вх}1} = \frac{\rho_1}{\rho_0} \left[ \frac{\frac{R_0}{R_y} \cdot \varepsilon}{\frac{R_{\text{ТР}}}{R_y} \cdot \left[ 1 - \frac{\sum f_0}{\pi R_0 R_{\text{ТР}}} \cdot \frac{1}{4 \text{tg} \alpha_1} \right] \cos \alpha_1} \right]^2.$$

Для спрощення розрахунків, коефіцієнт опору по лінії зливу трансформується до виду

$$\zeta_{\text{вх}1} = \frac{\rho_1}{\rho_0} \left[ \frac{\frac{R_0}{R_y} \cdot \varepsilon}{\frac{R_{\text{ТР}}}{R_y} \cdot \left( \frac{\cos \alpha_1}{1 + \sin^2 \alpha_1} \right)} \right]^2,$$

а кут крутки на виході зі зливної насадки  $\alpha_1$  для  $\alpha_1 \leq 50^\circ$  з достатньою точністю визначається за спрощеною залежністю отриманою відповідно до [34]

$$\alpha_1 = \arcsin 3 \sqrt{\frac{\sum f_0}{\pi R_0 R_{\text{ТР}}} \cdot \frac{1}{4 \varepsilon}},$$

при  $m_1 = 0$ , тобто немає зливу через зливну трубу і вся пульпа виходить через піскову насадку, отримаємо коефіцієнт опору по лінії пісків в наступному вигляді:

$$\zeta_{\text{вх}_2}^{\zeta} = \frac{\rho_2}{\rho_0} \cdot \left[ \frac{\frac{R_0}{R_y} \cdot \varepsilon}{\frac{R_k}{R_y} \cdot \left[ 1 - \frac{\sum f_0}{\pi R_0 R_k} \cdot \frac{1}{4 \operatorname{tg} \alpha_2} \right] \cdot \cos \alpha_2} \right]^2.$$

Для спрощення розрахунків, коефіцієнт опору по лінії пісків трансформується до виду

$$\zeta_{\text{вх}_2}^{\zeta} = \frac{\rho_2}{\rho_0} \left[ \frac{\frac{R_0}{R_y} \cdot \varepsilon}{\frac{R_k}{R_y} \cdot \left( \frac{\cos \alpha_2}{1 + \sin^2 \alpha_2} \right)} \right]^2.$$

Кут скручування на виході з піскової насадки  $\alpha_2$  визначається за спрощеною залежністю отриманою відповідно до [34]

$$\alpha_2 = \arcsin 3 \sqrt{\frac{\sum f_0}{\pi R_0 R_k} \cdot \frac{1}{4 \varepsilon}}.$$

З розрахованих залежностей випливає, що коефіцієнт опору гідроциклону визначається його геометричним комплексом. Таким чином, це дозволить визначити опір знову проєктованих гідроциклонів різних конструктивних форм.

Для розрахунку коефіцієнта опору необхідно задатися деякими величинами моментів руху рідини і витратами. Ці розрахунки наведені в наступному пункті.



### 2.3 Аналіз впливу конструктивних і режимних параметрів на коефіцієнт опору гідроциклону

Для аналізу впливу конструктивних і режимних параметрів на коефіцієнт опору гідроциклону необхідно розглянути гідроциклон з певними заданими параметрами і провести розрахунок з урахуванням прийнятих значень.

Для циліндричної частини гідроциклону приймаємо:

Геометричний комплекс

$$\frac{\sum f}{\pi \cdot R_0 \cdot R_{mp}} = 0,3,$$

де  $\sum f$  - сумарна площа входу суспензії через вхідну насадку гідроциклону, м<sup>2</sup>;

$R_0$  - радіус підведення суспензії через вхідну насадку гідроциклону, м;

$R_{mp}$  - радіус труби зливної насадки гідроциклону, м.

Ступінь радіальності завихрювача

$$\frac{R_0}{R_{\psi}} = 0,83;$$

$$\frac{R_{mp}}{R_{\psi}} = 0,5,$$

де  $R_{\psi}$  - радіус циліндричної частини гідроциклону, м.

Коефіцієнт зменшення початкового моменту кількості руху

$$\varepsilon = 1.$$

Коефіцієнт втрати швидкості

$$\varphi = 0,9.$$

Для конічної частини гідроциклону приймаємо геометричний комплекс

$$\frac{\sum f}{\pi \cdot R_0 \cdot R_k} = 0,6.$$

Ступінь радіальності завихрювача

$$\frac{R_0}{R_u} = 0,83;$$

$$\frac{R_k}{R_u} = 0,3.$$

Коефіцієнт зменшення початкового моменту кількості руху

$$\varepsilon = 1.$$

Коефіцієнт втрати швидкості

$$\varphi = 0,9.$$

Средньовитратний кут скручування в перерізі на виході з шламової насадки гідроциклону

$$\alpha_2 = \arcsin \sqrt[3]{\frac{\sum f}{\pi \cdot R_0 \cdot R_k} \cdot \frac{1}{4 \cdot \varepsilon} \cdot \frac{(1 - m_1 / m_0)^2}{(1 - M_1 / M_0)'}}$$

$m_1$  - масова витрата освітленої води через зливну насадку, кг/с;

$m_0$  - масова витрата суспензії через вхідну насадку гідроциклону, кг/с.

З урахуванням рівняння нерозривності можна зробити такі перетворення

$$1 - \frac{m_1}{m_0} = 1 - \frac{m_0 - m_2}{m_0} = \frac{m_0 - m_0 + m_2}{m_0} = \frac{m_2}{m_0};$$

$$1 - \frac{M_1}{M_0} = 1 - \frac{M_0 - M_2}{M_0} = \frac{M_0 - M_0 + M_2}{M_0} = \frac{M_2}{M_0},$$

де  $m_2$  - масова витрата пульпи через шламову насадку, кг/с.

Таким чином, середньовитратний кут скручування в перерізі на виході з шламової насадки гідроциклону визначиться за такою формулою

$$\alpha_2 = \arcsin \sqrt[3]{\frac{\sum f}{\pi \cdot R_0 \cdot R_k} \cdot \frac{1}{4 \cdot \varepsilon} \cdot \frac{(m_2 / m_0)^2}{M_2 / M_0}}.$$

Коефіцієнт опору по гідроциклону з урахуванням моментів кількості руху і масових витрат перетворимо до наступного вигляду

$$\xi_{ex1} = \frac{\rho_1}{\rho_0} \left[ \frac{\frac{R_0}{R_y} \cdot \varepsilon \cdot \left(1 - \frac{M_2}{\varepsilon M_0}\right)}{\varphi \cdot \frac{R_{mp}}{R_y} \cdot \left(1 - \frac{m_2}{m_0}\right) \cdot \left(1 - \frac{1}{4 \operatorname{tg} \alpha_1 \cdot \varepsilon} \cdot \frac{\sin^3 \alpha_1 \cdot 4 \varepsilon}{(1 + \sin^2 \alpha_1) \cdot \cos \alpha_1}\right) \cdot \cos \alpha_1} \right]^2.$$

Комплекс кута скручування суспензії в гідроциклоні

$$\left(1 - \frac{1}{4 \cdot \operatorname{tg} \alpha_1 \cdot \varepsilon} \cdot \frac{\sin^3 \alpha_1 \cdot 4 \cdot \varepsilon}{(1 + \sin^2 \alpha_1) \cdot \cos \alpha_1}\right) \cdot \cos \alpha_1 = \cos \alpha_1 - \frac{\sin^3 \alpha_1}{\operatorname{tg} \alpha_1 \cdot (1 + \sin^2 \alpha_1)} =$$

$$= \cos \alpha_1 - \frac{\sin^3 \alpha_1 \cdot \cos \alpha_1}{\sin \alpha_1 \cdot (1 + \sin^2 \alpha_1)} = \cos \alpha_1 \cdot \left(1 - \frac{\sin^2 \alpha_1}{1 + \sin^2 \alpha_1}\right)$$

Коефіцієнт опору по циклону

$$\xi_{\text{exl}} = \frac{\rho_1}{\rho_0} \left[ \frac{\frac{R_0}{R_y} \cdot \varepsilon \cdot \left(1 - \frac{M_2}{\varepsilon M_0}\right)}{\varphi \cdot \frac{R_{mp}}{R_y} \cdot \left(1 - \frac{m_2}{m_0}\right) \cdot \left(1 - \frac{\sin^2 \alpha_1}{(1 + \sin^2 \alpha_1)}\right) \cdot \cos \alpha_1} \right]^2$$

Коефіцієнт перетворення комплексу

$$\left(1 - \frac{\sin^2 \alpha_1}{1 + \sin^2 \alpha_1}\right) \cdot \cos \alpha_1 = \left(\frac{1 + \sin^2 \alpha_1 - \sin^2 \alpha_1}{1 + \sin^2 \alpha_1}\right) \cos \alpha_1 =$$

$$= \frac{1}{1 + \sin^2 \alpha_1} \cdot \cos \alpha_1 = \frac{\cos \alpha_1}{1 + \sin^2 \alpha_1}$$

Отримаємо вираз, що визначає коефіцієнт опору в зливній трубі

$$\xi_{\text{exl}} = \frac{\rho_1}{\rho_0} \left[ \frac{\frac{R_0}{R_y} \cdot \varepsilon \cdot \left(1 - \frac{M_2}{\varepsilon M_0}\right)}{\varphi \cdot \frac{R_{mp}}{R_y} \cdot \left(1 - \frac{m_2}{m_0}\right) \cdot \left(\frac{\cos \alpha_1}{(1 + \sin^2 \alpha_1)}\right)} \right]^2$$

Кут скручування в зливній трубі

$$\alpha_1 = \operatorname{ark} \sin \sqrt[3]{\frac{\sum f}{\pi \cdot R_0 \cdot R_{mp}} \cdot \frac{1}{4 \cdot \varepsilon} \cdot \frac{(1 - m_2 / m_0)^2}{(1 - M_2 / M_0)}}$$

Виробляючи аналогічні рішення для лінії пісків, отримаємо коефіцієнт опору для конічної частини гідроциклону

$$\xi_{\text{ex2}} = \frac{\rho_2}{\rho_0} \left[ \frac{\frac{R_0}{R_y} \cdot \varepsilon \cdot \left( \frac{M_2}{\varepsilon M_0} \right)}{\varphi \cdot \frac{R_k}{R_y} \cdot \left( \frac{m_2}{m_0} \right) \cdot \left( \frac{\cos \alpha_2}{(1 + \sin^2 \alpha_2)} \right)} \right]^2,$$

або

$$\xi_{\text{ex2}} = \frac{\rho_2}{\rho_0} \left[ \frac{\frac{R_0}{R_y} \cdot \varepsilon \cdot \left( 1 - \frac{M_1}{\varepsilon M_0} \right)}{\varphi \cdot \frac{R_k}{R_y} \cdot \left( 1 - \frac{m_1}{m_0} \right) \cdot \left( \frac{\cos \alpha_2}{(1 + \sin^2 \alpha_2)} \right)} \right]^2.$$

Зробимо розрахунок коефіцієнту опору, кута скручування і розміру повітряного вихору в циліндричній і конічній частинах при зміні моменту скручування води в пісок при різних витратах води в пісок.

Якщо витрата води в пісок прийняти постійним, задамося  $m_2/m_0=0,2$ , а момент скручування води в пісок змінювати, задамося  $M_2/M_0=0,8$ , здійснивши рішення за умови  $\rho_0 = \rho_1$ , то отримаємо:

- Кут скручування в зливній трубі, циліндрична частина

$$\begin{aligned} \alpha_1 &= \text{ark sin}^3 \sqrt{\frac{\sum f}{\pi \cdot R_0 \cdot R_{mp}} \cdot \frac{1}{4 \cdot \varepsilon} \cdot \frac{(1 - m_2 / m_0)^2}{(1 - M_2 / M_0)}} = \\ &= \text{ark sin}^3 \sqrt{0,3 \cdot \frac{1}{4 \cdot 1} \cdot \frac{(1 - 0,2)^2}{(1 - 0,8)}} = 38,638^\circ; \end{aligned}$$

- Коефіцієнт опору для циліндричної частини гідроциклону

$$\xi_{ex1} = \left[ \frac{\frac{R_0}{R_u} \cdot \varepsilon \cdot \left(1 - \frac{M_2}{\varepsilon M_0}\right)}{\varphi \cdot \frac{R_{mp}}{R_u} \cdot \left(1 - \frac{m_2}{m_0}\right) \cdot \left(\frac{\cos \alpha_1}{(1 + \sin^2 \alpha_1)}\right)} \right]^2 =$$

$$= \left[ \frac{0,83 \cdot 1 \cdot (1 - 0,8)}{0,9 \cdot 0,5 \cdot (1 - 0,2) \cdot \left(\frac{\cos 38,638}{(1 + \sin^2 38,638)}\right)} \right]^2 = 0,669.$$

Розмір повітряного вихору, в зливі гідроциклону

$$\frac{R_\varepsilon}{R_{mp}} = 1 - \frac{\sum f}{\pi \cdot R_0 \cdot R_k} \cdot \frac{1}{2 \operatorname{tg} \alpha_1} \cdot \frac{1}{\varepsilon} \cdot \frac{\left(1 - \frac{m_2}{m_0}\right)^2}{\left(1 - \frac{M_2}{M_0}\right)} =$$

$$= 1 - 0,3 \cdot \frac{1}{2 \operatorname{tg} 38,638} \cdot \frac{1}{1} \cdot \frac{(1 - 0,2)^2}{(1 - 0,8)} = 0,399.$$

