

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
ЗАПОРІЗЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ
ІНЖЕНЕРНИЙ НАВЧАЛЬНО-НАУКОВИЙ ІНСТИТУТ
ім. Ю.М.ПОТЕБНІ
КАФЕДРА ЕЛЕКТРИЧНОЇ ІНЖЕНЕРІЇ ТА КІБЕРФІЗИЧНИХ СИСТЕМ

Кваліфікаційна робота

другий магістерський

(рівень вищої освіти)

на тему «Дослідження технології знезараження стічних вод з використанням
роторних кавітаторів»

Виконав: студент 2 курсу, групи 8.1452

Каплун Ростислав Дмитрович

спеціальності гідроенергетика

освітньої програми гідроенергетика

Керівник к.т.н., доц. Осаул О.І.

Рецензент к.т.н., доц. Карпенко Г.В.

Запоріжжя

2023

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
ЗАПОРІЗЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ

Кафедра електричної інженерії та кіберфізичних систем

Рівень вищої освіти другий магістерський

Спеціальність 145 Гідроенергетика

Освітня програма Гідроенергетика
(код та назва)

Спеціалізація _____
(код та назва)

ЗАТВЕРДЖУЮ

Завідувач кафедри 

« _____ » _____ 2023 року

З А В Д А Н Н Я
НА КВАЛІФІКАЦІЙНУ РОБОТУ СТУДЕНТОВІ

(прізвище, ім'я, по батькові)







Тема роботи (проекту) «Дослідження технології знезараження стічних вод з використанням роторних кавітаторів»

керівник роботи Осаул Олександр Іванович, к.т.н., доц.
(прізвище, ім'я, по батькові, науковий ступінь, вчене звання)

затверджені наказом ЗНУ від «01» травня 2021 року № 639-с

- 1 Строк подання студентом роботи: 01 грудня 2023 р.
- 2 Вихідні дані до роботи: Параметри водного середовища. Параметри кавітатора. Необхідні значення ККД.
- 3 Зміст розрахунково-пояснювальної записки (перелік питань, які потрібно розробити): Вимоги до якості води. Аналіз існуючих методів очищення стічних вод від органічних сполук. Акустична кавітація як метод очищення стічних вод. Особливості процесу кавітації. Аналіз сучасних методів розрахунків параметрів кавітаторів. Розробка методу математичного моделювання опору кавітатора. Аналіз впливу конструктивних і режимних параметрів на коефіцієнт опору кавітатору
- 4 Перелік графічного матеріалу (з точним зазначенням обов'язкових креслень): Наближена схема механізму кавітації


5 Консультанти розділів роботи

Розділ	Прізвище, ініціали та посада консультанта	Підпис, дата	
		завдання видав	завдання прийняв
1	Осаул О.І.		
2	Осаул О.І.		
3	Осаул О.І.		

6 Дата видачі завдання 01 червня 2023 р

КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

№ з/п	Назва етапів кваліфікаційної роботи	Строк виконання етапів роботи	Примітка
1	Аналіз існуючих методів очищення стічних вод від органічних сполук		
2	Акустична кавітація як метод очищення стічних вод		
3	Аналіз сучасних методів розрахунків параметрів кавітаторів		
4	Охорона праці та технологічна безпека		
5	Оформлення кваліфікаційної роботи згідно нормативним вимогам		

Студент 
(підпис)Каплун Р.Д.
(ініціали та прізвище)Керівник роботи (проекту) 
(підпис)Осаул О.І.
(ініціали та прізвище)**Нормоконтроль пройдено**Нормоконтролер 

Осаул О.І.

АНОТАЦІЯ

Каплун Р.Д. Дослідження технології знезараження стічних вод з використанням роторних кавітаторів

Кваліфікаційна випускна робота для здобуття ступеня вищої освіти магістра за спеціальністю 145 – Гідроенергетика, науковий керівник Осаул О.І.. Запорізький національний університет. Кафедра електричної інженерії та кіберфізичних систем, 2023.

В магістерській роботі вирішено актуальну науково - технічну задачу по очищенню стічних вод роторним кавітатором. Наведено результати досліджень, спрямованих на встановлення ефективного методу очищення водних середовищ. Досліджено вплив кавітаційного оброблення на очищення водних середовищ. Зокрема, встановлено вплив температурного режиму та тривалості оброблення на перебіг процесу кавітаційної деструкції ароматичних сполук у водних середовищах.

Ключові слова: КАВІТАЦІЯ, ОЧИЩЕННЯ СТІЧНИХ ВОД, ДЕСТРУКЦІЯ, ВОДНІ СЕРЕДОВИЩА

ANNOTATION

Kaplun R.D. Research on the technology of wastewater disinfection using rotary cavitators.

Qualifying graduation thesis for obtaining a master's degree of higher education in specialty 145 - Hydropower, scientific supervisor Osaul O.I.. Zaporizhzhia National University. Department of Electrical Engineering and Cyberphysical Systems, 2023.

In the master's thesis, the actual scientific and technical problem of wastewater treatment with a rotary cavitator was solved. The results of research aimed at establishing an effective method of cleaning water environments are presented. The effect of cavitation treatment on the purification of water environments was studied.

In particular, the influence of the temperature regime and duration of treatment on the course of the process of cavitation destruction of aromatic compounds in aqueous media was determined.

Keywords: CAVITATION, WASTEWATER TREATMENT, DESTRUCTION, AQUATIC ENVIRONMENTS

ЗМІСТ

ВСТУП

1 ЗАГАЛЬНА ХАРАКТЕРИСТИКА СТІЧНИХ ВОД

1.1 Вимоги до якості води

1.2 Аналіз існуючих методів очищення стічних вод від органічних сполук

1.3 Акустична кавітація як метод очищення стічних вод

2 ДОСЛІДЖЕННЯ ТЕХНОЛОГІЇ ЗНЕЗАРАЖЕННЯ СТІЧНИХ ВОД З ВИКОРИСТАННЯМ РОТОРНИХ КАВІТАТОРІВ

2.1 Особливості процесу кавітації

2.2 Аналіз сучасних методів розрахунків параметрів кавітаторів

2.3 Розробка методу математичного моделювання опору кавітатора

2.4 Аналіз впливу конструктивних і режимних параметрів на коефіцієнт опору кавітатору

3 ОХОРОНА ПРАЦІ ТА ТЕХНОЛОГІЧНА БЕЗПЕКА

3.1 Аналіз шкідливих та небезпечних факторів в лабораторії

3.2 Заходи з усунення шкідливих та небезпечних факторів

3.3 Виробнича санітарія

3.4 Пожежна безпека в лабораторії

3.5 Дослідження ефективності та якості освітлення

3.6 Контроль та догляд за освітлювальними установками

3.7 Характеристика електромагнітного випромінювання оптичного діапазону

ВИСНОВОК

ПЕРЕЛІК ДЖЕРЕЛ ПОСИЛАНЬ

ВСТУП

Актуальність теми. Стічні води і рідкофазні відходи, які утворюються на підприємствах хімічної, нафто- і коксохімічної промисловості, як правило, забруднені компонентами реакційних середовищ. Склад таких вод і відходів визначається фізико-хімічною сутністю технологічних процесів, в яких вони утворюються. Наявність у стічних водах сполук ароматичного ряду, які зазвичай погано піддаються біодеградації, зумовлює низьку ефективність традиційного біологічного очищення стічних вод. Скидання у природні водойми недостатньо очищених стічних вод призводить до накопичення шкідливих органічних сполук, що негативно впливає на природні екосистеми, зумовлює необхідність здійснення складніших технологічних процесів очищення вод для їх використання як господарсько-побутових та у різноманітних виробництвах.

Аналіз джерел інформації та пошукові дослідження, виконані нами, дають підстави вважати, що значний практичний інтерес для очищення стічних вод від ароматичних сполук становить застосування кавітаційних методів. Вони дають змогу вносити в середовище, яке очищують, енергію у так званому концентрованому вигляді, тобто передбачають внесення значних кількостей енергії у локальні області цього середовища. Внаслідок збудження кавітації та перебігу супутніх їй явищ цього відбуваються зміни фізико-хімічних властивостей компонентів рідиннофазного середовища та, як наслідок, їхні хімічні перетворення.

Зв'язок роботи з науковими програмами, планами. Робота виконана відповідно до визначених законодавством України пріоритетних напрямків розвитку науки і техніки, зокрема програмою «Нові технології та ресурсозберігаючі технології в енергетиці, промисловості та аграрному комплексі» затвердженою Законом України «Про пріоритетні напрями розвитку науки і техніки» №2623-III від 11 липня 2001 року.

Метою дипломної роботи є дослідження ефективності очистки стічних вод роторним кавітатором.

Об'єктом дослідження є роторний кавітатор.

Предметом дослідження є процеси руху рідини в роторному кавітаторі.

Практична цінність роботи полягає у розробленні гнучкої, ефективної та енергоощадної технології кавітаційного очищення стічних вод .

Методи дослідження. Розрахунок виконується методом послідовного проведення розрахункових операцій з поясненням дій.

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

Структура та обсяг роботи. Магістерська робота включає в себе вступ, три розділи, висновки та перелік джерел посилань з 56 позиції. Загальний обсяг складає 67 сторінки, у тому числі 4 ілюстрацію та 1 таблицю.

1 ЗАГАЛЬНА ХАРАКТЕРИСТИКА СТІЧНИХ ВОД

З розвитком промисловості все частіше постає питання про очищення промислових стічних вод та утилізації відходів. Промислові стічні води, як правило, забруднені компонентами реакційних середовищ, а їх склад залежить від галузі промисловості, в якій вони утворюються. Забруднення природних вод відбувається внаслідок надходження у водойми зі стічними водами шкідливих домішок неорганічної (кислоти, мінеральні солі, луги тощо) й органічної (нафта й нафтопродукти, поверхнево-активні речовини, мийні засоби, пестициди тощо) природи [1]. Крім того, стічні води, що містять розчинні органічні речовини (зокрема, ароматичні) або суспензії органічного походження, сприяють зниженню вмісту кисню у природних водоймах, спричиняючи дефіцит кисню та евтрофікацію. Органічні суспензії замулюють водойми і затримують або повністю припиняють життєдіяльність мікроорганізмів, що беруть участь у самоочищенні [2, 3].

Кількість хімічних забруднювачів води постійно зростає і досягає зараз близько тисячі різновидів. Шкідлива дія багатьох з них має пролонгований вплив, тобто їхня дія виявляється в наступних поколіннях живих істот і полягає в появі шкідливих мутацій, генетичних розладах тощо. Крім хімічного відбувається ще і фізичне забруднення води, пов'язане із зміною її органолептичних властивостей [4-6].

Промислові стічні води без попереднього очищення негативно впливають на очисні споруди, які втрачають свою ефективність щодо біологічного очищення вод. Тому виникає потреба попередньої обробки стічних вод. Проблема загострюється і через те, що в існуючих технологіях водопідготовки широко застосовують хлору, що призводить до утворення в воді значної кількості високо токсичних хлорорганічних сполук, які мають кумулятивну і канцерогенну дію. Зараз одним з найперспективніших є очищення стічних вод з допомогою натрію гіпохлориту [5-8].