Кут скручування в перерізі на виході з шламової насадки гідроциклону

$$\alpha_2 = \operatorname{ark} \sin^3 \sqrt{\frac{\sum f}{\pi \cdot R_0 \cdot R_k} \cdot \frac{1}{4 \cdot \varepsilon} \cdot \frac{(m_2 / m_0)^2}{M_2 / M_0}} =$$

$$= \operatorname{ark} \sin^3 \sqrt{0,6 \cdot \frac{1}{4 \cdot 1} \cdot \frac{0,2^2}{0,8}} = 11,47.$$

Коефіцієнт опору для конічної частини гідроциклону

$$\xi_{ex2} = \left[ \frac{\frac{R_0}{R_u} \cdot \varepsilon \cdot \left( \frac{M_2}{\varepsilon M_0} \right)}{\varphi \cdot \frac{R_k}{R_u} \cdot \left( \frac{m_2}{m_0} \right) \cdot \left( \frac{\cos \alpha_2}{(1 + \sin^2 \alpha_2)} \right)} \right]^2 =$$

$$= \left[ \frac{0,83 \cdot 1 \cdot 0,8}{0,9 \cdot 0,83 \cdot 0,2 \cdot \left( \frac{\cos 11,47}{(1 + \sin^2 11,47)} \right)} \right]^2 = 169,67.$$

Розмір повітряного вихору в пісковій насадці гідроциклону

$$\frac{R_g}{R_k} = 1 - \frac{\sum f}{\pi \cdot R_0 \cdot R_k} \cdot \frac{1}{2 \operatorname{tg} \alpha_1} \cdot \frac{1}{\varepsilon} \cdot \frac{\left( 1 - \frac{m_2}{m_0} \right)^2}{\left( 1 - \frac{M_2}{M_0} \right)} =$$

$$= 1 - 0,6 \cdot \frac{1}{2 \cdot \operatorname{tg} 11,47} \cdot \frac{1}{1} \cdot \frac{(1 - 0,2)^2}{(1 - 0,8)} = 0,926.$$

Аналогічно проводиться розрахунок коефіцієнта опору, кута скручування і розміру повітряного вихору в циліндричній і конічній частинах при зміні витрати води в пісок при постійному моменті скручування води в піску.

Всі результати розрахунку зводяться в таблиці 2.2 - 2.9.

За результатами розрахунків (таблиці 2.2-2.9) будуюмо графіки процесів протікаючих в гідроциклоні при різних режимах роботи і різних розвантажувальних відношеннях.

Таблиця 2.2 - Розрахунок зміни коефіцієнта опору в циліндричній частині гідроциклона при зміні витрати води в пісок при різних моментах крутки води в піску

| $M_2/M_0=0,8$                     |        |        |        |        |        |          |
|-----------------------------------|--------|--------|--------|--------|--------|----------|
| $m_2/m_0$                         | 0      | 0,2    | 0,4    | 0,6    | 0,8    | 1        |
| $\alpha_1$                        | 46,343 | 38,638 | 31,092 | 23,276 | 14,483 | 0        |
| $\cos\alpha_1/(1+\sin^2\alpha_1)$ | 0,453  | 0,562  | 0,676  | 0,794  | 0,911  | 1        |
| $\zeta_{\text{Bx1}}$              | 0,658  | 0,669  | 0,822  | 1,3401 | 4,076  | $\infty$ |
| $M_2/M_0=0,6$                     |        |        |        |        |        |          |
| $m_2/m_0$                         | 0      | 0,2    | 0,4    | 0,6    | 0,8    | 1        |
| $\alpha_1$                        | 35,138 | 29,784 | 24,257 | 18,323 | 11,476 | 0        |
| $\cos\alpha_1/(1+\sin^2\alpha_1)$ | 0,614  | 0,696  | 0,7802 | 0,864  | 0,942  | 1        |
| $\zeta_{\text{Bx1}}$              | 1,434  | 1,745  | 2,471  | 4,534  | 15,237 | $\infty$ |
| $M_2/M_0=0,4$                     |        |        |        |        |        |          |
| $m_2/m_0$                         | 0      | 0,2    | 0,4    | 0,6    | 0,8    | 1        |
| $\alpha_1$                        | 30,23  | 25,755 | 21,062 | 15,962 | 10,023 | 0        |
| $\cos\alpha_1/(1+\sin^2\alpha_1)$ | 0,689  | 0,757  | 0,826  | 0,893  | 0,955  | 1        |
| $\zeta_{\text{Bx1}}$              | 2,563  | 3,316  | 4,955  | 9,532  | 33,351 | $\infty$ |
| $M_2/M_0=0,2$                     |        |        |        |        |        |          |
| $m_2/m_0$                         | 0      | 0,2    | 0,4    | 0,6    | 0,8    | 1        |
| $\alpha_1$                        | 27,25  | 23,276 | 19,076 | 14,483 | 9,107  | 0        |
| $\cos\alpha_1/(1+\sin^2\alpha_1)$ | 0,735  | 0,794  | 0,853  | 0,911  | 0,963  | 1        |
| $\zeta_{\text{Bx1}}$              | 4,009  | 5,361  | 8,252  | 16,306 | 58,376 | $\infty$ |
| $M_2/M_0=0$                       |        |        |        |        |        |          |
| $m_2/m_0$                         | 0      | 0,2    | 0,4    | 0,6    | 0,8    | 1        |
| $\alpha_1$                        | 25,174 | 21,538 | 17,675 | 13,435 | 8,455  | 0        |
| $\cos\alpha_1/(1+\sin^2\alpha_1)$ | 0,766  | 0,819  | 0,872  | 0,922  | 0,968  | 1        |
| $\zeta_{\text{Bx1}}$              | 5,761  | 7,87   | 12,354 | 24,843 | 90,286 | $\infty$ |



Таблиця 2.3 - Розрахунок зміни коефіцієнта опору в циліндричній частині гідроциклона при зміні моментів крутки води в піску при різних витратах води в пісок

| $m_2/m_0=0,8$                     |        |         |         |        |        |
|-----------------------------------|--------|---------|---------|--------|--------|
| $M_2/M_0$                         | 0      | 0,2     | 0,4     | 0,6    | 0,8    |
| $\alpha_1$                        | 8,455  | 9,107   | 10,023  | 11,476 | 14,483 |
| $\cos\alpha_1/(1+\sin^2\alpha_1)$ | 0,968  | 0,963   | 0,955   | 0,942  | 0,911  |
| $\zeta_{\text{BX1}}$              | 90,286 | 58,376  | 33,351  | 15,237 | 4,076  |
| $m_2/m_0=0,6$                     |        |         |         |        |        |
| $M_2/M_0$                         | 0      | 0,2     | 0,4     | 0,6    | 0,8    |
| $\alpha_1$                        | 13,435 | 14,483  | 15,962  | 18,323 | 23,276 |
| $\cos\alpha_1/(1+\sin^2\alpha_1)$ | 0,922  | 0,911   | 0,893   | 0,864  | 0,794  |
| $\zeta_{\text{BX1}}$              | 24,843 | 16,306  | 9,532   | 4,534  | 1,3401 |
| $m_2/m_0=0,4$                     |        |         |         |        |        |
| $M_2/M_0$                         | 0      | 0,2     | 0,4     | 0,6    | 0,8    |
| $\alpha_1$                        | 17,675 | 19,076  | 21,062  | 24,257 | 31,092 |
| $\cos\alpha_1/(1+\sin^2\alpha_1)$ | 0,872  | 0,853   | 0,826   | 0,7802 | 0,676  |
| $\zeta_{\text{BX1}}$              | 12,354 | 8,252   | 4,955   | 2,471  | 0,822  |
| $m_2/m_0=0,2$                     |        |         |         |        |        |
| $M_2/M_0$                         | 0      | 0,2     | 0,4     | 0,6    | 0,8    |
| $\alpha_1$                        | 21,538 | 23,276  | 25,755  | 29,784 | 38,638 |
| $\cos\alpha_1/(1+\sin^2\alpha_1)$ | 0,819  | 0,794   | 0,757   | 0,696  | 0,562  |
| $\zeta_{\text{BX1}}$              | 7,8701 | 5,3607  | 3,316   | 1,745  | 0,669  |
| $m_2/m_0=0$                       |        |         |         |        |        |
| $M_2/M_0$                         | 0      | 0,2     | 0,4     | 0,6    | 0,8    |
| $\alpha_1$                        | 25,174 | 27,2503 | 30,2303 | 35,138 | 46,343 |
| $\cos\alpha_1/(1+\sin^2\alpha_1)$ | 0,766  | 0,735   | 0,689   | 0,614  | 0,453  |
| $\zeta_{\text{BX1}}$              | 5,761  | 4,009   | 2,563   | 1,434  | 0,658  |

Таблиця 2.4 - Розрахунок зміни коефіцієнта опору в конічній частині гідроциклона при зміні витрати води в пісок при різних моментах крутки води в піску

| $M_2/M_0=1$                       |          |         |        |        |        |         |
|-----------------------------------|----------|---------|--------|--------|--------|---------|
| $m_2/m_0$                         | 0        | 0,2     | 0,4    | 0,6    | 0,8    | 1       |
| $\alpha_1$                        | 0        | 10,651  | 16,981 | 22,437 | 27,482 | 32,323  |
| $\cos\alpha_1/(1+\sin^2\alpha_1)$ | 1        | 0,9503  | 0,881  | 0,806  | 0,731  | 0,657   |
| $\zeta_{BX1}$                     | $\infty$ | 260,885 | 75,834 | 40,206 | 27,513 | 21,807  |
| $M_2/M_0=0,8$                     |          |         |        |        |        |         |
| $m_2/m_0$                         | 0        | 0,2     | 0,4    | 0,6    | 0,8    | 1       |
| $\alpha_1$                        | 0        | 11,476  | 18,323 | 24,257 | 29,784 | 35,138  |
| $\cos\alpha_1/(1+\sin^2\alpha_1)$ | 1        | 0,942   | 0,864  | 0,7802 | 0,696  | 0,614   |
| $\zeta_{BX1}$                     | $\infty$ | 169,671 | 50,497 | 27,523 | 19,436 | 15,971  |
| $M_2/M_0=0,6$                     |          |         |        |        |        |         |
| $m_2/m_0$                         | 0        | 0,2     | 0,4    | 0,6    | 0,8    | 1       |
| $\alpha_1$                        | 0        | 12,637  | 20,223 | 26,856 | 33,107 | 39,262  |
| $\cos\alpha_1/(1+\sin^2\alpha_1)$ | 1        | 0,931   | 0,838  | 0,741  | 0,645  | 0,553   |
| $\zeta_{BX1}$                     | $\infty$ | 97,806  | 30,173 | 17,158 | 12,726 | 11,0903 |
| $M_2/M_0=0,4$                     |          |         |        |        |        |         |
| $m_2/m_0$                         | 0        | 0,2     | 0,4    | 0,6    | 0,8    | 1       |
| $\alpha_1$                        | 0        | 14,483  | 23,276 | 31,092 | 38,638 | 46,343  |
| $\cos\alpha_1/(1+\sin^2\alpha_1)$ | 1        | 0,911   | 0,794  | 0,676  | 0,562  | 0,453   |
| $\zeta_{BX1}$                     | $\infty$ | 45,394  | 14,923 | 9,158  | 7,452  | 7,22    |
| $M_2/M_0=0,2$                     |          |         |        |        |        |         |
| $m_2/m_0$                         | 0        | 0,2     | 0,4    | 0,6    | 0,8    | 1       |
| $\alpha_1$                        | 0        | 18,323  | 29,784 | 40,478 | 51,711 | 65,426  |
| $\cos\alpha_1/(1+\sin^2\alpha_1)$ | 1        | 0,864   | 0,696  | 0,535  | 0,383  | 0,227   |
| $\zeta_{BX1}$                     | $\infty$ | 12,624  | 4,859  | 3,652  | 3,999  | 4,64    |

Таблиця 2.5 - Розрахунок зміни коефіцієнта опору в конічній частині гідроциклона при зміні моментів крутки в пісочної насадки при різних витратах води в пісок

| $m_2/m_0=1$                       |         |        |         |         |         |
|-----------------------------------|---------|--------|---------|---------|---------|
| $M_2/M_0$                         | 0,2     | 0,4    | 0,6     | 0,8     | 1       |
| $\alpha_1$                        | 65,426  | 46,343 | 39,262  | 35,138  | 32,323  |
| $\cos\alpha_1/(1+\sin^2\alpha_1)$ | 0,227   | 0,453  | 0,553   | 0,614   | 0,657   |
| $\zeta_{\text{BX1}}$              | 4,64    | 7,333  | 11,0903 | 15,971  | 21,807  |
| $m_2/m_0=0,8$                     |         |        |         |         |         |
| $M_2/M_0$                         | 0,2     | 0,4    | 0,6     | 0,8     | 1       |
| $\alpha_1$                        | 51,7106 | 38,638 | 33,107  | 29,784  | 27,482  |
| $\cos\alpha_1/(1+\sin^2\alpha_1)$ | 0,383   | 0,562  | 0,645   | 0,696   | 0,731   |
| $\zeta_{\text{BX1}}$              | 3,999   | 7,452  | 12,726  | 19,436  | 27,513  |
| $m_2/m_0=0,6$                     |         |        |         |         |         |
| $M_2/M_0$                         | 0,2     | 0,4    | 0,6     | 0,8     | 1       |
| $\alpha_1$                        | 40,478  | 31,092 | 26,856  | 24,257  | 22,437  |
| $\cos\alpha_1/(1+\sin^2\alpha_1)$ | 0,535   | 0,676  | 0,741   | 0,7802  | 0,806   |
| $\zeta_{\text{BX1}}$              | 3,625   | 9,158  | 17,158  | 27,523  | 40,206  |
| $m_2/m_0=0,4$                     |         |        |         |         |         |
| $M_2/M_0$                         | 0,2     | 0,4    | 0,6     | 0,8     | 1       |
| $\alpha_1$                        | 29,784  | 23,276 | 20,223  | 18,323  | 16,981  |
| $\cos\alpha_1/(1+\sin^2\alpha_1)$ | 0,696   | 0,794  | 0,838   | 0,864   | 0,881   |
| $\zeta_{\text{BX1}}$              | 4,859   | 14,923 | 30,173  | 50,497  | 75,834  |
| $m_2/m_0=0,2$                     |         |        |         |         |         |
| $M_2/M_0$                         | 0,2     | 0,4    | 0,6     | 0,8     | 1       |
| $\alpha_1$                        | 18,323  | 14,483 | 12,637  | 11,476  | 10,651  |
| $\cos\alpha_1/(1+\sin^2\alpha_1)$ | 0,864   | 0,911  | 0,931   | 0,942   | 0,9503  |
| $\zeta_{\text{BX1}}$              | 12,624  | 45,394 | 97,806  | 169,671 | 260,885 |

Таблиця 2.6 - Розрахунок розміру повітряного вихору в зливні гідроциклону при різних зливах в пісок

| $M_2/M_0=0$   |        |        |        |        |        |   |
|---------------|--------|--------|--------|--------|--------|---|
| $m_2/m_0$     | 0      | 0,2    | 0,4    | 0,6    | 0,8    | 1 |
| $\alpha_1$    | 25,174 | 21,538 | 17,676 | 13,435 | 8,4557 | 0 |
| $R_B/R_{mp}$  | 0,6809 | 0,7568 | 0,8306 | 0,8995 | 0,9596 | 1 |
| $M_2/M_0=0,2$ |        |        |        |        |        |   |
| $m_2/m_0$     | 0      | 0,2    | 0,4    | 0,6    | 0,8    | 1 |
| $\alpha_1$    | 27,25  | 23,277 | 19,077 | 14,483 | 9,1072 | 0 |
| $R_B/R_{mp}$  | 0,636  | 0,7211 | 0,8048 | 0,8839 | 0,9532 | 1 |
| $M_2/M_0=0,4$ |        |        |        |        |        |   |
| $m_2/m_0$     | 0      | 0,2    | 0,4    | 0,6    | 0,8    | 1 |
| $\alpha_1$    | 30,23  | 25,755 | 21,062 | 15,962 | 10,023 | 0 |
| $R_B/R_{mp}$  | 0,571  | 0,6684 | 0,7663 | 0,8602 | 0,9434 | 1 |
| $M_2/M_0=0,6$ |        |        |        |        |        |   |
| $m_2/m_0$     | 0      | 0,2    | 0,4    | 0,6    | 0,8    | 1 |
| $\alpha_1$    | 35,139 | 29,785 | 24,257 | 18,323 | 11,476 | 0 |
| $R_B/R_{mp}$  | 0,4672 | 0,5807 | 0,7004 | 0,8188 | 0,9261 | 1 |
| $M_2/M_0=0,8$ |        |        |        |        |        |   |
| $m_2/m_0$     | 0      | 0,2    | 0,4    | 0,6    | 0,8    | 1 |
| $\alpha_1$    | 46,343 | 38,639 | 31,093 | 23,277 | 14,483 | 0 |
| $R_B/R_{mp}$  | 0,2844 | 0,3996 | 0,5523 | 0,7211 | 0,8839 | 1 |

Таблиця 2.7 - Розрахунок розміру повітряного вихору у зливні гідроциклону при різних моментах кількості руху в пісковій насадці

| $m_2/m_0=0$   |        |        |        |        |        |   |
|---------------|--------|--------|--------|--------|--------|---|
| $M_2/M_0$     | 0      | 0,2    | 0,4    | 0,6    | 0,8    | 1 |
| $\alpha_1$    | 25,174 | 27,25  | 30,23  | 35,139 | 46,343 | 0 |
| $R_B/R_{TP}$  | 0,6809 | 0,636  | 0,571  | 0,4672 | 0,2844 | 0 |
| $m_2/m_0=0,2$ |        |        |        |        |        |   |
| $M_2/M_0$     | 0      | 0,2    | 0,4    | 0,6    | 0,8    | 1 |
| $\alpha_1$    | 21,538 | 23,277 | 25,755 | 29,785 | 38,639 | 0 |
| $R_B/R_{TP}$  | 0,7568 | 0,7211 | 0,6684 | 0,5807 | 0,3996 | 0 |
| $m_2/m_0=0,4$ |        |        |        |        |        |   |
| $M_2/M_0$     | 0      | 0,2    | 0,4    | 0,6    | 0,8    | 1 |
| $\alpha_1$    | 17,676 | 19,077 | 21,062 | 24,257 | 31,093 | 0 |
| $R_B/R_{TP}$  | 0,8306 | 0,8048 | 0,7663 | 0,7004 | 0,5523 | 0 |
| $m_2/m_0=0,6$ |        |        |        |        |        |   |
| $M_2/M_0$     | 0      | 0,2    | 0,4    | 0,6    | 0,8    | 1 |
| $\alpha_1$    | 13,435 | 14,483 | 15,962 | 18,323 | 23,277 | 0 |
| $R_B/R_{TP}$  | 0,8995 | 0,8839 | 0,8602 | 0,8188 | 0,7211 | 0 |
| $m_2/m_0=0,8$ |        |        |        |        |        |   |
| $M_2/M_0$     | 0      | 0,2    | 0,4    | 0,6    | 0,8    | 1 |
| $\alpha_1$    | 8,4557 | 9,1072 | 10,023 | 11,476 | 14,483 | 0 |
| $R_B/R_{TP}$  | 0,9596 | 0,9532 | 0,9434 | 0,9261 | 0,8839 | 0 |

Таблиця 2.8 - Розрахунок розміру повітряного вихору в гідроциклоні в піскових насадках при різних зливах у пісок

| $M_2/M_0=0,1$ ( $M_1/M_0=0,9$ ) |   |        |        |        |        |        |
|---------------------------------|---|--------|--------|--------|--------|--------|
| $m_1/m_0$                       | 1 | 0,8    | 0,6    | 0,4    | 0,2    | 0      |
| $m_2/m_0$                       | 0 | 0,2    | 0,4    | 0,6    | 0,8    | 1      |
| $\alpha_2$                      | 0 | 23,277 | 38,639 | 54,686 | 80,616 | 71,3   |
| $R_{BK}/R_K$                    | 1 | 0,721  | 0,399  | 0,234  | 0,224  | 0,094  |
| $M_2/M_0=0,2$ ( $M_1/M_0=0,8$ ) |   |        |        |        |        |        |
| $m_1/m_0$                       | 1 | 0,8    | 0,6    | 0,4    | 0,2    | 0      |
| $m_2/m_0$                       | 0 | 0,2    | 0,4    | 0,6    | 0,8    | 1      |
| $\alpha_2$                      | 0 | 18,323 | 29,785 | 40,478 | 51,711 | 65,426 |
| $R_{BK}/R_K$                    | 1 | 0,818  | 0,580  | 0,3673 | 0,242  | 0,314  |
| $M_2/M_0=0,4$ ( $M_1/M_0=0,6$ ) |   |        |        |        |        |        |
| $m_1/m_0$                       | 1 | 0,8    | 0,6    | 0,4    | 0,2    | 0      |
| $m_2/m_0$                       | 0 | 0,2    | 0,4    | 0,6    | 0,8    | 1      |
| $\alpha_2$                      | 0 | 14,483 | 23,277 | 31,093 | 38,639 | 46,343 |
| $R_{BK}/R_K$                    | 1 | 0,883  | 0,721  | 0,552  | 0,399  | 0,284  |
| $M_2/M_0=0,6$ ( $M_1/M_0=0,4$ ) |   |        |        |        |        |        |
| $m_1/m_0$                       | 1 | 0,8    | 0,4    | 0,6    | 0,2    | 0      |
| $m_2/m_0$                       | 0 | 0,2    | 0,4    | 0,6    | 0,8    | 1      |
| $\alpha_2$                      | 0 | 12,637 | 20,224 | 26,856 | 33,107 | 39,262 |
| $R_{BK}/R_K$                    | 1 | 0,911  | 0,783  | 0,644  | 0,509  | 0,388  |
| $M_2/M_0=0,8$ ( $M_1/M_0=0,2$ ) |   |        |        |        |        |        |
| $m_1/m_0$                       | 1 | 0,8    | 0,6    | 0,4    | 0,2    | 0      |
| $m_2/m_0$                       | 0 | 0,2    | 0,4    | 0,6    | 0,8    | 1      |
| $\alpha_2$                      | 0 | 11,476 | 18,323 | 24,257 | 29,785 | 35,138 |
| $R_{BK}/R_K$                    | 1 | 0,926  | 0,819  | 0,700  | 0,5807 | 0,467  |
| $M_2/M_0=1$ ( $M_1/M_0=0$ )     |   |        |        |        |        |        |
| $m_1/m_0$                       | 1 | 0,8    | 0,6    | 0,4    | 0,2    | 0      |
| $m_2/m_0$                       | 0 | 0,2    | 0,4    | 0,6    | 0,8    | 1      |
| $\alpha_2$                      | 0 | 10,652 | 16,981 | 22,437 | 27,482 | 32,323 |
| $R_{BK}/R_K$                    | 1 | 0,936  | 0,843  | 0,739  | 0,6309 | 0,525  |

Таблиця 2.9 - Розрахунок розміру повітряного вихору в гідроциклоні в піскові насадки при різних моментах кількості руху в піскові насадки

|                                 |        |        |        |        |        |
|---------------------------------|--------|--------|--------|--------|--------|
| $m_2/m_0=0,1$ ( $m_1/m_0=0,9$ ) |        |        |        |        |        |
| $M_1/M_0$                       | 0,8    | 0,6    | 0,4    | 0,2    | 0      |
| $M_2/M_0$                       | 0,2    | 0,4    | 0,6    | 0,8    | 1      |
| $\alpha_2$                      | 11,476 | 9,107  | 7,959  | 7,234  | 6,717  |
| $R_{BK}/R_K$                    | 0,926  | 0,953  | 0,964  | 0,971  | 0,974  |
| $m_2/m_0=0,2$ ( $m_1/m_0=0,8$ ) |        |        |        |        |        |
| $M_1/M_0$                       | 0,8    | 0,6    | 0,4    | 0,2    | 0      |
| $M_2/M_0$                       | 0,2    | 0,4    | 0,6    | 0,8    | 1      |
| $\alpha_2$                      | 18,323 | 14,483 | 12,637 | 11,476 | 10,651 |
| $R_{BK}/R_K$                    | 0,818  | 0,884  | 0,911  | 0,926  | 0,936  |
| $m_2/m_0=0,4$ ( $m_1/m_0=0,6$ ) |        |        |        |        |        |
| $M_1/M_0$                       | 0,8    | 0,6    | 0,4    | 0,2    | 0      |
| $M_2/M_0$                       | 0,2    | 0,4    | 0,6    | 0,8    | 1      |
| $\alpha_2$                      | 29,785 | 23,277 | 20,224 | 18,323 | 16,981 |
| $R_{BK}/R_K$                    | 0,580  | 0,721  | 0,783  | 0,819  | 0,842  |
| $m_2/m_0=0,6$ ( $m_1/m_0=0,4$ ) |        |        |        |        |        |
| $M_1/M_0$                       | 0,8    | 0,6    | 0,4    | 0,2    | 0      |
| $M_2/M_0$                       | 0,2    | 0,4    | 0,6    | 0,8    | 1      |
| $\alpha_2$                      | 40,478 | 31,093 | 26,856 | 24,257 | 22,437 |
| $R_{BK}/R_K$                    | 0,367  | 0,552  | 0,644  | 0,700  | 0,739  |
| $m_2/m_0=0,8$ ( $m_1/m_0=0,2$ ) |        |        |        |        |        |
| $M_1/M_0$                       | 0,8    | 0,6    | 0,4    | 0,2    | 0      |
| $M_2/M_0$                       | 0,2    | 0,4    | 0,6    | 0,8    | 1      |
| $\alpha_2$                      | 51,711 | 38,639 | 33,107 | 29,785 | 27,482 |
| $R_{BK}/R_K$                    | 0,242  | 0,399  | 0,509  | 0,581  | 0,631  |
| $m_2/m_0=1$ ( $m_1/m_0=0$ )     |        |        |        |        |        |
| $M_1/M_0$                       | 0,8    | 0,6    | 0,4    | 0,2    | 0      |
| $M_2/M_0$                       | 0,2    | 0,4    | 0,6    | 0,8    | 1      |
| $\alpha_2$                      | 65,427 | 46,343 | 39,263 | 35,139 | 32,323 |
| $R_{BK}/R_K$                    | 0,314  | 0,284  | 0,388  | 0,467  | 0,525  |

На рисунку 2.1 представлена залежність зміни коефіцієнта опору циліндричної частини гідроциклону при різних витратах через піскову насадку. Чим більше проходить рідини через піскову насадку, тим більше коефіцієнт опору циліндричної частини гідроциклону. На рисунку 2.2 представлена залежність зміни коефіцієнта опору конічної частини гідроциклону при різних витратах через піскову насадку. Чим більше проходить рідини через піскову насадку, тим менше коефіцієнт опору конічної частини. Також при невеликому масовому витраті коефіцієнт опору змінюється лінійно, до збільшення масової витрати.