Однак застосування реагентних методів не забезпечує, як правило,

належного очищення стічних вод і супроводжується утворенням побічних продуктів. У зв'язку з цим виникає потреба в застосуванні специфічних методів очищення стічних вод, які б дали змогу не тільки ефективно очищувати стічні води, але й відрізнялись високими технологічністю та низькими енерговитратами. Одним з основних напрямків науково-технічного прогресу, зокрема стосовно очищення стічних вод, є створення маловідходних і безвідходних технологічних процесів [9, 10].

Відповідно до чинних нормативних документів [12] щодо вимог до складу та властивостей стічних вод, які скидаються до систем централізованого водовідведення, не повинні: містити речовин, що перешкоджають біологічному очищенню стічних вод, токсичних забруднень; мати температуру вище 40 °С; мати хімічне споживання кисню (далі - ХСК) вище біохімічного споживання кисню за 5 діб (далі - БСК5) більше, ніж у 2,5 раз. Температура стічної води після часткової десорбції з неї органічних сполук не перевищує 50 °С. Разом з іншими стічними водами її подають у типові біологічні очисні споруди.

Стічні води нафтохімічних виробництв містять значну кількість органічних домішок (нафта і нафтопродукти, ароматичні вуглеводні, феноли тощо). Вони характеризуються підвищеним хімічним споживанням кисню (ХСК), токсичністю внаслідок наявності ПАР і органічних сполук [13-15]. Зокрема це стосується бензену і толуену як представників гомологічного ряду ароматичних вуглеводнів, що містяться у стічних водах нафтохімічних та хімічних виробництв. Бензен використовують для одержання барвників та лікарських засобів, синтетичного волокна, фенолу, нітробензену тощо. Найпростішим гомологом бензену є толуен, який використовують для виробництва барвників, вибухових речовин, сахарину тощо. Його розчинність у воді 1,79 г/дм (за 25 °С) [16]. Бензен дуже погано піддається анаеробній біодеградації [47].

Тому перед скиданням таких вод на загальні очисні споруди потрібно їх попереднє очищення на локальних установках [13,18-49]. Скидання цих вод у природні водойми без попереднього очищення є основною причиною

забруднення водойм, що призводить до різкого погіршення їх гідрохімічного режиму, а отже, і умов життєдіяльності водних організмів (гідробіонтів). Останнє спричиняє погіршення процесу самоочищення водойм. Погіршення якості води ускладнює її використання і різко підвищує вартість її підготовки для побутових і виробничих потреб. Крім того, зі стічними водами втрачаються цінні речовини, утилізація яких дала б значну економічну вигоду [20].

У зв'язку з тим, що воду все більше залучають у сферу виробництва, необхідне розроблення комплексу організаційних та інженерно-технічних заходів із захисту природних водойм від забруднення і виснаження, використання нових методів очищення стічних вод і застосування заощадливих маловідходних виробництв товарів і продукції [21]. Відповідно до вимог нормативних документів [22] стічні води, які скидають до систем централізованого водовідведення не повинні містити: горючі домішки, здатні утворювати вибухонебезпечні суміші; речовини, які не піддаються біологічній деструкції; мають температуру вище 40 °С; мають ХСК вище БСК5 більше ніж у 2,5 раза; мають БСК, яке перевищує вказане в проекті КОС м. Калуш тощо. Для досягнення вказаних вимог необхідне спорудження локальних очисних споруд (ЛОС) на підприємстві. Окрім того, на зазначеному підприємстві здійснюють технологічні процеси, які входять до «Переліку виробничих процесів, під час здійснення яких споживач повинен мати локальні очисні споруди для попереднього очищення стічних вод перед їх скиданням до системи централізованого водовідведення та очищення стічних вод» [22]; зокрема: п. 1. «Нафтопереробка, хімічний та органічний синтез, фармацевтичне виробництво»; п.11. «Виробничі процеси, під час яких використовуються або утворюються такі речовини: нафтопродукти, ароматичні вуглеводні, летючі органічні сполуки (толуен, бензен тощо)».

Через це виникає потреба очищення промислових стоків у ЛОС ефективними методами, що будуть задовольняти екологічним, економічним вимогам та буде відповідати вимогам до якості технічної води.

1.1 Вимоги до якості води

Необхідний ступінь очищення стічних вод перед їх скиданням у водойми визначають за загальносанітарними, органолептичними і санітарно-токсикологічними показниками шкідливості. До цих показників належать допустима максимальна величина БСК, кількість розчинного кисню, активна реакція середовища рН, температура стічних вод, колір і запах, завислі домішки і допустимий вміст шкідливих речовин у воді водойми.

До загальносанітарних показників шкідливості належать БСК₂₀, розчинний кисень, активна реакція середовища рН. До органолептичних показників належать температура водойми, колір, запах тощо. До санітарно-токсикологічних показників належать показники забруднення стічних вод, які можуть бути небезпечними для здоров'я населення. Під час використання в ролі нормативів, встановлених для забруднюючих речовин, гранично допустимих концентрацій тощо враховують «Правила про порядок застосування гранично допустимих концентрацій при сумісному надходженні в водойму кількох шкідливих речовин, що характеризуються однаковими показниками шкідливості» [22].

1.2 Аналіз існуючих методів очищення стічних вод від органічних сполук

Для очищення стічних вод промислових підприємств застосовують такі методи:

- механічні (проціджування, відстоювання, центрифугування, фільтрування);
- хімічні методи (нейтралізація, коагуляція, флокуляція);
- фізико-хімічні методи (флотація, сорбція, екстракція, евапорація);
- електрохімічні методи (електрокоагуляція, електрофлотація);
- комбіновані методи.

Технологія очищення у значній мірі залежить від складу промислових стічних вод. Очищення від органічних домішок здійснюють регенеративними (екстракція, ректифікація, адсорбція, іонна флоатація, іонний обмін) та деструктивними методами (біологічне очищення, адсорбція, рідкофазне та паро-фазне окиснення, озонування, хлорування тощо) [31-37]. Основним фактором під час вибору методу оброблення води є фазовий стан речовини [38].

Вибір методу очищення води, типи і розміри очисних споруд залежать від складу, властивостей і витрати промислових стічних вод, площі території підприємства та інших факторів, а також вимог до якості очищеної води [39].

Перспективним методом очищення стоків від органічних домішок є адсорбція активованим вугіллям з попереднім хлоруванням. Сорбційна установка складається, як правило, з декількох паралельно з'єднаних секцій, у кожену з яких входить кілька послідовно з'єднаних фільтрів. Конструкція вугільних апаратів зазвичай така ж, як і освітлювальних фільтрах з водяною промивкою [40].

Останні використовують для видалення з води розчинних органічних речовин, зокрема, хлорпохідних, наприклад, хлораміни. Тому амонійний Нітроген попередньо перед сорбцією окиснюють гіпохлоритом натрію або хлором [61-63].

Сорбційні методи очищення з використанням мікропористих сорбентів забезпечують кінцевий вміст шкідливих речовин в стоках на рівні ГДК. Ефективність адсорбційного очищення досягає 90-99%.

Активовані вугілля, які використовують для очищення природних і стічних вод, повинні бути великопористими, щоб їх поверхня була доступна для складних молекул; мати невелику утримуючу здатність для регенерації адсорбованих компонентів; добре змочуватися і погано стиратися; мати певний гранулометричний склад, а також мати мінімальну каталітичну активність щодо різних реакцій; витримувати відносно велику кількість регенерацій [64-67].

Використання іонітів для очищення стічних вод від органічних домішок можливе лише у разі відсутності в стічній воді катіонів жорсткості і Феруму.

Тому перша стадія процесу - іоннообмінне зм'якшення води на №- або Н-катіонітовому фільтрі. Іоннообмінне вилучення аніонів органічних кислот зі стічних вод ефективно за низького вмісту в воді сульфатів і багатовалентних аніонів [68-70]. Для поглинання органічних сполук застосовують сильно кислотні катіоніти, наприклад катіоніт КУ-2 в Н-формі. Регенерацію катіоніту здійснюють 5% розчином аміаку в суміші води (20 %) і метилового або етилового спирту (80 %). Після аміачної регенерації катіоніту 10 % хлоридною кислотою переводять в робочу Н-форму. Підігрів розчину до 35-40 °С значно прискорює процес регенерації [71, 72].

Стічні води багатьох виробництв містять у невеликих концентраціях леткі органічні сполуки, часто - високотоксичні. Під час продування газів через такі стічні води, пари летких компонентів розчину переходять у газову фазу і видаляються з розчину. Відхідні гази, що містять токсичні пари, нейтралізують хімічними, каталітичними або адсорбційними методами. Віддувають леткі сполуки з стічних вод повітрям або інертними газами [73]. Видалення летких речовин зі стічних вод без аерації відбувається повільно, ступінь очищення не перевищує 50...60 %. Одним з основних недоліків цього методу є неминуче забруднення атмосфери [73].

Метод екстракції використовують для очищення стічних вод від шкідливих органічних забруднювачів (наприклад, ароматичних, фенолів, органічних кислот). Екстракція ґрунтується на розподіленні суміші речовин на складові частини за допомогою розчинника, в якому вони мають різну розчинність [71, 74]. Цей метод доцільно застосовувати, коли вартість вилученого компонента є вищою за витрати на очищення, або якщо інші методи є непридатними [75, 76].

До переваг процесів екстракції належать дуже висока швидкість процесу, можливість застосування за великих вихідних концентрацій компонента, який вилучають. Обмежує використання цього методу висока вартість екстрагентів [72].

Очищення промислових стічних вод методом флотації є одним з

найбільш перспективних методів видалення нерозчинних і разом з ними летких домішок. Внаслідок утворення агломератів домішок з бульбашками тонкодиспергованого у воді повітря вони виносяться до поверхні розчину. Для підвищення ефективності флотаційного очищення передбачають використання біофлокулянтів, коагулянтів або флотореагентів-збирачів [75-80].

Під час флотаційного виділення сланцевих смол вміст ароматики і фенолів у стічній воді знижується у середньому на 40 %. Продуктивність напірних флотаційних установок сягає 1000-2000 м³/год. Незначний час перебування стічних вод в апаратах зумовлює незначні експлуатаційні витрати [71, 72].

Поряд з певними перевагами регенеративним методам очищення стічних вод від органічних сполук, зокрема ароматичних, притаманна низка недоліків. Це зумовлено тим, що, по-перше, органічні домішки складаються зі сполук різних класів. Регенеративні методи здебільшого характеризуються низькою селективністю, тому після регенерації утворюється суміш органічних сполук, перероблення яких потребує організації додаткових технологічних операцій. Подруге, під час здійснення регенеративних методів частина малорозчинних у воді чи летких органічних сполук десорбує, що зумовлює необхідність організації очищення газових викидів. Тому регенеративні методи потребують додаткових витрат на спорудження та експлуатацію ділянок розділення органічних сполук або очищення газових викидів.

Електрохімічні методи дають змогу вилучати зі стічних вод цінні компоненти за відносно простої технологічної схеми очищення без використання хімічних реагентів у періодичному або безперервному режимах [81]. Електрохімічне очищення полягає в частковому або повному розкладанні забруднюючих речовин, зокрема, їх окисненні до CO₂. Органічні забруднювачі під час електрохімічного окиснення або безпосередньо окиснюються на аноді або побічно окиснюється анодно утвореними окисниками, такими як Cl₂ або №C1O, O₃, гідроксил-радикали і H₂O₂. Для прямого анодного окиснення високого значення окисного потенціалу не потрібно. Забрудники спочатку

сорбуються на поверхні аноду і потім руйнуються за механізмом електротранспортних реакцій [82-84].

Встановлено позитивний вплив ультразвуку на електрохімічне оброблення промислових стічних вод [80, 85]. Створення умов для перебігу звукохімічної реакції під час процесу оброблення стоків забезпечує анігіляцію забруднень напряму внаслідок їх термічного розпаду або збільшує вихід гідроксильних радикалів у процесах окислення [86].

Для очищення промислових стічних вод від нафтопродуктів, масел, жирів, полімерів, емульгованих домішок застосовують електрокоагуляційним методом. Його доцільно використовувати в автономних умовах та на виробництвах невеликої потужності, де утворюються невеликі об'єми стічних вод [71]. Основний недолік цих методів - велика витрата електроенергії.

Багато органічних речовин з водою утворюють сумісно киплячі або азеотропні суміші, температура кипіння яких нижче температури кипіння води, що робить можливим використання методу відгонки азеотропних сумішей для очищення стічних вод за відносно невеликих витрат енергії [73]. Умови застосування азеотропної відгонки: значна різниця температур кипіння азеотропної суміші і води, високий вміст органічного компонента в суміші, що значно перевищує розчинність цього органічного компонента у воді. Як правило, азеотропну відгонку використовують для локального очищення промислових стічних вод, якщо вартість продукту, який відігнали, не є меншою вартості відгонки. Описаний метод випробувано для відгонки зі стічних вод дихлоретану, складних ефірів, фенолів, акрилонітрилу, бутилацетату, діізопропілового ефіру, хлорбензену, аліфатичних і ароматичних амінів [71].

Пароциркуляційний метод отримав розповсюдження для очищення стічних вод коксохімічних заводів, заводів термічного перероблення твердих палив, виробництв синтетичних фенолів [73].

Мембранний метод очищення стічних вод ґрунтується на властивостях пористих тіл пропускати переважно лише одні речовини. Способи мембранного поділу, які використовують у технології очищення води, умовно діляться на

діаліз, електродіаліз, мікрофільтрацію, ультрафільтрацію, зворотний осмос.

У технології очищення стічних вод від розчинених і тонкодиспергованих домішок найчастіше використовують зворотний осмос, ультрафільтрації та електродіалізу. Зворотний осмос застосовують для знесолення води у системах водопідготовки, системах локального оброблення стічних вод за невеликих їх витрат для концентрування і виділення щодо цінних компонентів, а також для очищення природних і стічних вод. В основі цих способів лежить явище осмосу - переходу розчинника у розчин через мембрану під дією прикладеного тиску.

Метод очищення стічних вод активним мулом - поширений метод очищення стічних вод від шкідливих речовин, який реалізують в аеротенках, де очищення стічних вод відбувається за допомогою вільно плаваючого активного мулу - біоценозу мікроорганізмів, головну роль в якому відіграють бактерії. Здатність мулу до пластівцеутворення залежить від виду бактерій, їх віку, складу середовища, температури, рН та інших чинників [71].

У процесі біологічного очищення стічних вод бактерії активного мулу використовують органічні речовини для отримання енергії і синтезу бактеріальної маси власних клітин. Прийнято вважати, що біологічне очищення стічних вод активним мулом відбувається у дві фази. У першій фазі (біосорбції) забруднювачі стічних вод агломеруються та сорбуються активним мулом із більшою швидкістю, ніж їх окиснення. З часом швидкості сорбції і окиснення вирівнюються, вміст сорбованих активним мулом забруднювачів досягає максимальних величин; стічна вода очищується від більшості забруднень. На другій фазі (регенерації) швидкість окиснення перевищує швидкість сорбції, закінчується внутрішньо-клітинне ферментативне окиснення органічних забруднень і відновлення здатності мулу до вилучення й окиснення органічних забруднень стічних вод.

Основним способом збільшення окиснювальної потужності аеротенків є збільшення концентрації мулу в аеротенку, що потребує забезпечення процесу киснем, та розділення мулової суміші у вторинних відстійниках [87].

У разі очищення стічних вод озоном, який є алотропною модифікацією кисню, і який належить до сильних окисників. Його застосовують у газоподібному вигляді. За температури 0 °С і тиску 0,1 МПа розчинність озону у воді складає 0,68 г/дм³. Молекула озону O₃ дуже нестійка й легко дисоціює на атом Оксигену та молекулу кисню. Швидкість дисоціації озону зростає зі збільшенням значення рН, температури й ступеня мінералізації води.

Основними причинами, що стримують і ускладнюють широке застосування озону для очищення стічних вод, є відносно висока його собівартість, яка визначається невисокою якістю озонаторних установок і малим ступенем використання озону (50-70 %) в існуючих конструкціях змішувачів.

Вдосконалення процесів очищення стічних вод із застосуванням озону досягається створенням високопродуктивних і економічних генераторів озону, що працюють на підвищених частотах, та інтенсифікація масообміну контактуючих фаз, застосуванням каталізаторів, фотохімічного чи радіохімічного впливу, поєднання озонування з ультрафіолетовим опроміненням тощо [88]. Застосування озону для знезараження води також пов'язано зі значними витратами електроенергії, необхідної для його одержання [89].

Серед хімічних методів знезараження стічних вод найпоширенішою зараз є технологія хлорування. Широке впровадження цієї технології обумовлено, насамперед, її відносною простотою і невеликими експлуатаційними витратами [85]. Для знезараження стічних вод використовують як газоподібний хлор Cl₂, так і натрію гіпохлорит NaClO або хлору(IV) оксид ClO₂. Широке використання газоподібного хлору та натрію гіпохлориту обумовлено їх доступністю і невеликою ціною. Оброблення стічних вод хлором або натрію гіпохлоритом забезпечує високу економічну ефективність процесу. Однак збільшення забрудненості води органічними сполуками і завислими речовинами істотно послаблює дію хлору та його похідних, що призводить до необхідності значного (у декілька разів)

підвищення доз реагенту. Крім того, цей метод вимагає впровадження додаткових заходів безпеки, що призводить до зростання собівартості процесу [88, 90].

Поширеним методом хлорування є очищення стічних вод хлорним вапном за вмісту активного хлору 32-35 % [89].

У наш час очищення стічних вод електролітичним гіпохлоритом натрію застосовують для оброблення невеликих об'ємів стічних вод (до 1000 м³/добу) на станціях, віддалених від місць виробництва хлору. Електрохімічний спосіб отримання NaClO ґрунтується на взаємодії хлору з NaOH , які утворюються у бездіафрагмовому електролізері під час електролізу розчину натрію хлориду. Поряд із бактерицидною активністю розчини електролітичного натрію гіпохлориту стійкіші від розчинів інших гіпохлоритів, у тому числі й хлорного вапна. Водні розчини NaClO не містять зависів і не потребують освітлення.

Оброблення біологічно очищених стічних вод можна здійснювати також і методом їх прямого електролізу. Під дією постійного електричного струму із хлоридів, які знаходяться у стічних водах, утворюється активний Хлор [89].

Автори роботи [91] вивчали знешкодження стічних вод за розчинами NaClO із застосуванням ультразвукового випромінювання. Наявність розчинених органічних речовин, а також їх високі концентрації у стічних водах знижують ефективність очистки методом хлорування. Ультразвук покращує диспергування у водних стоках хлорвмісних препаратів, зокрема натрію гіпохлориту, що сприяє пришвидшенню хімічних та біологічних процесів очищення.

Кожен з вище перелічених методів має ряд певних недоліків: потреба у використанні дорогих або дефіцитних хімічних реактивів, висока тривалість процесу, недостатня ефективність, висока енергоємність, низька продуктивність процесів, вони екологічно небезпечні. Тому існує необхідність інтенсифікації очищення стоків промислових підприємств.

Відомо, що швидкість реакції між гіпохлоритом і органічними стоками займає багато часу. Збільшення швидкості реакції між натрію

гіпохлоритом з органічними компонентами можна досягнути традиційним способом - збільшенням температури процесу. Однак з урахуванням значних обсягів стічних вод, як органічних, так і гіпохлоритів, й відповідно великих енерговитрат, необхідних для інтенсифікації процесу, цей спосіб на теперішній час є неприйнятним. Тому одним із способів інтенсифікації, передусім, розкладу гіпохлорит-іонів з виділенням атомарного Оксигену, а відтак і взаємодії натрію гіпохлориту з органічними компонентами, як було показано раніше виконаними дослідженнями, є кавітаційне оброблення реакційного середовища [92].

Великий інтерес викликає яким буде вплив ультразвуку на реакцію між NaClO і стічними водами, що містять органічні речовини аренового ряду. У роботі [89] відмічено, що ультразвук покращує диспергування у водних стоках хлорвмісних препаратів, зокрема NaClO , що сприяє пришвидшенню хімічних та біологічних процесів очистки.

Кавітаційний метод очищення з застосуванням гідродинамічних кавітацій досліджено авторами [93]. Як окисники використовують хлорне вапно, газоподібний хлор і його сполуки, озон та молекулярний кисень, пероксид гідрогену тощо. Поєднання кавітаційного оброблення та реагентного оброблення сприяє суттєвому прискоренню окисно-відновних реакції та поліпшенню якості очищеної води. Проведені дослідження використання гідродинамічного кавітаційного оброблення при реагентному очищенні стічних вод від токсичних забруднювачів дають змогу одержати зменшити витрати реагентів, спростити типові технологічні схеми водоочищення [94].

1.3 Акустична кавітація як метод очищення стічних вод

Кавітація - явище утворення в рідині порожнин (кавітаційних бульбашок, каверн), заповнених пароповітряною сумішшю, їх пульсацій, росту та сплескування (колапсу) з дуже великими густинами енергії - від 10 до 10 Вт/м [35-41]. За способом збудження кавітації ці процеси можна умовно розділити на періодичного впливу (акустична кавітація), одноразового впливу

(гідродинамічна кавітація, труби Вентурі, лазерна кавітація, механічний (гідравлічний) удар тощо) і змішаний вплив (гідродинамічні сирени і свистки, роторні апарати) [42-45].

Акустична кавітація - процес, який відбувається під впливом періодичного змінного тиску. Частота пульсацій тиску в рідині - від десятків Гц до десятків МГц [46-48]. У кожному частотному діапазоні використовують специфічний перетворювач електричних коливань в акустичні. На низьких частотах (10-5000 Гц) використовують електромагнітні чи механічні перетворювачі. ускладнюється використання резонансних явищ системи випромінювач-рідина, що зумовлює низьку ефективність внесення енергії у рідкофазне середовище [49, 50].

На більш високих ультразвукових частотах використовують п'єзоелектричні випромінювачі. Завдяки малій довжині хвилі в цьому частотному діапазоні можливе фокусування ультразвуку й отримання потужних УЗ-полів [50].