Зміна коефіцієнта опору конічної частини при різних моментах скручування в пісковій насадці представлені на рисунку 2.3. При закритій пісковій насадці вихід рідини через піскову насадку відсутній і коефіцієнт опору дорівнює нулю. При збільшенні прохідної рідини через піскову насадку коефіцієнт опору зростає і при повному проходженні рідини досягає максимуму. При різних моментах скручування води в пісок, коефіцієнт опору циліндричної частини поводиться аналогічно, рисунок 2.4. Чим більше рідини проходить через піскову насадку, тим менше коефіцієнт опору циліндричної частини гідроциклону.

На рисунку 2.5 показана зміна розмірів повітряного вихору в зливні і пісковій насадці гідроциклону при різних зливах в пісок. У конічної частини гідроциклону при закритому зливні вся пульпа буде виходити через піскову насадку і розмір вихору буде мінімальним. З відкриттям зливного патрубку і зменшенням кількості рідини проходить через піскову насадку розмір вихору в гідроциклоні зростає. При повному закритті піскової насадки розмір вихору має максимальне значення і може займати весь простір конуса.

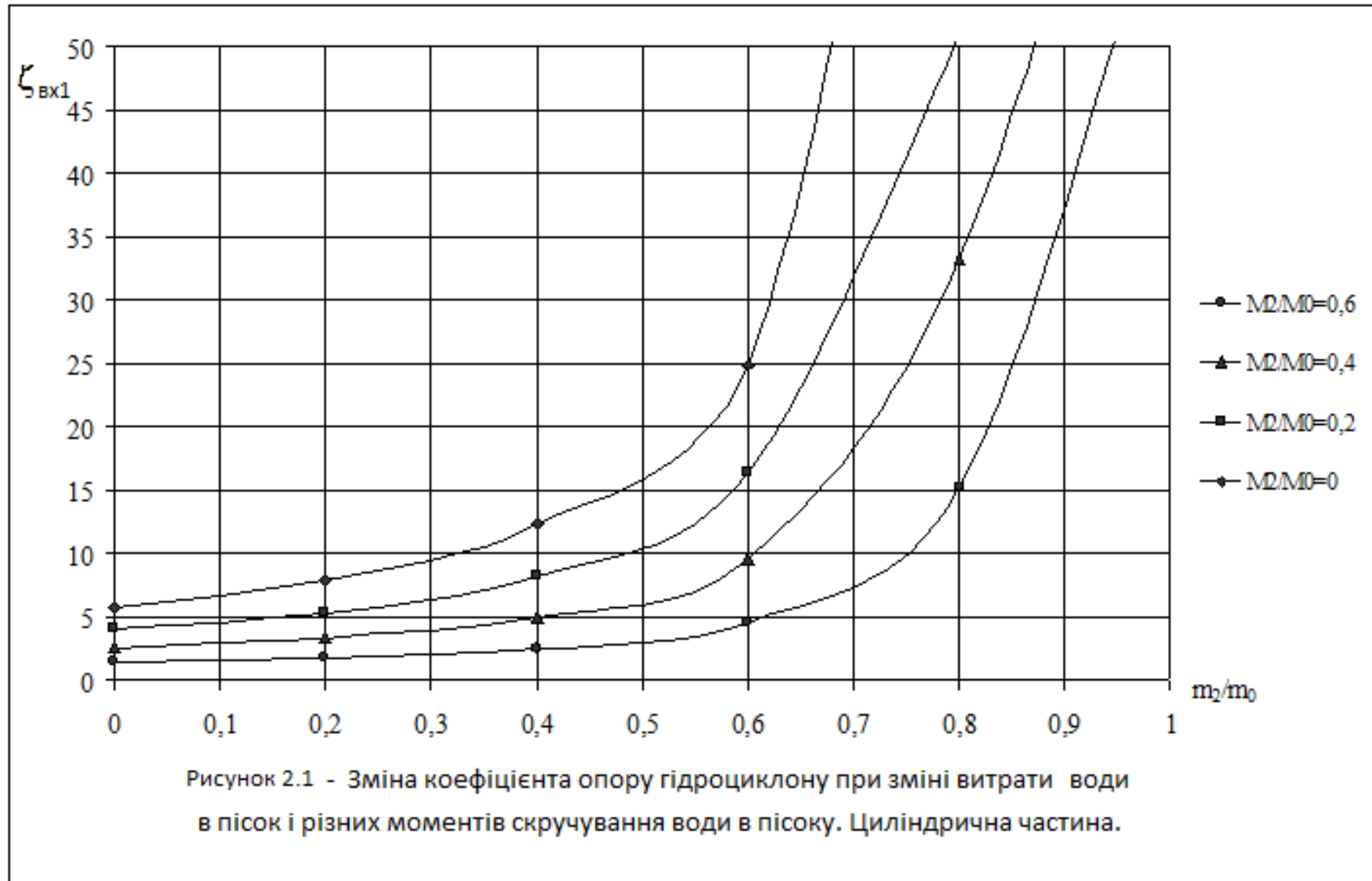
У циліндричної частини гідроциклону при повністю закритій пісковій насадці вся пульпа буде виходити через зливний патрубок і розмір вихору буде мінімальним. З відкриттям піскової насадки і збільшенні кількості рідини що проходить через піскову насадку розмір вихору в



гідроциклоні зростає. При повному закритті зливного патрубку розмір вихору має максимальне значення і може займати весь простір труби.

На рисунку 2.6 представлена залежність зміни розмірів повітряного вихору в зливні і пісковій насадці гідроциклону при різних моментах руху в пісковій насадці. Зміна відбувається при постійній масовій витраті. У циліндричній частині гідроциклону при закритому зливні повітряний вихор відсутній, і вся рідина йде через піскову насадку. Зі збільшенням моменту руху збільшується і розмір вихору. При рівній масовій витраті, велика частина рідини буде йти через зливний патрубок. У конічній частині гідроциклону при повністю закритій пісковій насадці повітряний вихор відсутній і вся рідина йде через зливний патрубок. Зі збільшенням моменту руху через піскову насадку збільшується і розмір вихору.

Зі зміною витрат і при різних моментах руху рідини також змінюється і кут скручування, рисунок 2.7, зі збільшенням витрат рідини зростає і кут скручування. Зміна кута скруткив гідроциклоні при зміні витрат через піскову насадку при різних моментах скручування в пісок представлені на рисунку 2.8.



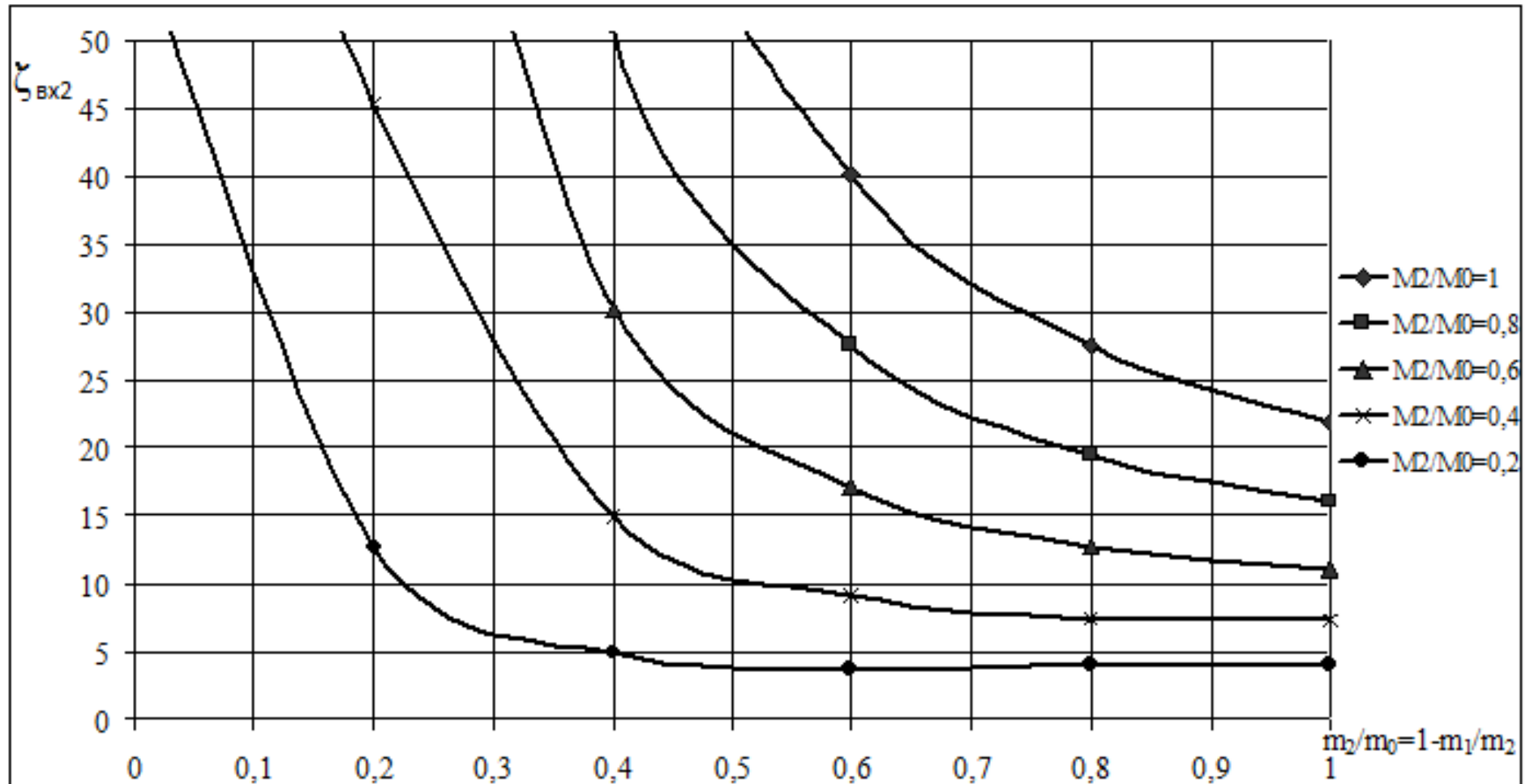


Рисунок 2.2- Зміна коефіцієнта опору гідроциклону при зміні витрат через піскову насадку при різних моментах . Конічна частина.

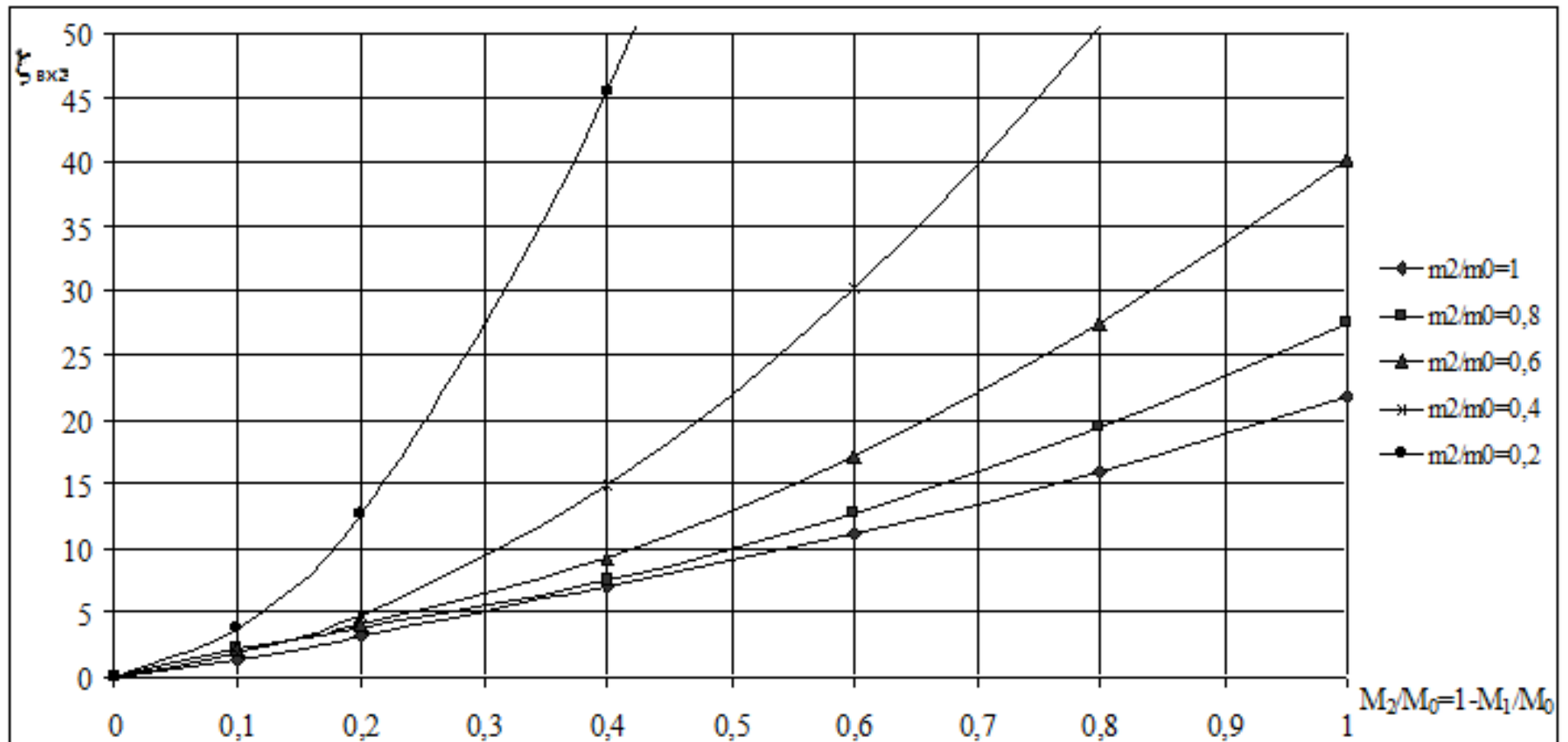


Рисунок 2.3 - Зміна коефіцієнта опору гідроциклону при зміні моменту скручування води в пісок при різних витратах води в пісок. Конічна частина.

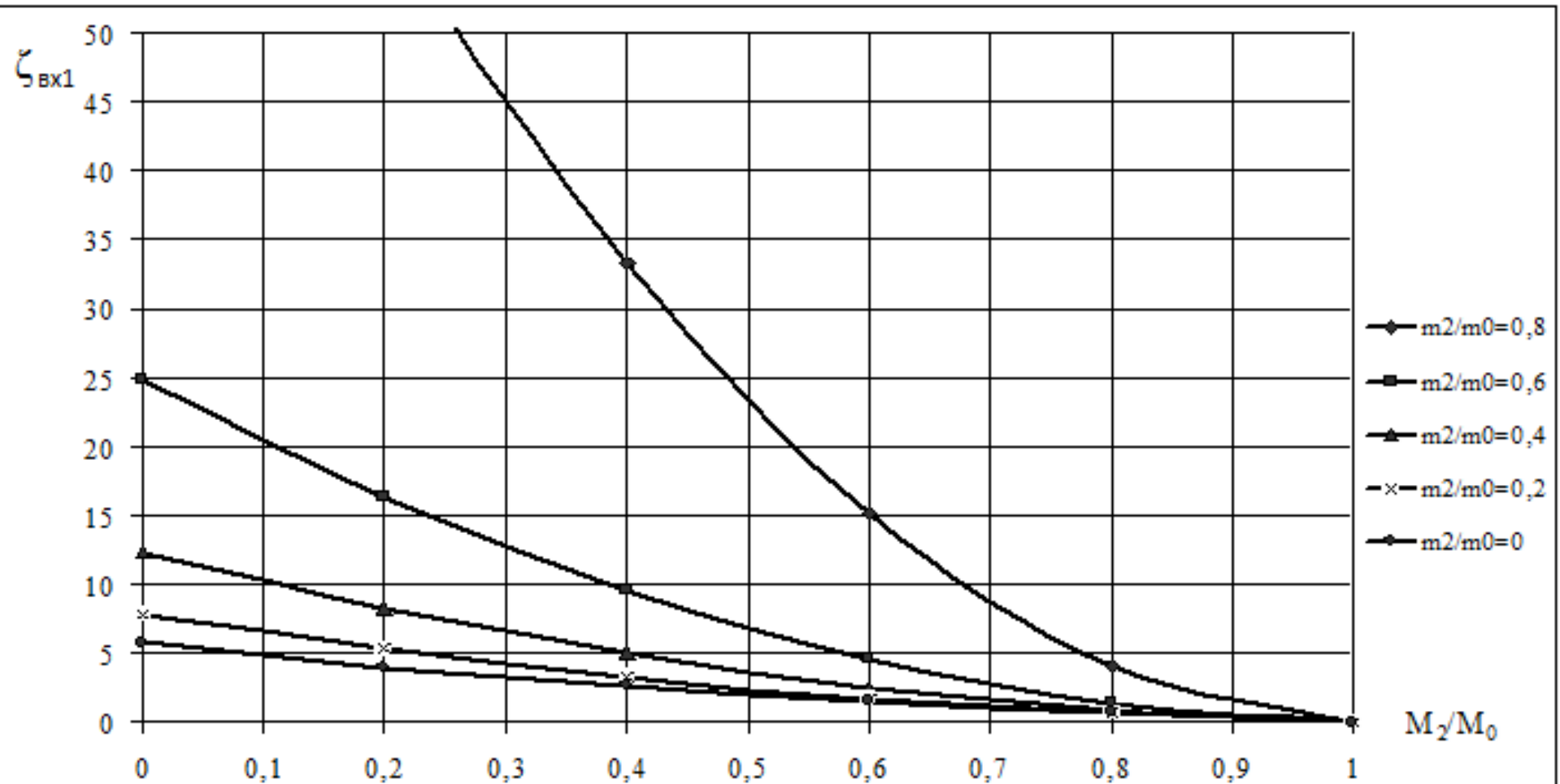
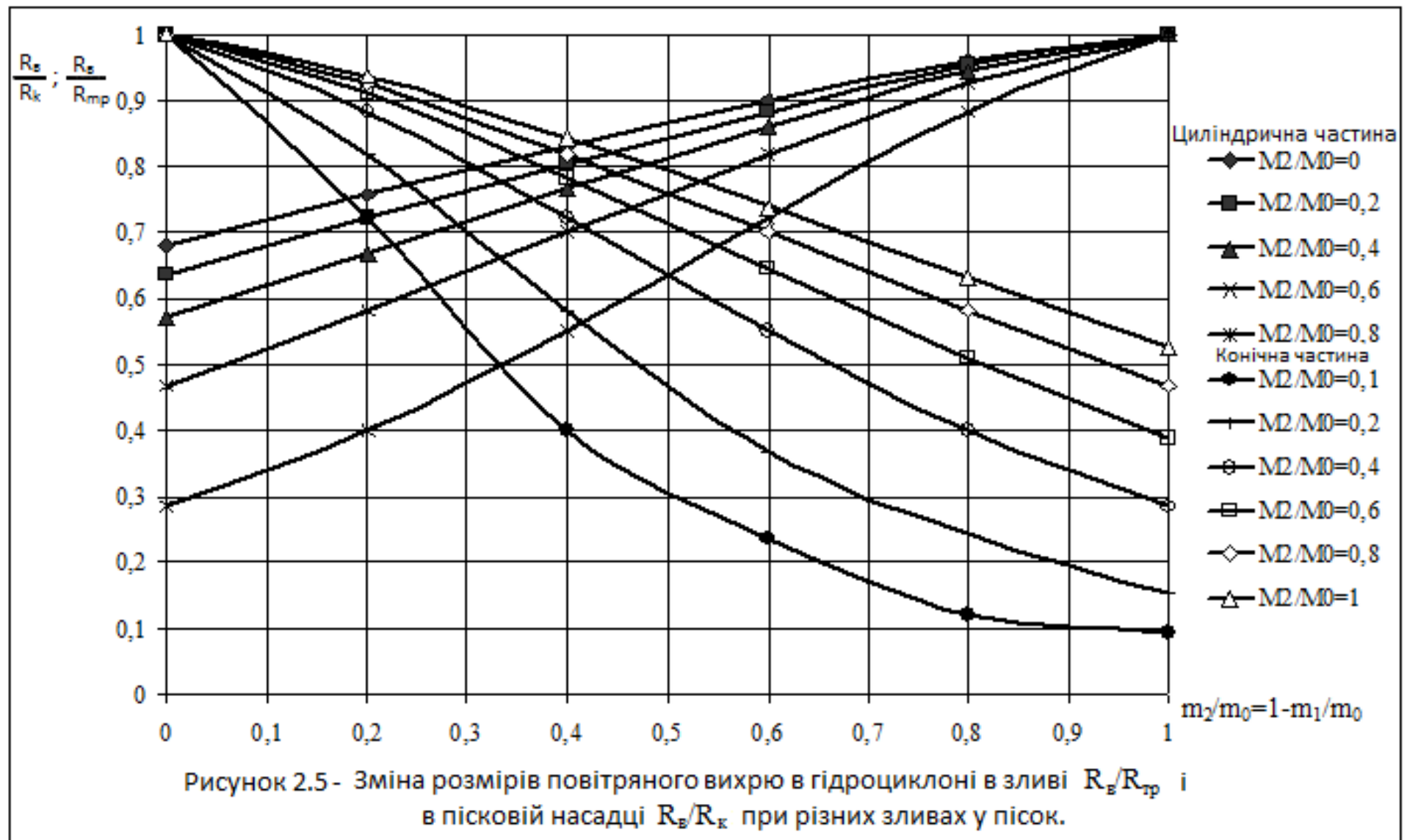


Рисунок 2.4- Зміна коефіцієнта опору гідроциклону при зміні моменту скручування води в пісок при різних витратах води в пісок.

Циліндрична частина.