Гідродинамічна і акустична кавітація є важливими методами інтенсифікації гідромеханічних, теплових та масообмінних процесів: очищення і знезараження стічних вод [16-18]; дезінфекції [16-19]; оброблення поверхонь деталей [20, 21]; очищення дифузійних соків та підвищення реакційної здатності суспензій вапняного молока [22, 23]; зниження в'язкості нафти [24] та епоксидних смол [25]; розрихлення пластів вугілля [26]; отримання наноматеріалів – кластерів наноалмазів і фулеренового типів із водної суспензії карбоновмісних матеріалів [29] тощо.

2 ДОСЛІДЖЕННЯ ТЕХНОЛОГІЇ ЗНЕЗАРАЖЕННЯ СТІЧНИХ ВОД З ВИКОРИСТАННЯМ РОТОРНИХ КАВІТАТОРІВ

2.1 Особливості процесу кавітації

Кавітація властива лише рідині і не відбувається за нормальних умов ні в твердих тілах, ні в газах.

Кавітація виникає в результаті пониження тиску в рідині і нею можна управляти, регулюючи тиск, або, точніше, мінімальний абсолютний тиск. Якщо тиск підтримується протягом достатньо довгого часу нижче за деяке критичне значення, визначуване фізичними властивостями і станом рідини, то виникає кавітація. Інакше кавітація не виникає.

Кавітація пов'язана з появою і зникненням каверн в рідині. Термін "каверна" позначає порожню замкнену порожнину. Якщо каверни дійсно порожні, то, природно, їх "вміст" не може грати активної ролі у фізичному явищі. Тому всі спостережувані появи кавітації слід вважати властивими лише рідині. Проте при детальному розгляді процесу кавітації уявлення про каверни як про порожні об'єми виявляється не зовсім правильним. Проте велику частину часу існування каверни її вміст грає другорядну роль, за винятком початку і кінця циклу, коли каверна має мікроскопічні розміри.

Внаслідок великих місцевих швидкостей навколо вхідної кромки лопаті, статичний тиск зменшується, що призводить до розподілу тиску з різко вираженим мінімумом. Коли цей тиск стає нижче тиску насиченої пари виникає кавітаційна каверна.

Вниз по потоку, коли тиск починає підвищуватися, ця каверна схлопується, викликаючи найсильніший ударний імпульс, що і призводить до пошкодження поверхні лопаті.

Кавітація відноситься до нестационарних явищ, оскільки вона є процесом зростання і схлопування каверн.

Погане профілювання вхідної кромки лопаті створює місцеве збільшення швидкості і, відповідно, пік низького тиску, що посилює кавітаційні явища.

Процес виникнення і розвитку кавітації залежить від стану рідини, включаючи наявність в ній твердих або газоподібних домішок, і від поля тиску в зоні кавітації. Прояви кавітації гідродинамічного походження, окрім цих чинників, залежать також від форми твердих кордонів. Існує багато способів класифікації даних явищ. Наприклад, класифікація за умовами, в яких відбувається кавітація: кавітація в потоці, кавітація в тілах, рухомих в рідині, і кавітація за відсутності основного потоку. Можливий інший метод класифікації за основними фізичними особливостями. Об'єднуючи ці два методи, можна класифікувати кавітацію таким чином:

1. Кавітація, що переміщається.
2. Приєднана кавітація.
3. Вихрова кавітація.
4. Вібраційна кавітація.

Слід також відзначити два різні стани, які в певних умовах властиві деяким з перерахованих типів кавітації - нестационарне і квазістационарне.

Кавітація, що переміщується, є типом кавітації, при якій в рідині утворюються окремі нестационарні каверни або бульбашки, рухомі разом з нею, одночасно розширюючись, скорочуючись і потім схлопуючись. Такі нестационарні бульбашки, що переміщуються, можуть виникати в точках низького тиску на твердому кордоні і в об'ємі рідини або в ядрі рухомих вихорів, або в області в'язкої течії з високим рівнем турбулентності. Переміщення цих каверн при такій кавітації є їх відмінною особливістю в порівнянні з іншими типами нестационарних каверн. При візуальному спостереженні неозброєним оком кавітація, що переміщується, може здатися суцільною квазістационарною зоною кавітації.

Приєднаною кавітацією називається явище, що виникає інколи після початку кавітації, при якому потік рідини відривається від твердого кордону

обтічного тіла або стінки каналу з утворенням порожнини, або каверни, на твердому кордоні. В деяких випадках поверхня розділу між рідиною і великою каверною може бути гладкою і прозорою. У рідині біля поверхні великої каверни спостерігається велика кількість дрібних нестационарних каверн, що переміщуються. Ці дрібні каверни швидко зростають майже до максимального розміру в початку основної каверни і практично не змінюються до її кінця, де вони зникають.



Рисунок 2.1 - Приєднана кавітація на лопаті

Інколи спостерігаються коливання, при яких приєднана каверна спочатку зростає, а потім схлопується унаслідок захвату рідини і подальшого заповнення каверни з кінця зони кавітації. Максимальна довжина приєднаної каверни залежить від поля тиску. Каверна може закінчуватися в точці приєднання основного потоку рідини до поверхні тіла на деякій відстані від передньої кромки каверни (лінії відриву) або може тягнутися далеко за межі тіла до зімкнення основного потоку з утворенням порожнини, що охоплює тіло. У останньому випадку кавітацію називають суперкавітацією.

При вихровій кавітації каверни спостерігаються в центрі вихорів, що утворюються в зонах, де є велика дотична напруга. Вихрова кавітація була виявлена раніше інших типів кавітації, оскільки вона часто виникає на кінцях лопатей грібних гвинтів. Цього типу кавітації часто називають “кінцевою”

кавітацією. Кінцева кавітація виникає не лише на грібних гвинтах при обтіканні зовнішнім потоком, вона також зустрічається і в каналах, наприклад на кінцях лопатей осьових насосів. Кавітація цього типу розвивається також в областях, де є великі поперечні градієнти швидкості, достатні для підтримки вихорів, в ядрі яких абсолютний тиск падає до критичної величини, зазвичай приблизно рівної тиску насиченої пари. Вихрова каверна може існувати триваліший час, ніж каверна, що переміщується, оскільки вихор створює момент кількості рухів, який збільшує час існування каверни навіть у тому випадку, коли маса рідини переміщається в зону з вищим тиском (рис.2.2).

Рисунок 2.2 - Вихрова кавітація на лопаті



Швидкість схлопування вихрових каверн і механізм цього явища вивчені недостатньо, але їх характерні особливості свідчать про високі швидкості і відповідно низький тиск схлопування. На підставі сказаного неважко зробити висновок, що вихрова кавітація може викликати руйнування лише у тому випадку, коли схлопування каверн відбувається на поверхні тіла або на невеликій відстані від неї.

Коли схлопуються кавітаційні бульбашки, енергія рідини зосереджується в дуже невеликих об'ємах. Тим самим, утворюються місця підвищеної температури і виникають ударні хвилі, які є джерелами шуму. Шум, що створюється кавітацією, є особливою проблемою на підводних човнах (субмаринах), оскільки із-за шуму їх можуть виявити. При руйнуванні каверн звільняється багато енергії, що може викликати пошкодження. Експерименти

показали, що шкідливій, руйнівній дії кавітації піддаються навіть хімічно інертні до кисню речовини (золото, скло і ін.), хоча і набагато повільнішому. Це доводить, що окрім чинника хімічної агресивності газів, що знаходяться в бульбашках, важливим є також чинник занедбаності тиску, що виникає при схлопуванні бульбашок. Кавітація веде до великого зносу робочих органів і може значно скоротити термін служби гвинта і насоса. [3,9].

У відцентрових насосах точно так, як і в інших гідравлічних системах, ми маємо справу з двома різними видами кавітації: поверхнева кавітація і відривна кавітація. Якщо перша має місце на поверхнях окремих частин насосів або в безпосередній близькості від них, то друга виникає в результаті коливання тиску в турбулентних струменях і вихорах, що періодично відриваються від поверхні. Прикладами такого роду кавітації є кавітація в струменях, що утворюються за лопатями робочого колеса, за нерівностями поверхні, або кавітація унаслідок місцевого пониження тиску в зазорах. Що стосується поверхневої кавітації, то вона може мати місце як на рухомих, так і нерухомих частинах насоса.

При обтіканні передньої кромки лопаті робочого колеса має місце пониження тиску, який викликаний пов'язаним з обтіканням відхиленням потоку і супутньою йому появою відцентрових сил (рис.2.3). Найбільше пониження тиску має місце в точці А.

У точці В вся швидкість перетвориться в тиск. На ділянці АВ цей тиск падає, переходячи в розрідження. Характер зміни тиску на цій ділянці і величина розрідження залежить від кінцевої товщини лопаті і форми її торця. Розрідження зокрема тим більше, чим коротше ділянка переходу до повної товщини лопаті. При великих значеннях швидкості на вході в робоче колесо це пониження тиску може досягати значної величини.

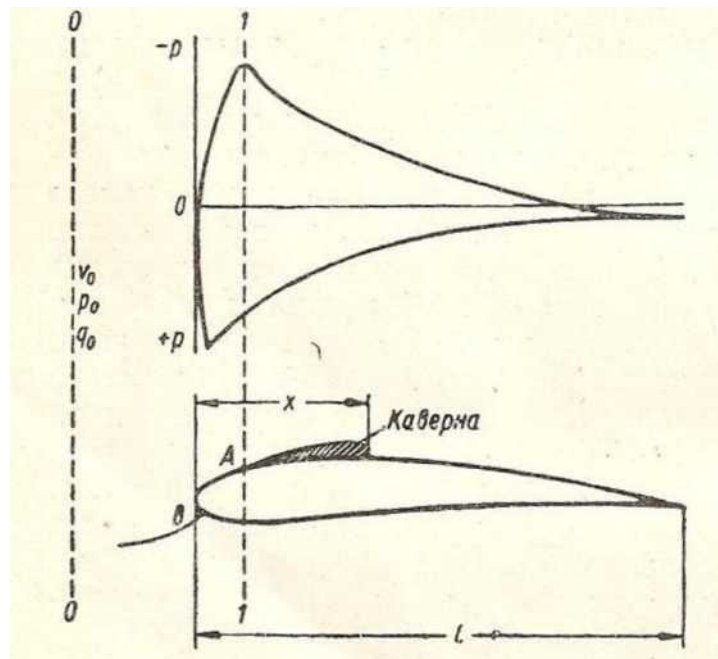
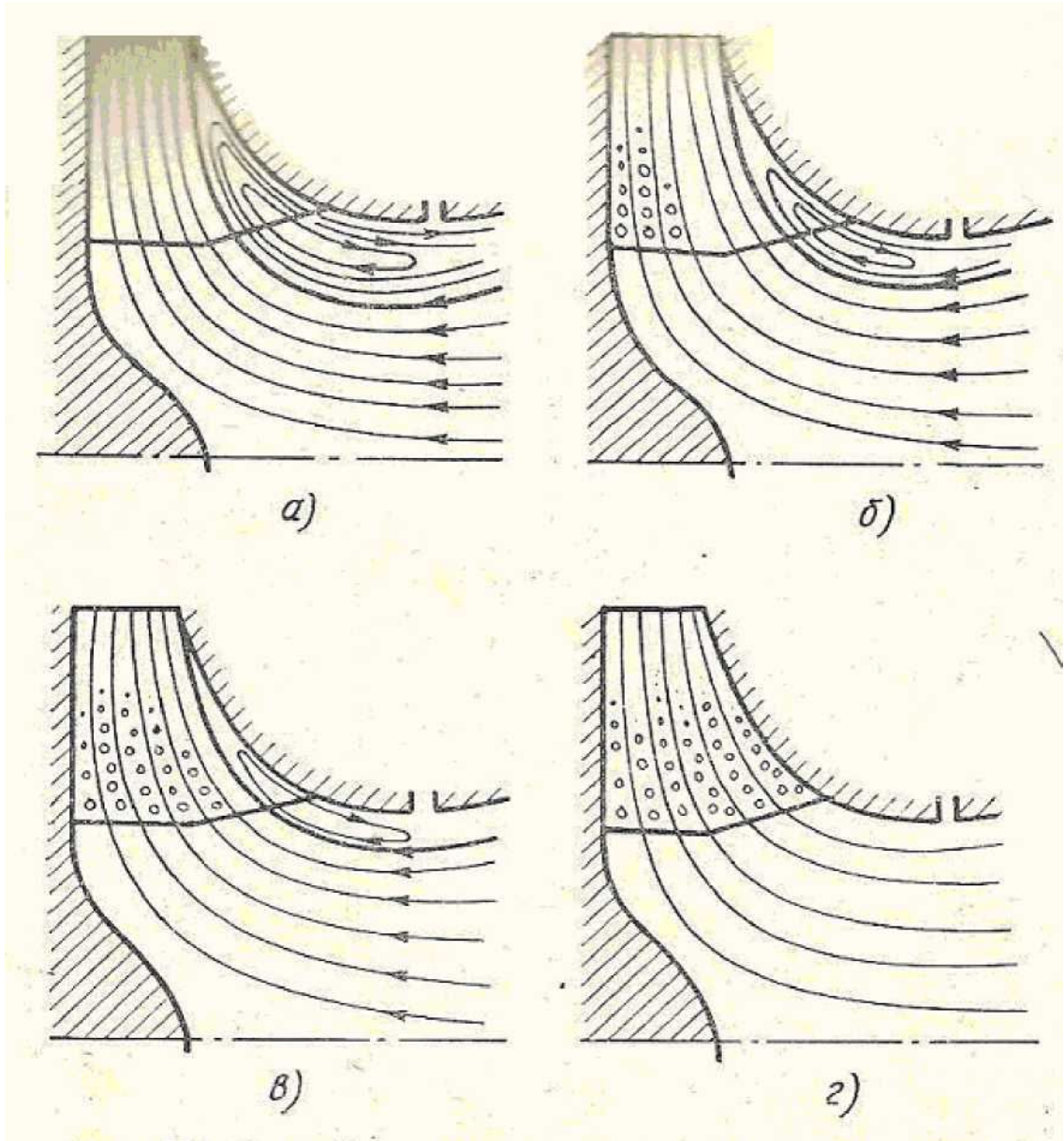


Рисунок 2.3 - Каверна кавітації на лопаті

Кавітація у відцентрових насосах може привести до руйнування окремих частин робочого колеса, пристроїв, що підводять і відводять, зниженню натиску, зменшенню подачі і к.к.д., до збільшення шуму і вібрації насоса. Відразу необхідно сказати, що шум і вібрація в різній мірі мають місце у всіх насосах при роботі їх на режимах, що значно відрізняються від режиму максимального к.к.д., унаслідок незадовільного кута атаки на вході в робоче колесо. З іншого боку, може статися значне погіршення характеристик насоса і навіть часткове руйнування його унаслідок кавітації при незначному збільшенні шуму і вібрації. Іншими словами, можна сказати, що хоча шум і вібрація є ознаками кавітації, але вони далеко не завжди дозволяють з необхідною точністю визначити міру її розвитку. У зв'язку з цим режими кавітацій роботи відцентрових насосів розрізняють по мірі погіршення зовнішніх характеристик насоса. [3,4,5]

Наближена схема механізму кавітації у роторному кавітаторі представлена на наступному рисунку 2.4.

Рисунок 2.4 - Наближена схема механізму кавітації в робочому колесі



роторного кавітатора: а- потік без кавітації; б - початок місцевої кавітації; у - частково розвинута кавітація; г - повністю розвинута кавітація перед зливом режиму насоса

2.2 Аналіз сучасних методів розрахунків параметрів кавітаторів

Для того щоб підійти до технологічного розрахунку кавітаторів, 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.

Кавітатор 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 кавітатор 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 кавітаторі 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) гідроциклонів :

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

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

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

де k_D - поправочний коефіцієнт на діаметр кавітатору D ;

k_α - поправочний коефіцієнт на кут конуса кавітатору α ;

d_n - діаметр живильного отвору, см;

d - діаметр зливного патрубка, см;

g - прискорення вільного падіння, м/с^2 ;

p - тиск на вході в гідроциклон, кгс/см^2 ;

α - кут конусності кавітатору, 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 кавітаторів. 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:

$$1 \text{ група } Q = k_1 \times d_n^a \times \sqrt{p} ;$$

$$2 \text{ група } Q = k_2 \times d_n^a \times d^b \times \sqrt{p} ;$$

$$3 \text{ група } Q = k_3 \times d_n^a \times d^b \times f(D, \alpha) \times \sqrt{p} ;$$

$$4 \text{ група } Q = k_4 \times f(D, d_n, d, \alpha, \alpha_0, T, \rho_0 \dots) \times \sqrt{p} .$$

До групи 1 відносяться найпростіші формули, що враховують тільки діаметр живильного отвору і які відрізняються між собою лише величиною коефіцієнта k , 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 кавітатору. Ці формули відрізняються між собою видом і складністю функцій залежно від D і α 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 кавітаторів.

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

- діаметр кавітатору $D = 500$ мм;
- діаметр живильного патрубку $d_{п} = 156$ 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/м³.

Розкид пояснюється індивідуальністю проведення дослідів на кавітаторах властивому кожному автору і отримання емпіричної формули, властивою досліджуваному кавітатору. Тому виникає необхідність розробки єдиної теорії розрахунку продуктивності кавітаторів справедливою для розрахунку будь-яких кавітаторів з різними геометричними параметрами.

2.3 Розробка методу математичного моделювання опору кавітатора

Незважаючи на те, що кавітатори застосовуються вже кілька десятків років, все ж вони ще не повністю досліджені. Причиною цього є складність явищ, що протікають в кавітаторі. 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 кавітатору з його геометричними і режимними параметрами.

Опір в кавітаторах 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:

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

де ΔP - різниця між повним тиском на вході в кавітатор і статичним на виході зі зливної насадки, Па;

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

ρ_0 - щільність суспензії, кг/м³.

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

Тому кавітатор 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

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

- 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 зливний трубі, Па;

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

ρ_0 - щільність суспензії, кг/м³;

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;

Σf - сумарна площа входу суспензії через вхідну насадку, м².

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:

$$W_0 = W_{01} + W_{02} = \sqrt{\frac{2\Delta P_{0\ 1}}{\zeta_{\text{вх1}} \rho_0}} + \sqrt{\frac{2\Delta P_{0\ 2}}{\zeta_{\text{вх2}} \rho_0}} = \sqrt{\frac{2\Delta P_{0\ 1}}{\rho_0}} \left(\sqrt{\frac{1}{\zeta_{\text{вх1}}} + \sqrt{\frac{1}{\zeta_{\text{вх2}}} \frac{\Delta P_{0\ 2}}{\Delta P_{0\ 1}}}} \right).$$

Визначивши $\Delta P_{0,1}$ і $\Delta P_{0,2}$, розділивши одне на інше, отримаємо залежність, що визначає зв'язок між продуктивністю зливу і піску (розвантажувальне відношення) в наступному вигляді

$$\frac{\Delta P_{0,2}}{\Delta P_{0,1}} = \left(\frac{Q_{02}}{Q_{01}} \right)^2 \cdot \frac{\zeta_{\text{BX}2}}{\zeta_{\text{BX}1}}.$$

Обробка результатів випробування модельного циклону показала, що співвідношення $\frac{\Delta P_{0,2}}{\Delta P_{0,1}} = 1$, звідки $\Delta P_{0,2} = \Delta P_{0,1} = \Delta P$ і відповідно до цього отримаємо залежність, що визначає опір кавітатору в наступному вигляді

$$\Delta P = \left(\frac{1}{\frac{1}{\sqrt{\zeta_{\text{BX}1}}} + \frac{1}{\sqrt{\zeta_{\text{BX}2}}}} \right)^2 \frac{\rho_0 W_0^2}{2} = \zeta_{\text{BX}0} \frac{\rho_0 W_0^2}{2},$$

звідки коефіцієнт опору кавітатору віднесений до входу в кавітатор визначиться наступною залежністю:

$$\zeta_{\text{BX}0} = \left(\frac{1}{\sqrt{\frac{1}{\zeta_{\text{BX}1}}} + \sqrt{\frac{1}{\zeta_{\text{BX}2}}}} \right)^2.$$

Таким чином, завдання зводиться до визначення коефіцієнтів опору кавітатору 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 ρ_0 - щільність суспензії на вході в кавітатор, кг/м³;

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

Σf_0 - сумарна площа входу суспензії через вхідну насадку кавітатору, м².

Масова витрата освітленої води через зливну насадку

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

де ρ_1 - щільність суспензії на виході зі зливної насадки, кг/м³;

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

α_1 - кут крутки на виході зі зливної насадки кавітатору (кут між вектором абсолютної швидкості ω_1 і його окружним напрямком ω_{1u}), град;

$R_{\text{ТР}}$ - внутрішній радіус труби зливної насадки, м;

R_B - радіус повітряного вихору в зливній насадці, м.

Масова витрата пульпи через шламову насадку

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

де ρ_2 - щільність пульпи на виході зі шламової насадки, кг/м³;

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

α_2 - кут крутки на виході зі шламової насадки кавітатору (кут між вектором абсолютної швидкості ω_2 і його окружним напрямком ω_{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

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

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;

$M_1 = m_1 W_1 \cos \alpha_1 \frac{R_{TP} + R_B}{2}$ - 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:

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

Звідки

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

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

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

звідки радіус внутрішнього вихору в зливній трубі визначиться за такою залежністю

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

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 кавітатору по лінії зливу, що працює при зливі пульпи зі шламової насадки в наступному вигляді:

$$\zeta_{вх1} = \frac{\rho_1}{\rho_0} \left[\frac{\frac{R_0}{R_u} \varepsilon \left(1 - \frac{M_2}{\varepsilon M_0}\right)}{\frac{R_{TP}}{R_u} \left(1 - \frac{m_2}{m_0}\right) \left[1 - \frac{\sum f_0 \left(1 - \frac{m_2}{m_0}\right)^2}{\pi R_0 R_{TP} \varepsilon \left(1 - \frac{M_2}{\varepsilon M_0}\right)} \frac{1}{4 \operatorname{tg} \alpha_1} \right] \cos \alpha_1} \right]^2.$$

Рішення рівняння приводить до наступного результату:

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

З залежностей випливає, що опір кавітатору, що працює при зливі пульпи зі шламової насадки, визначається його геометричним параметром

крутки $\frac{\Sigma f}{\pi R_0 R_{TP}}$, відсноною величиною маси, що пройшла через шламову насадку, їх моментами кількості руху, реальністю процесу, що визначається коефіцієнтами ϕ_0 і ε .