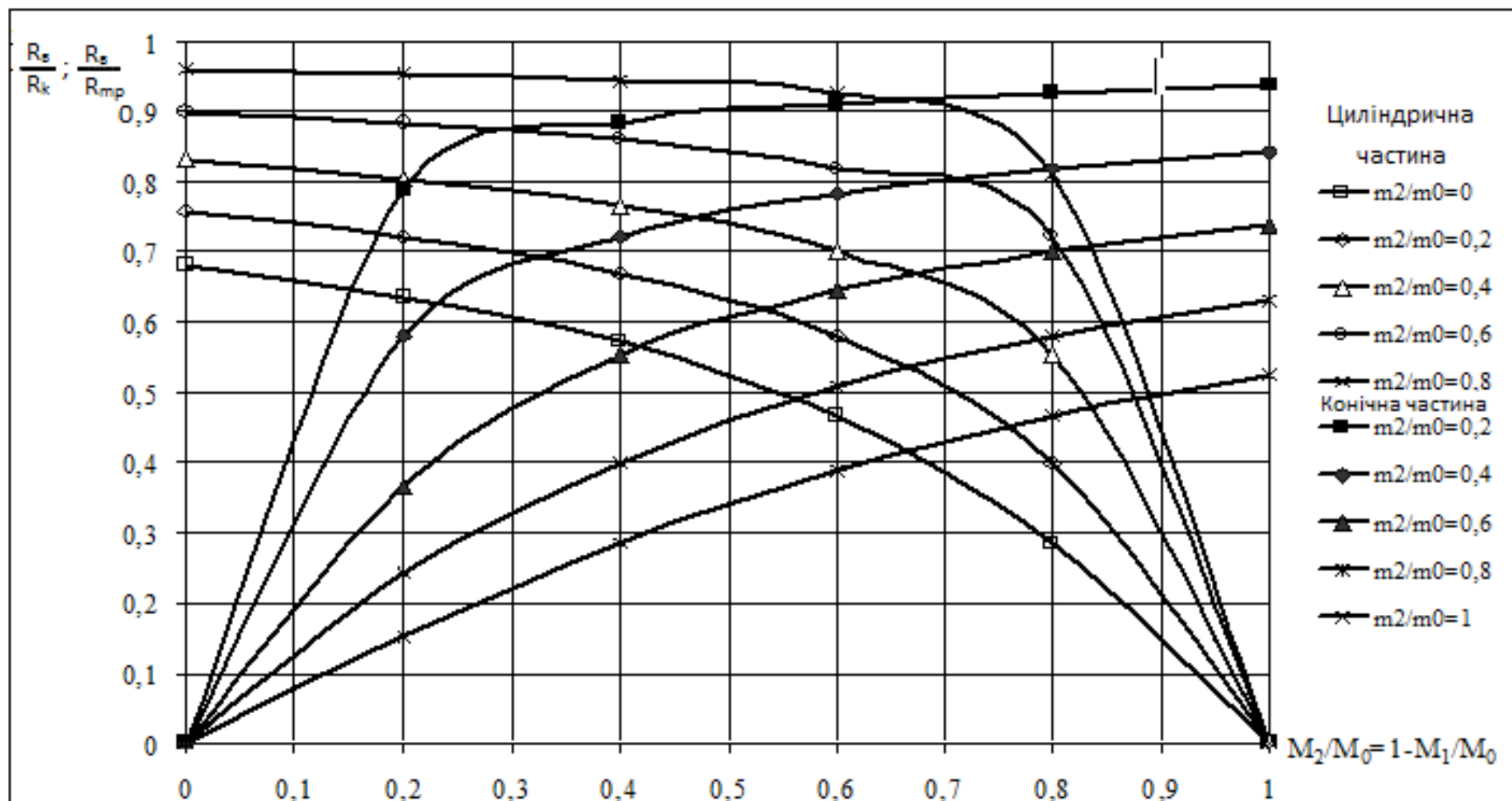
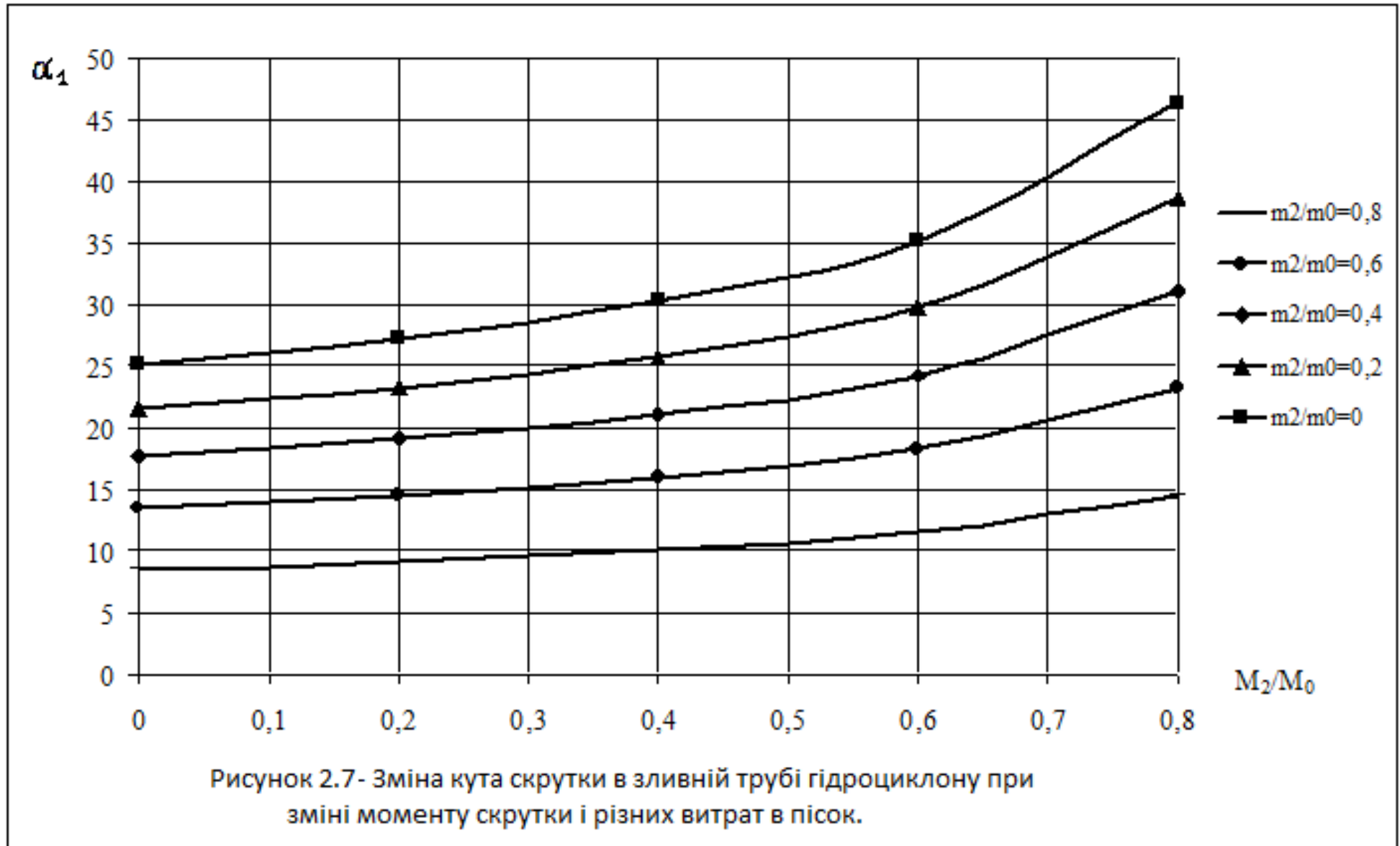
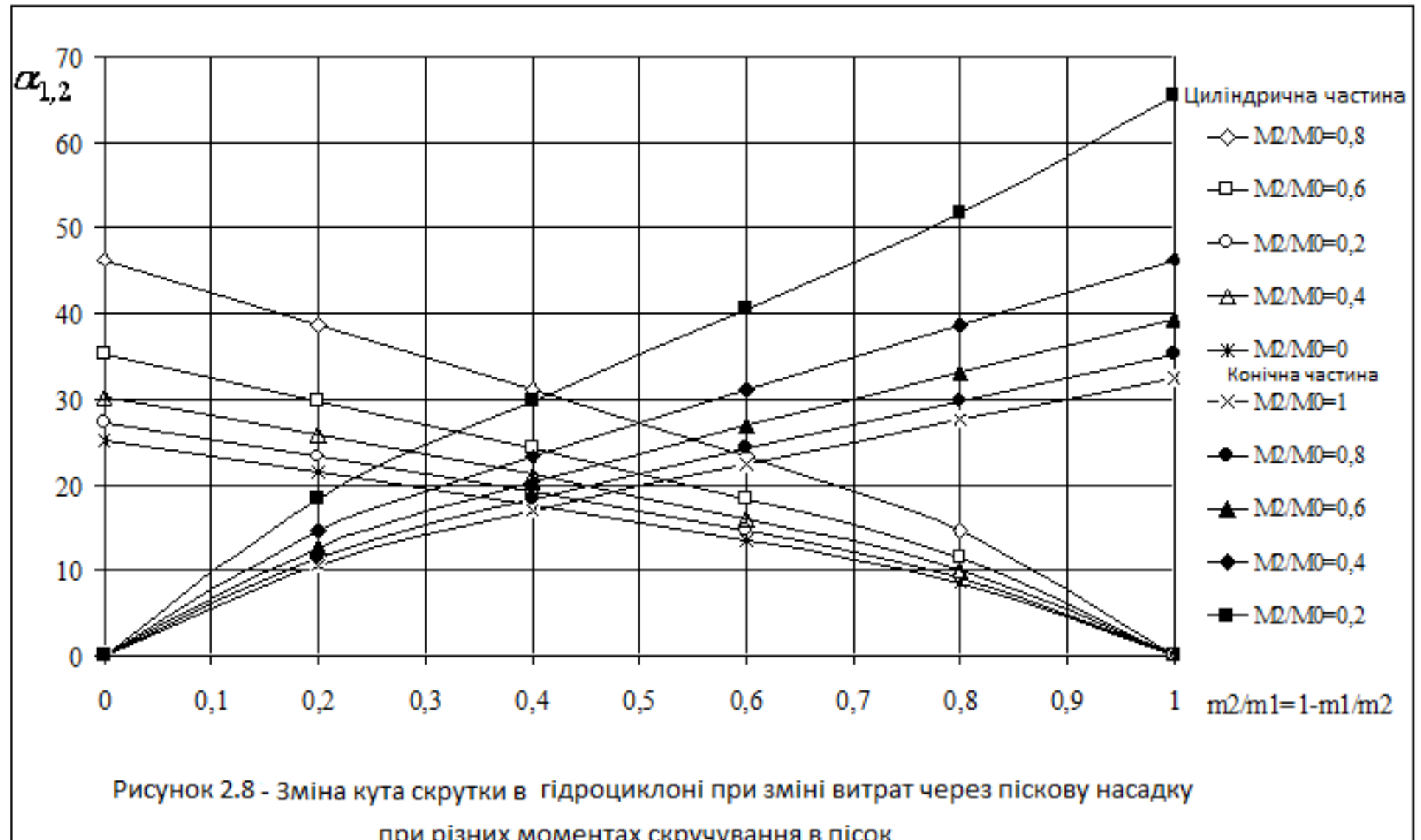


Рисунок 2.6 - Зміна розмірів повітряного вихрю в гідроциклоні в зливі  $R_v/R_{гр}$  і в піщовій насадці  $R_v/R_k$  гідроциклону при різних моментах кількості руху в







### 3 ОХОРОНА ПРАЦІ

#### 3.1 Аналіз умов праці

Поняття «умови праці» містить у собі сукупність факторів виробничого середовища, що чинять вплив на здоров'я, працездатність людини в процесі праці.

Безпека трудового процесу характеризується параметрами безпеки трудових операцій при виконанні нормованих завдань.Порушенням параметрів безпеки трудових операцій є виникнення небезпечних або шкідливих (або тих й інших одночасно) виробничих факторів, якщо їхній прояв не пов'язаний з порушенням параметрів безпеки встаткування та виробничих процесів.

Загальна безпека праці є сукупністю трьох складових: безпеки виробничого процесу; безпеки виробничого встаткування; безпеки трудового процесу.

До небезпечних і шкідливих факторів при виробництві дроту для електролампової промисловості відносять: вироби, що пересуваються; підвищений пилеміст повітря в робочій зоні; підвищена температура поверхней встаткування; недостатня освітленість робочої зони; небезпечний рівень напруги в електричному ланцюзі, замикання якої може пройти через тіло людини; підвищений рівень вібрації й шуму в робочій зоні.

Цех, у якому побудована термічна піч являє собою будинок площею 1200м<sup>2</sup> невеликі вікна при проектуванні даного будинку передбачені тільки нагорі, на висоті 5-6 метрів від рівня підлоги, це створює недостатню освітленість робочої зони, і вимагає додаткового штучного висвітлення.

Функціонуюче в цеху устаткування має велику кількість струмоприймачів різної потужності. Сюди можна віднести: димосос; електричні виконавчі механізми в системі автоматики. Електроживлення цих машин здійснюється від мережі 220 В та трифазної мережі 380 В.

Пульсація потужного факела під зводом печі при спалюванні газу, робота потужного димососа створюють у цеху шум і вібрацію, гранично припустимий рівень шуму становить 85 дБ (А).

Незважаючи на ефективну теплоізоляцію печі випалу, димових боровів, у приміщення виділяється надлишкове тепло. Велика кількість тепла виділяється від струмоприймачів. Виділення надлишкового тепла створює в теплий період року підвищену температуру (до 28-30°C), що ускладняє віддачу тепла людським тілом при фізичній роботі. Це приводить до швидкого стомлення, зниження працездатності й відчуття дискомфорту.

Крім перерахованих вище шкідливих факторів існує також небезпека отруєння персоналу оксидом вуглецю, що може потрапити в приміщення цеху при порушенні режиму роботи печі через нещільності в кожусі печі, а також небезпека задухи при потраплянні в зону загазованості природним газом.

Гранично припустимі концентрації шкідливих і небезпечних речовин наведені в таблиці 3.1.

Таблиця 3.1 - Характеристика шкідливих і небезпечних речовин у повітрі та робочій зоні цеху

| Речовина        | ПДК, мг/м <sup>3</sup> | Фактична концентрація, мг/м <sup>3</sup> | Клас безпеки |
|-----------------|------------------------|--|--------------|
| Диоксид азоту   | 5                      | 0,555                                    | 3            |
| Оксид вуглецю   | 20                     | 15,03                                    | 4            |
| Оксид сірки(II) | 6                      | 0,276                                    | 2            |

### 3.2 Заходи з поліпшення умов праці

У практиці роботи з організацію праці важливою складовою є поліпшення умов праці. Важливе значення поліпшення умов праці

пояснюється лише тим, що вони у основному є виробничу середу, у якій протікає життєдіяльність людини в час праці.

В Україні і в міжнародній організації зі стандартизації застосовується принцип нормування шуму на основі граничних спектрів (граничне допустимих рівнів звукового тиску) в октавних смугах частот.

Граничні величини шуму на робочих місцях регламентуються ГОСТ 12.1.003-86. В ньому закладено принцип встановлення певних параметрів шуму, виходячи з класифікації приміщень за їх використанням для трудової діяльності.

Боротьба з шумом в джерелі його виникнення. Це найбільш дієвий спосіб боротьби з шумом. Створюються мало шумні механічні передачі, розроблено способи зниження шуму в підшипникових вузлах, вентиляторів.

Зниження шуму звукопоглинанням та звукоізоляцією. Об'єкт, котрий випромінює шум, розташовують у кожусі, внутрішні стінки якого покриваються звукопоглинальним матеріалом. Кожух повинен мати достатню звукопоглинальну здатність, не заважати обслуговуванню обладнання під час роботи, не ускладнювати його обслуговування, не псувати інтер'єр цеху. Різновидом цього методу є кабіна, в котрій розташовується найбільш шумний об'єкт і в котрій працює робітник. Кабіна зсередини вкрита звукопоглинальним матеріалом, щоб зменшити рівень шуму всередині кабіни, а не лише ізолювати джерело шуму від решти виробничого приміщення.

Зниження шуму звукоізоляцією. Суть цього методу полягає тому, що шумовипромінювальний об'єкт або декілька найбільш шумних об'єктів розташовуються окремо, ізолювано від основного, менш шумного приміщення звукоізолювальною стіною або перегородкою. Звукоізоляція також досягається шляхом розташування найбільш шумного об'єкта в окремій кабіні. При цьому в ізолюваному приміщенні в кабіні рівень шуму не зменшиться, але шум впливатиме на менше число людей. Звукоізоляція досягається також шляхом розташування оператора в спеціальній кабіні,

звідки він спостерігає та керує технологічним процесом. Звукоізоляційний ефект забезпечується також встановленням екранів та ковпаків. Вони захищають робоче місце і людину від безпосереднього впливу прямого звуку, однак не знижують шум в приміщенні.

Захист від вібрації. За організаційними ознаками методи віброзахисту бувають колективні та індивідуальні. Колективні методи передбачають такі заходи:

- послаблення енергії вібрації в джерелі її виникнення;
- послаблення параметрів вібрації на шляху її розповсюдження від джерела збудження;
- організаційно-технічні;
- санітарно-гігієнічні та лікувально-профілактичні.

Організаційно-технічні заходи передбачають:

- заміну операцій, що вимагають використання вібромашин дистанційним або автоматичним управлінням;
- своєчасні планово-попереджувальні ремонти;
- контроль за вібраційними параметрами ручних машин не рідше ніж 1 раз на 6 місяців;
- змащування та зрівноваження деталей машин, що рухаються.

Чинне місце в системі захисту працюючих займає:

- вібропоглинання;
- вібродемпфування;
- віброізоляція;
- віброгасіння.

Вібропоглинання та вібродемпфування віброуючих конструкцій здійснюється за рахунок збільшення втрат енергії в коливальних системах. В якості вібродемпфування використовують матеріали, що мають велике внутрішнє тертя (магнітні сплави, пластмаси, мастики, пінопласти, гума, пластикати і ін.).

На конструкціях, що вібрують шар пружнов'язких матеріалів збільшує у коливальній системі внутрішнє тертя. Товщина покриття мастиками має перевищувати товщину вібруючих конструктивних деталей у 2-3 рази.

Віброізоляція – це єдиний засіб зменшення вібрації, що передається на руки від ручного механізованого інструмента. Для цього в коливальну систему вводиться пружний елемент, коефіцієнт пористості якого зменшується, коли збільшується сила натиску.

Пружні елементи віброізоляторів і амортизаторів можуть бути гумово-металевими, гумовими, пружинними, або прокладками з ребристої та дірчастої гуми і т. ін. Їх параметри визначаються розрахунками.

Для пружинного амортизатора найчастіше добирають пружини круглого перерізу. Вони є кращими за гумові. Їх проектують для ізоляції як низьких, так і високих частот. Вони довше зберігають пружні властивості, добре протистоять дії мастил і високих температур. Пружинні амортизатори використовують для віброізоляції насосів, електродвигунів і двигунів внутрішнього згоряння.

Для зменшення вібрації, що передається на робочі місця використовують спеціальні амортизуючі сидіння з пасивною пружинною ізоляцією з гумовим або іншим віброгасним покриттям.

Кардинальним заходом віброгасіння загальної вібрації від потужних машин та агрегатів є розрахунок віброізоляційних систем та фундаментів.

Віброгасіння за принципом дії поділяється на ударне та динамічне. Динамічне віброгасіння досягається установкою агрегатів на самостійні фундаменти або масивні плити. Фундамент добирають відповідно до маси агрегату; його розраховують так, щоб амплітуда коливань підшви фундаменту не перевищувала 0,1 – 0,2мм, а для особливо відповідальних випадків – 0,005мм. Щоб коливання не передавалося на ґрунт навколо фундаменту створюють розриви – так звані акустичні шви без заповнення або з заповнювачем.

Важливим профілактичним заходом є правильна організація режиму праці осіб вібронезбезпечних професій. Сумарний час контакту з вібруючим обладнанням має не перевищувати 2/3 тривалості робочого дня, а тривалість безперервної дії вібрації не повинна перевищувати 15-20хв.

З лікувально-профілактичною метою рекомендується надавати дві регламентовані перерви для виробничої гімнастики й гідропроцедур.

Для роботи з вібруючими машинами й механізмами допускаються тільки ті працівники, які досягли 18 років, пройшли попередній медичний огляд, а в процесі роботи мають не рідше, ніж один раз на рік проходити періодичні огляди.

До засобів індивідуального віброзахисту належать віброгасячі рукавиці та спеціальне взуття. Для захисту тіла використовують нагрудні пояси і спеціальні костюми з пружно-демпоруючих матеріалів.

### 3.3 Виробнича санітарія

Підприємства повинні виконуватися відповідно до вимог проектування промислових підприємств. Виробничі території повинні забезпечуватися належними умовами природного освітлення, водопостачання, а також провітрюватись.

Карта умов праці робітників котельної представлена в таблиці 3.2.

Таблиця 3.2- Карта умов праці робітників цеху дроту для електролампової промисловості

| Чинники виробничого середовища і трудового процесу | Нормативнезначення | Фактичнезначення | III клас: шкідливі і небезпечні умови |            |             | Триалість дії чинників за зміну, % |
|--|--------------------|------------------|---------------------------------------|------------|-------------|------------------------------------|
|  |                    |                  | I ступінь                             | II ступінь | III ступінь |                                    |
| Шкідливі хімічні речовини, мг/м <sup>3</sup>       |                    |                  |                                       |            |             |                                    |
| NO <sub>2</sub>                                    | 5                  | 4,7              | -                                     | -          | -           | 100                                |
| CO   | 20                 | 14               | -                                     | -          | -           | 100                                |
| SO <sub>2</sub>                                    | 10                 | 9                | -                                     | -          | -           | 100                                |
| SO <sub>3</sub>                                    | 1                  | 0,6              | -                                     | -          | -           | 100                                |
| Температура повітря, °C                            | 17-22              | 20-22            | -                                     | -          | -           | 100                                |
| Відносна вологість повітря, %                      | ≤75                | 65-70            | -                                     | -          | -           | 100                                |

Виробничі будинки повинні розташовуватися залежно від технологічного процесу і шкідливих виробничих факторів на цьому підприємстві.

Приміщення, у яких виробничі процеси пов'язані з виділенням шкідливих газів, пару, пилу та іншими негативними виробничими факторами, розташовуються стосовно інших будинків і населених пунктів з підвітряної сторони для вітрів переважного напрямку, територія повинна бути упоряджена.

Територія підприємств повинна бути обладнана водопроводом і каналізацією, мати асфальтовані чи інші тверді покриття проїздів і проходів, знаки безпеки руху.



Виробничі приміщення проектується і будуються за умови, що на одного робітника повинно бути не менше  $15 \text{ м}^3$  об'єму приміщення або  $4,5 \text{ м}^2$  площі при мінімальній висоті 3,2 м.

Стіни і стелі повинні бути мало теплопровідними, не затримувати пил, підлоги - теплими, еластичними, рівними і не слизькими.

Оздоровчі пункти для надання першої допомоги потерпілим на виробництві і хворим, а також для проведення лікувальної і санітарно-профілактичної роботи.

Коли потрібні допоміжні приміщення, то вони повинні розташовуватись в прибудовах виробничих будинків чи в окремих будинках, з'єднаних з виробничими опалюваними переходами.

### 3.3.1 Вентиляція та опалення

Метеорологічні умови в робочій зоні виробничих приміщень з категорією роботи Пб (До категорії Пб належать роботи, що виконуються стоячи, пов'язані з ходінням, переміщенням невеликих (до 10 кг) вантажів та супроводжуються помірним фізичним напруженням) занесені до таблиці 3.3.

Видалення повітря передбачається через дефлектори, розташовані в перекритті котельні. Приплив повітря здійснюється в нижню зону приміщення через віконні отвори. У зимовий час повітрообмін здійснюється за допомогою дуттьових вентиляторів, які відбирають повітря з котельні повітрозбірними пристроями, розташованими під перекриттям.

Для систем опалення слід застосовувати у якості теплоносія, як правило, воду.

Для опалення котельної у нашому випадку є:

- у кімнаті машиніста та оператора чавунна батарея на 6 секцій;
- у кімнаті слюсарей 3 чавунні батареї по 8 секцій кожна;
- у кімнаті майстра чавунна батарея на 7 секцій.

Інша частина приміщення не опалюється тому що температура не знижується менше ніж (13...15) °С.

Таблиця 3.3 - Допустимі метеорологічні умови

| Чинники  | Для періодів |             | Для теплого періоду |
|--|--------------|-------------|---------------------|
|  | холодного    | перехідного |                     |
| Допустима температура, °С                            | +17          | +19         | +20 – +22           |
| Відносна вологість повітря, %                        | ≤75          |             | ≤75                 |
| Швидкість руху повітря, м/с                          | 0,4          |             | 0,2                 |
| Температура повітря поза постійних робочих місць, °С | +13          | +26         | -                   |

### 3.3.2 Температурні умови виробничих приміщень

Метерологічні умови виробничих приміщень визначаються сукупністю параметрів-температури ( $t$ , °С), відносної вологості ( $\phi$  %), швидкості руху повітря ( $V$ , м/с), атмосферного тиску ( $P$ , мм.рт.ст.), інтенсивності теплового випромінювання ( $E$ , Вт/м<sup>2</sup>). Сукупність цих величин, характерних для конкретних виробничих умов, називається мікрокліматом.

Заходи й засоби захисту працюючих при недопустимих параметрах мікроклімату поділяються на організаційні заходи та колективні та індивідуальні засоби.

До організаційних заходів відносяться автоматизація, дистанційне керування технологічними процесами, кімнати реабілітації, чергування часу роботи й відпочинку.

Як технічні колективні засоби захисту застосовують екрани, засновані на принципах відбиття, поглинання, тепловідведення, повітряні, водяні душі завіси. До індивідуальних засобів захисту відносяться спецодяг.

### 3.3.3 Освітлення робочого міста

Під час створення оптимальних умов діяльності зорового аналізатора необхідно враховувати, що ефективність залежить тільки від освітленості, а й від такого типу важливих функцій очі, як контрольна чутливість, гострота зору, швидкість розрізнення деталей і стійкість ясного бачення.

Швидкість зорового сприйняття підвищується зі збільшенням висвітлення. Вона швидко зростає при висвітленні в (70...75) лк. Повільніше – при висвітленні в (1000...1200) лк. і більше. Чітке сприйняття предмета очей зберігає певний час.

Стійкість ясного бачення залежить від характеру виконуваної роботи, умов виробничої середовища, зокрема, від тривалості висвітлення (з поліпшенням висвітлення різко підвищується тривалість ясного бачення).

Існуючі норми штучного висвітлення виробничих приміщеннях передбачають різний рівень висвітлення для різної точності робіт.

Норми встановлюють найменші допустимі значення освітленості, при яких забезпечується успішне виконання різної характером і складності зорової роботи. Висвітлення виробничих приміщень лише штучним світлом припустиме лише як виняток. Необхідно враховувати, що природне світло стимулює життєдіяльність організму людини. Він створить відчуття безпосередній зв'язок із зовнішнього середовищем, дозволяє забезпечити рівномірний висвітлення приміщень.

Створення сприятливих умов праці, його подальше полегшення сприяють, з одного боку, збереженню здоров'я працівників, вдосконаленню їх трудових навичок, а, з іншого - підвищенню працездатності і

продуктивності праці, зниження плинності кадрів і поліпшення дисципліни на виробництві.

### 3.4 Електробезпека

В цеху використовується однофазна мережа для живлення зовнішнього та внутрішнього освітлення з напругою  $\sim 220\text{В}$ , а також трьохфазна  $\sim 380\text{В}$  для живлення агрегатів.

При технічній експлуатації електроустаткування промислових підприємств електротравми можуть виникати з таких причин:

- дотик безпосередній до струмопровідних частин електроустановок, які діють під напругою. Це може статися через несправність огорожувальних пристроїв електроустановок, помилкові дії персоналу, коли роботи виконуються поблизу чи безпосередньо на струмопровідних елементах, що знаходяться під напругою, а також з появою напруги (в результаті помилкової подачі) на раніше вимкнених електроустановках і ділянках мережі;

- важкі і смертельні нещасні випадки (понад 200), проаналізовані показали, що на випадковий дотик, не викликаний виробничою необхідністю і помилковою подачею напруги, в процесі ремонтів і оглядів електроустановок, припадає близько 53 % усіх електротравм;

- дотик до металевих конструктивних частин електроустановок, які не повинні знаходитися під напругою, але на корпусах, кожухах і огорожувальних пристроях може з'явитися напруга в результаті електричного пробую чи природного старіння ізоляції електроустановок, а також при замиканні оголених проводів через обрив і падіння на конструктивні частини електроустановок і при відсутності захисного заземлення, ці причини складають близько 22 % усіх травм;

- дотик інструментом і предметами, що мають малий опір, до ізоляції, до струмопровідних частин, а також до неметалевих частин

електроустановок, які виявилися під напругою через заводські дефекти в конструкції, під час монтажу і виготовлення.

- дотик до стін, підлог, будівельних конструкцій, які виявилися під кроковою напругою. Крокова напруга виникає при розтіканні електричного струму від трубопроводів, будівельних конструкцій, рейкових шляхів, на які перейшов електричний струм в результаті падіння проводів чи погіршення ізоляції. Такі причини складають (2...3) %;

- дія дуги при операціях із відмикальними пристроями та інші причини. Вони складають близько 6 %.

Перегляд електротравм, показав, що електротравми через помилкову подачу напруги на електроустановки під час їх ремонтів і оглядів зумовлюються незадовільною організацією ремонтних робіт, недостатнім знанням працівниками правил з техніки безпеки.

Дуже великий відсоток електротравм при випадковому дотику, не викликаному виробничою необхідністю (до 30 %), і невеликий - при дотику в процесі роботи (до 2%) дозволяє зробити висновок, що працівники, не пов'язані з експлуатацією електроустановок, не знають, яку небезпеку становить електричний струм для людини.

Ураження електричним струмом відносяться до небезпечних факторів, що відображаються на всьому організмі. Проте всі електротравми умовно поділяють на два основних види: місцеві електротравми, коли виникає місцеве ураження організму, електричний опік, електричні знаки, металізація шкіри; загальні електротравми, коли уражається весь організм людини через порушення нервової системи, нормальної діяльності життєво важливих органів і систем - електричний удар.