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

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

Кут скручування на виході з піскової насадки α_2

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

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:

$$\xi_{\text{вих}_1} = \frac{\rho_1}{\rho_0} \left[\frac{\frac{R_0}{R_u} \cdot \varepsilon}{\frac{R_{TP}}{R_u} \cdot \left[1 - \frac{\Sigma f_0}{\pi R_0 R_{TP}} \cdot \frac{1}{4 \text{tg} \alpha_1} \right] \cos \alpha_1} \right]^2.$$

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

$$\zeta_{\text{вх1}} = \frac{\rho_1}{\rho_0} \left[\frac{\frac{R_0}{R_y} \cdot \varepsilon}{\frac{R_{\text{ТР}}}{R_y} \cdot \left(\frac{\cos \alpha_1}{1 + \sin^2 \alpha_1} \right)} \right]^2,$$

а кут крутки на виході зі зливної насадки α_1 для $\alpha_1 \leq 50^\circ$ з достатньою точністю визначається за спрощеною залежністю отриманою відповідно до [34]

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

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:

$$\zeta_{\text{вх2}} = \frac{\rho_2}{\rho_0} \cdot \left[\frac{\frac{R_0}{R_y} \cdot \varepsilon}{\frac{R_k}{R_y} \cdot \left[1 - \frac{\Sigma f_0}{\pi R_0 R_k} \cdot \frac{1}{4 \text{tg} \alpha_2} \right] \cdot \cos \alpha_2} \right]^2.$$

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

$$\zeta_{\text{вх2}} = \frac{\rho_2}{\rho_0} \left[\frac{\frac{R_0}{R_y} \cdot \varepsilon}{\frac{R_k}{R_y} \cdot \left(\frac{\cos \alpha_2}{1 + \sin^2 \alpha_2} \right)} \right]^2.$$

Кут скручування на виході з піскової насадки α_2 визначається за спрощеною залежністю отриманою відповідно до [34]

$$\alpha_2 = \arcsin \sqrt[3]{\frac{\Sigma f_0}{\pi R_0 R_k} \cdot \frac{1}{4\epsilon}}.$$

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

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

2.4 Аналіз впливу конструктивних і режимних параметрів на коефіцієнт опору кавітатору

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

Для циліндричної частини кавітатору приймаємо:

Геометричний комплекс

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

де Σf - сумарна площа входу суспензії через вхідну насадку кавітатору, м²;

R_0 - радіус підведення суспензії через вхідну насадку кавітатору, м;

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

Ступінь радіальності завихрювача

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

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

де R_u - радіус циліндричної частини кавітатору, м.

Коефіцієнт зменшення початкового моменту кількості руху

$$\varepsilon = 1.$$

Коефіцієнт втрати швидкості

$$\varphi = 0,9.$$

Для конічної частини кавітатору 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 кавітатору

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

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

m_0 - масова витрата суспензії через вхідну насадку кавітатору, 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 кавітатору 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 кавітатору з урахуванням моментів кількості руху і масових витрат перетворимо до наступного вигляду

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

Комплекс кута скручування суспензії в кавітаторі

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

Коефіцієнт опору по циклону

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

Коефіцієнт перетворення комплексу

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

Отримаємо вираз, що визначає коефіцієнт опору в зливній трубі

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

Кут скручування в зливній трубі

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

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

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

або

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

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

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

Коефіцієнт опору для циліндричної частини кавітатору

$$\begin{aligned}\xi_{\text{ex1}} &= \left[\frac{\frac{R_0}{R_y} \cdot \varepsilon \cdot \left(1 - \frac{M_2}{\varepsilon M_0}\right)}{\varphi \cdot \frac{R_{mp}}{R_y} \cdot \left(1 - \frac{m_2}{m_0}\right) \cdot \left(\frac{\cos \alpha_1}{(1 + \sin^2 \alpha_1)}\right)} \right]^2 = \\ &= \left[\frac{0,83 \cdot 1 \cdot (1 - 0,8)}{0,9 \cdot 0,5 \cdot (1 - 0,2) \cdot \left(\frac{\cos 38,638}{(1 + \sin^2 38,638)}\right)} \right]^2 = 0,669.\end{aligned}$$

Розмір повітряного вихору, в зливі кавітатору

$$\begin{aligned}\frac{R_\varepsilon}{R_{mp}} &= 1 - \frac{\sum f}{\pi \cdot R_0 \cdot R_k} \cdot \frac{1}{2 \operatorname{tg} \alpha_1} \cdot \frac{1}{\varepsilon} \cdot \frac{\left(1 - \frac{m_2}{m_0}\right)^2}{\left(1 - \frac{M_2}{M_0}\right)} = \\ &= 1 - 0,3 \cdot \frac{1}{2 \operatorname{tg} 38,638} \cdot \frac{1}{1} \cdot \frac{(1 - 0,2)^2}{(1 - 0,8)} = 0,399.\end{aligned}$$

Кут скручування в перерізі на виході з шламової насадки кавітатору

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

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

Коефіцієнт опору для конічної частини кавітатору

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

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

Розмір повітряного вихору в пісковій насадці кавітатору

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

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

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.

3 ОХОРОНА ПРАЦІ ТА ТЕХНОЛОГІЧНА БЕЗПЕКА

Основоположним документом у галузі охорони праці є Закон України “Про охорону праці”. Цей Закон визначає основні положення щодо реалізації конституційного права працівників на охорону їх життя і здоров'я у процесі трудової діяльності, регулює за участю відповідних органів державної влади відносини між роботодавцем і працівником з питань безпеки, гігієни праці та виробничого середовища і встановлює єдиний порядок організації охорони праці в Україні.

3.1 Аналіз шкідливих та небезпечних факторів в лабораторії

Одним з найголовніших умов здорової та високопродуктивної праці є забезпечення чистоти повітря. Технологічний процес в лабораторії не супроводжується надходженням в повітря робочої зони шкідливих речовин.

Такі роботи як, сварка, фарбування проводяться спеціалістами не в навчальний час.

По нормуванню шкідливих речовин в повітрі, приміщення відносять до 4 групи (малонебезпечні).

Роботи в лабораторії можна охарактеризувати як легкі, з надлишком явної теплоти.

В приміщенні присутнє джерело променистого потоку теплоти (Імітатор сонячного випромінювання).

Інтенсивність теплового опромінення людини, регламентується, виходячи з суб'єктивних відчуттів людиною енергії опромінювання. Людина може невизначено довго витримувати опромінювання інтенсивністю до 350 Вт/м². Ця величина вважається верхньою межею оптимального опромінення (див. табл. 3.1). При більш високих значеннях повинно виконуватися повітряне душення робочих місць [41].

Таблиця 3.1 - Вплив теплового опромінення на людину в залежності від інтенсивності та тривалості

Інтенсивність опромінення, Вт/м ²	Вплив	Тривалість опромінення, с
230-350	слабе	невизначено довго
350-1050	помірне	180-300
1050-1600	середнє	40-60
2000-2800	високе	18-24
3500	дуже високе	2-5

Вентиляція в лабораторії відноситься до вентиляції з природнім спонуканням та являється приливною.

Правильно виконане освітлення забезпечує нормальну діяльність. Небезпечної величини вібрацій в приміщенні не виявлено.

Лабораторія безпечна, в ній не виявлено жодного шкідливого чинника (сильна запиленість, підвищена волога, наявність біо- та хімічно-активних середовищ).

Пожежна безпека забезпечується вогнегасником. Приміщення має 1-ступінь вогнестійкості.

3.2 Заходи з усунення шкідливих та небезпечних факторів

Для запобігання виробничого травматизму та профзахворювань розроблені дві групи основних заходів з усунення шкідливих та небезпечних факторів: організаційні та інженерні (конструктивні).

Інженерні та організаційні заходи:

- строге дотримання технологічних інструкцій та інструкцій техніки безпеки;

- регулярне проведення інструктажів та навчання правил безпечної експлуатації установок для персоналу та студентів.

Студент може бути допущений до роботи тільки після проходження вхідного інструктажу з техніки безпеки, а також інструктажу на робочому місці. Вхідний інструктаж для студентів проводить викладач. Проведення інструктажу повинно бути закріплене записом в журналі реєстрації виробничого інструктажу з техніки безпеки [46].

3.3 Виробнича санітарія

Площа лабораторії становить 18 м².

Природна вентиляція відбувається за рахунок різниці температур.

Джерела шуму та вібрації в даному приміщенні відсутні.

Опалення центральне, температура в приміщенні підтримується взимку в межах 15-21 °С.

Вологість не повинна перевищувати 70-75 %.

3.4 Пожежна безпека в лабораторії

Питання забезпечення пожежної безпеки навчальної лабораторії має велике значення.

Пожежна безпека лабораторії може бути забезпечена заходами пожежної профілактики та активного пожежного захисту.

Поняття пожежної профілактики включає комплекс заходів, необхідних для попередження виникнення пожежі чи зменшення його наслідків.

Під активним пожежним захистом розуміються заходи, які забезпечують успішне подолання пожеж чи вибухонебезпечних ситуацій. Для визначення ступеня ймовірності виникнення пожежі, слід знати, до якої категорії небезпеки відносять споруду.

Приміщення лабораторії відноситься до категорії Д, це негорючі матеріали в холодному стані.

Єдина причина виникнення пожежі в лабораторії - коротке замикання електричної мережі та спалах інвентарю який знаходиться в приміщенні.

Горючими речовинами в установці являються в основному ізоляційний матеріали: Ізолон, пластмаса.

Ступінь вогнестійкості споруди - 1.

Організаційні заходи - розроблений план протипожежних заходів.

Всі студенти при роботі на установках проходять первинний та вторинний (на робочому місці) інструктаж з заходів пожежної безпеки.

Інженерні заходи - в лабораторії встановлені первинні та основні засоби пожежогасіння.

Так як лабораторія оснащена електричними установками, та такий засіб пожежогасіння, як вода, не підходить в даному випадку.

Основним засобом пожежогасіння являються порошкові вогнегасники.

В даній лабораторії використовується порошковий вогнегасник серії ОП - 02. Цей вогнегасник призначений для гасіння різних речовин (крім здатних горіти без повітря), а також установок з напругою до 1,0 кВ.

Застосування автоматичних засобів виявлення пожеж являється однією з умов забезпечення пожежної безпеки, так як дозволяє оповістити черговий персонал про пожежу та місце її виникнення.

В аудиторії відсутні автоматичні засоби виявлення пожежі.

3.5 Дослідження ефективності та якості освітлення

Раціональне освітлення приміщень та робочих місць - одна з найважливіших умов створення корисних та безпечних умов праці.

Схема освітлення лабораторії представлена на рисунку 3.1.

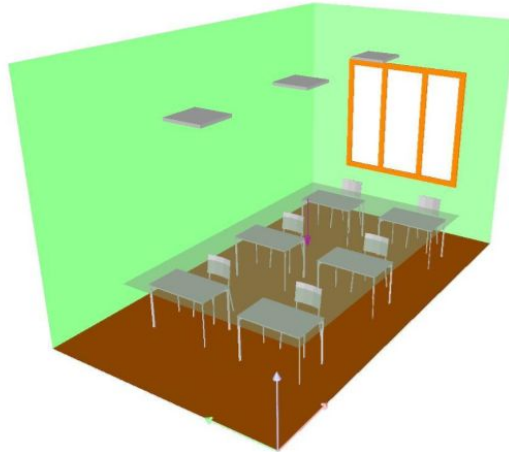


Рисунок 3.1 — Схема освітлення лабораторії

У відповідності до вимог Державних будівельних норм України ДБН В.2.5-28-2006. “Природне та штучне освітлення” величина середньої горизонтальної освітленості на робочих поверхнях (на рівні 0,8 м) в навчальних лабораторіях повинна становити не менше 400 лк [44].




Для вирішення поставленої задачі та досягнення необхідних значень основних параметрів якості світлового середовища в освітлюваній навчальній аудиторії шляхом комп’ютерного моделювання було проведено аналіз можливості застосування на об’єкті однієї з декількох найбільш поширених моделей плоских низькопрофільних накладних світлодіодних світильників розміром 600 × 600 мм, з молочним розсіювачем.

Моделювання та світлотехнічні розрахунки проводилися за допомогою спеціальної комп’ютерної програми DIALux, призначеної для виконання світлотехнічних розрахунків та моделювання світлових сцен.

У якості основного типу світильників був обраний плоский панельний офісний світильник типу ДПО 03LL-40-01 (з високоефективним світлодіодним джерелом світла) виробленого українською фірмою Ledlab спільно з південноазіатським партнером.

Даний виріб відноситься до типових виробів низької цінової категорії “Бюджетна” (див. табл. 3.2) і має порівняно не погану якість серед світильників своєї групи.

Таблиця 3.2 — Умовні споживацькі категорії плоских офісних світлоіодних світильників, представлених на українському ринку.

Назва споживчої категорії світильників	Зовнішній вигляд	Коротка характеристика
Категорія 1 (бюджетна)		$P = 20...40 \text{ Вт}$ $\Phi = 2500...3400 \text{ Вт}$ $T = 25000...35000 \text{ годин}$ Роздрібна ціна...1200 грн
Категорія 2 (стандартна якість)		$P = 30...45 \text{ Вт}$ $\Phi = 3000...5000 \text{ Вт}$ $T = 30000...40000 \text{ годин}$ Роздрібна ціна...2000 грн
Категорія 3 (преміум)		$P = 30...60 \text{ Вт}$ $\Phi = 3000...7000 \text{ Вт}$ $T = 35000...50000 \text{ годин}$ Роздрібна ціна...2000 грн

В розрахунку розглянуто 4 варіанти розташування світильників ДПО 03ІІ-40-01 в аудиторії.

1. Перший варіант. Встановлено три світильника. Висота стелі в аудиторії - 4 м. Відстань підвісу світильника (від стелі) - 0,6 м. Відстань від світильника до робочої поверхні - 2,6 м. Відстань від робочої поверхні до підлоги аудиторії - 0,8 м.

2. Другий варіант. Кількість встановлених світильників рівна 4. Всі параметри підвісу світлових приладів такі, як і в першому варіанті.

3. Третій варіант. Встановлені три світильника. Всі світильники максимально наближені до стелі. Оптимальна відстань між стелею та кожною панеллю становить 10-20 см (з врахуванням необхідної відстані зі зворотнього боку панелі живлення — драйвера). Відстань від світильника до робочої поверхні приймалась рівною 3,0 м.

4. Четвертий варіант. Кількість встановлених світильників в аудиторії дорівнює 4. Всі відстані в вертикальній площині прийняті такими ж, як і у варіанті № 3.

Отримані результати світлотехнічного розрахунку за вказаними чотирма варіантами приведені нижче та зведені в таблицю 3.3.

Таблиця 3. 3 — Основні результати світлотехнічного розрахунку

Варіант світлотехнічного розрахунку	Величина горизонтальної освітленості		
	$E_{\text{ср}}$, ЛК	E_{min} , ЛК	E_{max} , ЛК
1 (n= 3 шт; H = 2,6 ; l = 2,3 м)	336	238	430
2 (n= 4 шт; H = 2,6 ; l = 1,75м)	445	307	533
3 (n= 3 шт; H = 3,0 ; l = 2,3 м)	308	240	354
4 (n= 4 шт; H = 3,0 ; l = 1,75м)	406	320	466

Позначення:

n – кількість світильників;

H – відстань від світильника до робочої поверхні;

l – відстань між центром світильників.

Висновки та пропозиції:

1. Нормативні параметри світлового середовища об'єкта можуть бути забезпечені використанням 4 шт. офісних накладних панельних світлодіодних світильників типу ДПО 03LL-40-01.

2. Допускається для освітлення аудиторії, використання 3 шт. плоских світлодіодних панельних світильників розглянутого типу. При цьому висоту (H) підвісу та крок світильників в варіанті 1 доцільно ще зменшити на 10-15 %, а також на стільки ж збільшити відстань від центру крайнього світильника до вікна, доводячи його до 2,3...2,5 м.

3. Очікувана (розрахункова) величина зменшення електроспоживання на потреби освітлення об'єкта складе, %:

- у порівнянні зі старим проектним рішенням освітлення на лампах розжарювання та використання 4 - х світлодіодних світильників ДПО 03LL-40-01

$$E_{331} = \frac{900\text{Вт} - 160\text{Вт}}{900\text{Вт}} \cdot 100 = 82$$

- у порівнянні з трьома растровими люмінесцентними світильниками $(4 \times 18) \times 3$ та трьома світлодіодними світильниками розглянутого типу

$$E_{332} = \frac{(3 \cdot 88\text{Вт}) - (3 \cdot 40\text{Вт})}{(3 \cdot 88\text{Вт})} \cdot 100 = 40.$$

4. Реалізувати схему включення світильників за формулою 1+2 (в варіантах 1 і 3), та 2+2 (в варіантах 2 і 4).

В залежності від джерела світла освітлення може бути трьох видів — природне, штучне та комбіноване (при комбінуванні природного та штучного освітлення).

Характеристика зорової роботи визначається мінімальним розміром об'єкта, контрастом об'єкта з фоном та характеристикою фону.

В реальних умовах на освітленість робочих поверхонь в приміщенні впливають такі фактори, як відбивання та поглинання освітлення стінами, стелею та іншими поверхнями, відстань від світильника до робочої поверхні, стан поверхні світильника і т.д. Внаслідок цього фактично використовується тільки частина світлового потоку, випромінюваного джерелом світла.

3.6 Контроль та догляд за освітлювальними установками

Освітлення потребує систематичного догляду, правильної експлуатації освітлювальної установки та контролю освітленості на робочих місцях не менше одного разу на рік.

Внаслідок тривалої експлуатації ламп їх світловий потік знижується до 25 %. Такі лампи треба своєчасно замінювати.

Забороняється встановлення світильників, до комплекту яких входять не однотипні газорозрядні лампи, а також такі, що мають різний спектр та величину світлового потоку.

Очищення світильників належить проводити не рідше одного разу на три місяці.

Очищення шибок світлових отворів проводиться не рідше двох разів на рік для приміщень із незначним виділенням пилу, і не менше чотирьох разів із значним виділенням пилу [44].

Основним приладом для контролю та вимірювання освітленості на робочих місцях є люксметри типу Ю-16, Ю-17, Ю-116, Ю-117.

Вони відрізняються границями вимірювання та оформленням. Принцип дії всіх однаковий і базується на явищі фотоелектричного ефекту.

Для автоматичного контролю освітленості на робочих місцях встановлюються фотодіоди ФД, які вказують на недостатню освітленість.

3.7 Характеристика електромагнітного випромінювання оптичного діапазону

Електромагнітне випромінювання — взаємопов'язані коливання електричного (E) і магнітного (B) полів, що утворюють електромагнітне поле а також, процес утворення вільного електро-магнітного поля при нерівномірному русі та взаємодії електричних зарядів. Основні характеристики — частота та довжина хвилі. Довжина хвилі залежить від швидкості розповсюдження випромінювання [42].

Електромагнітне випромінювання прийнято ділити по частотним діапазонам на:

- радіохвилі;
- оптичне випромінювання (інфрачервоне, ультрафіолетове);
- жорсткі хвилі (рентгенівське випромінювання, гамма-випромінювання).

Енергія електромагнітного поля, яка поглинається тканинами організму, перетворюється в тепло, можливе підвищення температури тіла. Перегрівання органів та тканин веде до захворювання.

Електромагнітні поля можуть викликати гальмування рефлексів, зниження кров'яного тиску, зміни складу крові, помутніння кришталика ока.

До ультрафіолетового випромінювання (УФ) відносяться електромагнітні хвилі з довжиною хвилі від 380 нм до 10 нм. Цей діапазон поділяють на дві області: ближню від 380 нм до 200 нм та далеку (вакуумну) від 200 до 10 нм. Термін «вакуумна» область застосовується тому, що дослідження УФ випромінювання з нм проводяться в вакуумі через його сильне поглинання в повітрі.

Ультрафіолетове випромінювання по своїй біологічній активності поділяють на три області:

- УФ — А (380...315 нм) володіє відносно невеликою біологічною активністю;
- УФ — В (315...280 нм) значніше впливає на біологічні об'єкти;
- УФ — С (280...100 нм) шкідливо впливає на людину, рослин, здатне знищувати бактерії.

Тривала дія значних доз УФ може призвести до ураження очей та шкіри. Ураження очей гостро проявляються у вигляді фото або електрофтальмії. Тривала дія УФ довжиною хвилі 200...280 нм може призвести до утворення ракових клітин. Уф впливає на центральну нервову систему, викликає головний біль, підвищення температури, нервові збудження, зміни у шкірі та крові.

Інфрачервоне випромінювання — це електромагнітні хвилі довжиною від 700 нм до 1000 мкм, енергія яких при поглинанні викликає тепловий ефект [43].

Джерелом інфрачервоного випромінювання є будь-яке тіло, температура поверхні якого перевищує температуру абсолютного нуля.

Спектральний склад випромінювань інфрачервоного діапазону залежить від поверхні температури тіла. Чим вища температура тіла, тим коротша довжина випромінюваної електромагнітної хвилі.

Для захисту людини від інфрачервоного випромінювання використовують декілька способів.

Захист відстанню. Цей спосіб полягає в тому, що при віддаленні від джерела випромінювання густина потоку енергії зменшується пропорційно відстані від нього.

Захист часом передбачає обмеження перебування людини в зоні інфрачервоного випромінювання.