Сила електричного струму, що протікає через людину, є основним чинником, що визначає результат ураження електричним струмом. Значення напруги, під якою опинилася людина, і опір її тіла впливають на результат ураження людини лише в тій мірі, в якій напруга та опір людини визначають значення електричного струму, що протікає через людину.

Якщо збільшується сила електричного струму, небезпека ураження людини теж збільшується. Розрізняють кілька станів людини, що виникають при визначених значеннях струму.

Відчутний струм - електричний струм силою від 0,6 до 1,5 мА, що викликає під час проходження через організм відчутне подразнення.

Струм, що не відпускає - електричний струм, що викликає при проходженні через людину непереборні судорожні скорочення м'язів руки, в якій затиснута струмопровідна частина. При струмі (3...5) мА (50 Гц) подразнюється вся кисть руки, яка торкається струмопровідних частин, при (8...10) мА біль охоплює всю руку, а при 15 мА судороги м'язів рук стають непереборними, а біль нестерпним. Людина при цьому не може розтиснути руку, в якій затиснута струмопровідна частина.

### 3.5 Протипожежна безпека

Відповідно до основних правил пожежної безпеки, на підприємстві розроблені інструкції по заходах пожежної безпеки, в яких вказані для окремих ділянок виробництва заходу по протипожежному режиму, граничні показання контрольно-вимірювальних приладів, порядок і норми зберігання вибухо- і пожежонебезпечних речовин.

Приміщення цеху відноситься до категорії Г - пожежобезпечне, так як у виробництві використовується газоподібні речовини. По кожній інструкції призначена відповідальна особа їх числа інженерно-технічних працівників.

Для гасіння пожеж на підприємстві існує пожежна охорона, усі виробничі цехи і приміщення обладнані пожежною сигналізацією.

Основними первинними засобами пожежогасінні є:

- вогнегасники хімічні пінні ОХП- 10;
- вогнегасники пінні ОВП- 10;
- вогнегасники вуглекислотні ОУ- 2, ОУ- 5, ОУ- 8, ОУ- 20;
- вогнегасники порошкові ОПС- 6, ОПС- 10;

- ящики з піском;
- пожежні щити з інвентарем;
- пожежні водопроводи.

В цілях попередження пожеж і створення безпечних умов праці на підприємстві проведені наступні заходи:

- встановлені достатні розриви між будівлями, спорудами, складами, забороняється зберігання горючих матеріалів в розривах між будівлями;
- забезпечені умови для організації евакуації з приміщень у разі виникнення пожежі;
- впроваджена у виробництво системи автоматичного контролю і сигналізації за виникненням небезпечних чинників.

### 3.6 Засоби індивідуального захисту

Робочі комбінезони і халати, головні убори і чисте взуття повинні видаватися як персоналу, так і усім відвідувачам, що входять на територію господарства або інкубатора.

Для дезінфекції взуття має бути ножна ванна; використовуваний в ній дезінфікуючий розчин регулярно міняють. Обов'язковим повинно бути вимоги миття рук дезінфікуючим розчином або водою з милом.

Персонал і відвідувачі не повинні мати контакту – як прямий, так і непрямої - з іншим птахом або птахопродуктами.

Комплект ЗІЗ - спецодяг, спецвзуття, рукавиці, захисні окуляри, респіратори повинні бути підібрані індивідуально та закріплені за кожним працюючим на весь період роботи. Засоби індивідуального захисту повинні зберігатися в індивідуальних шафах у спеціально виділеному сухому, чистому приміщенні, яке добре провітрюється. Забороняється зберігати ЗІЗ, відносити додому і користуватися ними після роботи.

## ВИСНОВОК

Метою даної дипломної роботи було дослідження гідродинамічних параметрів у напірних гідроциклонах. Незважаючи на те, що гідроциклони застосовуються велику кількість років, все ж вони не повністю досліджені. Причиною цього є складність явищ, які протікають в гідроциклоні. Зважаючи на недостатність проведених наявних теоретичних досліджень роботи гідроциклонів підбір їх поки здійснюється на підставі досвідчених даних. В основному методи розрахунків придатні для реалізації на подібних гідроциклонах. Існуюче різноманіття емпіричних формул для розрахунку продуктивності гідроциклонів ускладнює використання їх в практичній діяльності, так як існуючі формули є емпіричними залежностями і не розкривають фізичної сутності процесів, що здійснюються в гідроциклоні, і не можуть бути використані при аналізі, і проектуванні нових гідроциклонів. Тому метою цієї роботи є визначення аналітичної залежності, що зв'язує розрахунок продуктивності гідроциклону з його коефіцієнтом опору.

З урахуванням однакового принципу дії гідроциклонів і подоби їх конструкції, проведений розрахунок коефіцієнтів опору в циліндричній і конічних частинах гідроциклону. При цьому враховували моменти руху рідини і витрати, побудували графіки залежностей. З них видно, що із збільшенням проходження суспензії через піскову насадку коефіцієнт опору по лінії зливу зростає, а по лінії пісків падає. Загальний коефіцієнт опору падає при зростанні витрат через гідроциклон. При невеликих витратах через гідроциклон коефіцієнт опору залишається практично постійним.

З розрахованих залежностей випливає, що коефіцієнт опору гідроциклону визначається його геометричним комплексом. Таким чином, це дозволить визначити опір знову спроектованих гідроциклонів різних конструктивних форм і виконати розрахунковий аналіз по виявленню розмірів гідроциклонів, що забезпечують їх мінімальний опір.



## ПЕРЕЛІК ДЖЕРЕЛ ПОСИЛАНЬ

1. Струнский, Б.М. Руднотермические плавильные печи [Текст] / Б.М. Струнский. - М.: Metallurgiya, 1978. – 368 с.
2. Алиев, Г.М. Техника пылеулавливания и очистки промышленных газов: Справочник [Текст] / Г.М. Алиев. – М.: Metallurgiya, 1986. – 543 с.
3. Гордон, Г.М. Пылеулавливание и очистка газов в цветной металлургии [Текст] / Г.М. Гордон. - М.: Metallurgiya, 1977. – 457 с.
4. Старк, С.Б. Газоочистные аппараты и установки в металлургическом производстве [Текст] / С.Б. Старк. - М.: Metallurgiya, 1990. – 400 с.
5. Guerra, F. Primeira abordagem a utilização de modelos reduzidos para a determinação experimental do campo térmico de transformadores arrefecidos por convecção natural [Text] / Franklin Guerra, Isaac Moreira // Electricidade.- 1987.- № 233.- P. 141-145.
6. Pivnek, M. Vyzkum tepelnych zavislosti na modelech vinuti transformatoru [Text] / M. Pivnek, K. Havlicek // Electrotechn. obz. — 1974. — №4. — pp. 175-181.
7. Die Darstellung des Wärmeübergangskoeffizienten im Transformator mit Kriteriellen Potenzfunktion [Text] / H. Lobenstein // Elektr. — 1979. — №4. — pp. 218-220.
8. Русанов, А.А. Справочник по пыли – и золоулавливанию [Текст] / А.А. Русанов. – М.: Энергия, 1975. – 296 с.
9. Гордон, Г.М. Контроль пылеулавливающих установок [Текст] / Г.М. Гордон. - М.: Metallurgiya, 1973. – 384 с.
10. Муравьев, С.И. Руководство по контролю вредных веществ в воздухе рабочей зоны [Текст] / С.И. Муравьев. – М.: Химия, 1991. – 368 с.
11. Пейсахов, И.Л. Пылеулавливание и очистка газов [Текст] / И.Л. Пейсахов. - М.: Metallurgiya, 1978. – 292 с.

12. Ужов, В.Н. Очистка промышленных газов от пыли [Текст] / В.Н. Ужов. – М.: Химия, 1983. – 392 с.
13. Гордон, Г.М. Сборник научных трудов по пылеулавливаю и очистке газов в цветной металлургии №24 [Текст] / Г.М. Гордон. - М.: Металлургия, 1985. – 137 с.
14. Сборник материалов по пылеулавливаю в цветной металлургии [Текст]. – М.: Металлургия, 1987. – 472 с.
15. Научные труды государственного научно-исследовательского института цветных металлов №36 под ред. Гордона Г.М [Текст]. - М.: Металлургия, 1987. – 179 с.
16. Коузов, П.А. Методы определения физико-химических свойств промышленных газов [Текст] / П.А. Коузов. - М.: Химия, 1983. – 143 с.
17. Страус, В.М. Промышленная очистка газов [Текст] / В.М. Страус. - М.: Химия, 1981. – 615 с.
18. Алиев, Г.М. Устройство и обслуживание газоочистных и пылеулавливающих установок [Текст] / Г.М. Алиев. - М.: Металлургия, 1989. – 279 с.
19. Юдашкин, М.Я. Механическое оборудование установок очистки газов [Текст] / М.Я. Юдашкин. - М.: Металлургия, 1988. – 375 с.
20. Мягков, Б.И. Очистка промышленных газов фильтрацией [Текст] / Б.И. Мягков. - М.: Химия, 1984. – 320 с.
21. Газоочистные аппараты сухого и мокрого типов. Каталог [Текст]. - М.: Цинтихимнефтемаш, 1984. – 95 с.
22. Каплан, В.Г. Промышленная и санитарная очистка газов [Текст] / В.Г. Каплан. - М.: Металлургия, 1982. – 171 с.
23. Моргулис, М.Л. Рукавные фильтры [Текст] / М.Л. Моргулис. – М.: Машиностроение, 1989. – 256 с.
24. Андоньев, С.М. Пылегазовые выбросы в цветной металлургии [Текст] / С.М. Андоньев. - М.: Металлургия, 1989. – 192 с.

25. Алексеенко, Б.А. Оборудование и эксплуатация пылеулавливающих установок [Текст] / Б.А. Алексеенко. - М.: Metallurgy, 1990. – 79 с.
26. Горячев, И.К. Фильтры рукавные – современные тенденции и новые области применения [Текст] / И.Г. Горячев. - М.: Цинтихимнефтемаш, 1991. – 45 с.
27. Пирумов, А.И. Обеспыливание газов [Текст] / А.И. Пирумов. - М.: Стройиздат, 1987. – 158 с.
28. Гурвица, А.А. Пылеулавливание в металлургии [Текст] / А.А. Гурвица. - М.: Metallurgy, 1988. – 335 с.
29. Розенгарт, Ю.А. Теплоэнергетика металлургических заводов [Текст] / Ю.А. Розенгарт. - М.: Metallurgy, 1985. – 305 с.
30. Кропп, Л.И. Очистка технологических и неорганизованных выбросов от пыли в металлургии [Текст] / Л.И. Кропп. - М.: Metallurgy, 1989. – 279 с.
31. Шаприцкий, В.И. Защита атмосферы в металлургии [Текст] / В.И. Шаприцкий. - М.: Metallurgy, 1987. – 285 с.
32. Преображенский, В.П. Теплотехнические измерения и приборы [Текст] / В.П. Преображенский. – М.: Энергия, 1978. – 704 с.
33. Каненко, Г.М. Исследования некоторых работы труб Вентурри по высокоэффективной очистке газов [Текст] / Г.М. Каненко. - М.: Химия, 1974. – 48 с.
34. Кузнецов, И.Е. Защита атмосферного воздуха от загрязнений [Текст] / И.Е. Кузнецов. – М.: Высшая школа, 1991. – 198 с.
35. Пейсахов, И.Л. Атлас диаграмм и номограмм по пылегазовой технике [Текст] / И.Л. Пейсахов. - М.: Metallurgy, 1981. – 185 с.
36. Вальдберг, А.Ю. Подготовка промышленных газов к очистке [Текст] / А.Ю. Вальдберг. - М.: Химия, 1983. – 216 с.
37. Справочник химика [Текст]. - М.: Химия, 1989. – 438 с.

38. Андреев, П.И. Рассеяние в воздухе газов, выбрасываемых промышленными предприятиями [Текст] / П.И. Андреев. - М.: Стройиздат, 1972. – 165 с.
39. Болдырев, Т.Е. Очистка промышленных выбросов в атмосферу [Текст] / Т.Е. Болдырев. - М.: Metallurgy, 1985. – 385 с.
40. Аникеев, В.А. Технологические аспекты охраны окружающей среды [Текст] / В.А. Аникеев. - М.: Химия, 1987. – 256 с.
41. Рыбинский, А.Г. Современное аппаратное оформление процессов очистки и охлаждения газов [Текст] / А.Г. Рыбинский. - М.: Энергия, 1995. – 287 с.
42. Белоусов, В.В. Теоретические основы процессов газоочистки [Текст] / В.В. Белоусов. - М.: Metallurgy, 1989. – 255 с.
43. Богатых, С.А. Циклонно-пенные аппараты [Текст] / С.А. Богатых. - М.: Metallurgy, 1985. – 245 с.
44. Денисов, С.И. Улавливание и утилизация пылей и газов [Текст] / С.И. Денисов. - М.: Metallurgy, 1987. – 357 с.
45. Кузнецов, И.Е. Оборудование для санитарной очистки газов [Текст] / И.Е. Кузнецов. - М.: Химия, 1988. – 352 с.
46. Алабовский, А.Н. Газоснабжение и очистка промышленных газов [Текст] / А.Н. Алабовский. - М.: Metallurgy, 1984. – 387 с.