Для захисту очей використовують спеціальні окуляри зі скельцями жовто-зеленого або синього кольору.

Дії інфрачервоних променів зводяться до нагріву шкіри, очей, до порушення діяльності центральної нервової системи, серцево-судинної системи, органів травлення, сонячного удару, запаморочення, втрати

свідомості, порушення координації рухів, ураження мозкових тканин (див. табл. 3.4).

Таблиця 3.4 — Вплив ІЧ випромінювання на людину

Інтенсивність ІЧ опромінення, Вт/м ²	Тривалість періодів безперервного опромінювання, хв	Тривалість перерв, хв	Сумарне опромінення протягом зміни, %
350	20,0	8	До 50
750	15,0	10	До 45
1050	12,0	12	До 40
1400	9,0	13	До 30
1750	7,0	14	До 25
2100	5,0	15	До 15
2450	3,5	17	До 15

Засоби захисту: теплоізоляція та охолодження випромінювальних поверхонь, екранування джерел випромінювання, застосування засобів індивідуального захисту, організація раціонального режиму праці і відпочинку [44].

ВИСНОВКИ

В дипломній роботі проведено аналіз використання роторних кавітаторів для очищення стічних вод.

Стічні води, які містять органічні сполук, передусім ароматичного ряду спричиняють зміни в природних та штучних водних екосистемах, негативно впливають на здоров'я людей.

Для зменшення негативного впливу таких середовищ перед скиданням у каналізаційні мережі їх необхідно очищувати, відповідно до вимог чинних нормативних документів, на локальних очисних спорудах підприємств.

Серед різних за фізико-хімічними основами методів очищення стічних вод найбільший практичний інтерес викликають деструктивні окисні, які дають змогу забезпечити мінералізацію органічних домішок, тобто окиснення до CO_2 і води.

Ефективність деструктивних окисних методів істотно зростає у разі введення у реакційну систему дискретно-імпульсної енергії у вигляді акустичних коливань, які спричиняють явище кавітації. Поєднання таких методів відповідає сучасним концепціям. Зважаючи на зазначене вище, предметом дисертаційної роботи є встановлення раціональних або оптимальних технологічних умов здійснення кавітаційно-окисного процесу

У третьому розділі «Охорона праці та технологічна безпека» розглянуто характеристики небезпечних та шкідливих виробничих факторів та прийняті міри по їх усуненню, а також розглянуто заходи з поліпшення умов праці.

ПЕРЕЛІК ДЖЕРЕЛ ПОСИЛАНЬ

1. Бердишев, М. Ю. Прикладні питання тепломасообміну [Текст] : навч.-метод. посібник для студ. ЗДІА спец. 7.090510 і 8.090510 "ТЕ" всіх форм навчання : навч. посібник / М. Ю. Бердишев, І. Г. Яковлева // ЗДІА. - Запоріжжя : ЗДІА, 2012. - 134 с.
2. Кравченко, В.І. Вибір холодоагентів для теплових насосів. / В.І. Кравченко, В.В. Рошак // Наукові записки КНТУ. Кіровоград: КНТУ, вип.11, ч.І, - 2011 – с.165-168.
3. Рей, Д., Макмайл Д. Тепловые насосы. – М.: Энергоиздат, 1982. - 218 с.
4. Янговский, Е.И., Пустовалов Ю.В. Парокомпрессионные теплонасосные установки. – М.: Энергоиздат, 1982. - 144 с.
5. Перельштейн, И.И., Парушин Е.Б. Термодинамические и теплофизические свойства рабочих веществ холодильных машин и тепловых насосов. – М.: Легкая и пищевая промышленность, 1984. – 123 с.
6. Матвієнко, В. М., О. Ю. Ковтун. Конференція сторін Віденської конвенції про охорону озонного шару// Українська дипломатична енциклопедія: У 2-х т. /Редкол.:Л. В. Губерський (голова) та ін. — К: Знання України, 2004 — Т.1 — 760с. ISBN 966-316-039-X
7. Ткаченко, С. Й. Парокомпресійні теплонасосні установки в системах теплопостачання. Монографія / С. Й. Ткаченко, О. П. Остапенко. – Вінниця: УНІВЕРСУМ-Вінниця, 2009. – 176 с.
8. Янговский, Е. И. Парокомпрессионные теплонасосные установки / Е. И. Янговский, Ю. В. Пустовалов. – М. : Энергоиздат, 1982. – 144 с.
9. Термодинамические диаграммы $i\text{-lg}P$ для хладагентов. М.: АВИСАНКО, 2003. – 50 с.
10. Ткаченко, С. Й. Систематизація інформації з розробки, дослідження та впровадження теплонасосних установок / С. Й. Ткаченко, О. П. Остапенко //

Сучасні технології, матеріали і конструкції в будівництві: науково-технічний збірник. – Вінниця : УНІВЕРСУМ-Вінниця, 2007. – № 4. – С. 176–184.

11. Ткаченко, С. Й. Узагальнена теплотехнологічна система з теплонасосною установкою / С. Й. Ткаченко, О. П. Остапенко // Сучасні технології, матеріали і конструкції в будівництві: науковотехнічний збірник. – Вінниця : УНІВЕРСУМ-Вінниця, 2006. – № 3. – С. 136–141.

12. Остапенко, О. П. Перспективи застосування теплонасосних станцій в Україні / О. П. Остапенко, О. В. Шевченко / Сучасні технології, матеріали і конструкції в будівництві: науково-технічний збірник. – Вінниця : УНІВЕРСУМ-Вінниця. – 2011. – № 2. – С. 132–139.

13. Долинский, А. А. Тепловые насосы в теплоснабжении / А. А. Долинский, Е. Т. Базеев, А. И. Чайка // Промышленная теплотехника. – 2006. – Т.28, № 2. – С. 99–105.

14. Groff, G. G. Heat pumps in USA: 1950-1990 / G. G. Groff // International edition, 1980. – А. 38. – 46 p.

15. Проценко, В. П. Тепловые насосы в капиталистических странах / В. П. Проценко // Теплоэнергетика. - 1998. - № 3. – С. 70 – 74.

16. Янтовский, Е. И. Теплонасосные станции в энергетике / Е. И. Янтовский, Ю. В. Пустовлов, В. С. Янков // Теплоэнергетика. - 1987. - № 4. – С. 46 – 49.

17. Чепурний, М. М. Аналіз енергетичної ефективності застосування теплонасосних установок в системах централізованого теплопостачання / М. М. Чепурний, С. Й. Ткаченко, О. П. Остапенко // Вісник Вінницького політехнічного інституту. - 2002. - № 4. – С. 52 – 55.

18. Клер, А. М. Сопоставление эффективности использования низкотемпературной теплоты для комбинированной теплопроизводящей установки с тепловым насосом / А. М. Клер, А. Ю. Мариненко // Сб. Энергетика: управления, качество и эффективность использования энергоресурсов. – 2003. – Т. 2. – С. 278 – 283.

19. Беляева, Г. Г. Оценка экономической целесообразности использования тепловых насосов в коммунальной энергетике Украины / Г. Г. Беляева, А. А. Рутенко, О. В. Басок // Пром. Теплотехника. - 2009. – Т. 31. - № 5. – С. 81 - 87.
20. Чепурний, М. М. Показники ефективності роботи енергетичних установок для сумісного виробництва теплової та електричної енергії [Електронний ресурс] / М. М. Чепурний, С. Й. Ткаченко, Н. В. Пішеніна // Наукові праці Вінницького національного технічного університету. - № 1. – 2010. Режим доступу: http://www.nbu.gov.ua/e-journals/VNTU/2010_1/2010-1.files/uk/10mmcaee_ua.pdf.
21. Бэр, Г. Д. Техническая термодинамика / Г. Д. Бэр. – М.: Мир, 1977. – 318 с.
22. Чепурний, М. М. Аналіз впливу температур на ефективність роботи теплоносних установок / Чепурний М. М., Ткаченко С. Й., Куть Т. П. // Вісник Вінницького політехнічного інституту. - 2001. - № 4. – С. 53 – 56.
23. Кименов, Г. А. Техническая термодинамика / Г. А. Кименов. – Техника: София, 1981. – 374 с.
24. Мартынов, А. А. Кондиционирование воздуха в действующих рабочих шахтах / Мартынов, А. А., Лунев С. Г., Яковенко А. К., Солдатов В.И., Розенберг А. С. // Уголь Украины. – 2002. – №5. – с. 44 – 48
25. Рей, Д. Экономия энергии в промышленности. Пер. с англ. – М.: Энергоатомиздат, 1983. – 208 с.
26. Васильев, Г. П. Использование низкопотенциальной тепловой энергии земли в теплонасосных системах / Васильев Г. П., Шилкин Н. В. // АВОК. – 2003. – № 2. с. 56 – 60
27. Попов, А. В. Анализ эффективности различных типов тепловых насосов // Проблемы энергосбережения. – 2005. – № 1 – 2.
28. Рей, Д., Макмайл Д. Тепловые насосы. Пер. с англ. – М.: Энергоатомиздат, 1982. – 224с.

29. Фиалко, Н. М. Оценка эффективности применения тепловых насосов в условиях метрополитенов и угольных шахт / Фиалко Н. М., Зимин Л. Б. // Пром. теплотехника. – 2006. – Т.28. – № 2. – с. 111 – 119.
30. Снежкін, Ю.Ф. Використання теплових насосів у процесах сушіння / Снежкін, Ю.Ф., Чалаєв Д.М., Шаврін В.С., Хавін О.О., Дабіжа Н.О. // Пром. теплотехника. – 2006. – Т.28. – № 2. – с. 106 – 109.
31. Святун, А.А. Концепция энергетического рециклинга в технологическом процессе конвективной сушки измельченных материалов с рециркуляцией воздуха на мусороперерабатывающем заводе / Святун А.А., Ключев Э.С. // Матеріали міжнародної наукової конференції “Прикладні проблеми аерогідромеханіки та тепломасопереносу”. – Дніпропетровськ, ДНУ, 2008, с. 153 – 154.
32. Янтовский, Е.И. Промышленные тепловые насосы. / Янтовский Е.И., Левин Л.А. / М.: Энергоатомиздат, 1989. – 128 с.
33. Васильев, Г. П. Эффективность и перспектива использования тепловых насосов в городском хозяйстве Москвы // Энергосбережение. – 2007. – № 8. – с. 63 – 65
34. Наздрашов, М.Н. Комплексный подход к вопросу отопления, вентиляции и горячего водоснабжения административных, культурно-бытовых и жилых зданий // Новости теплоснабжения. – 2000. – № 02. – с. 35 – 38.
35. Фролов, В. П. Эффективность использования тепловых насосов в централизованных системах теплоснабжения / Фролов В. П., Щербаков С.Н., Фролов М.В., Шелгинский А.Я. // Новости теплоснабжения. – 2004 – №7
36. Шилкин, Н. В. Использование тепловых насосов в системах горячего водоснабжения зданий // Сантехника. – 2003. – № 3. – с. 65 – 67
37. Геотехническая механика. Электрификация горных работ: Учебн. для вузов / Под ред. Волотковского С.А. – К.: Вища школа, 1980.– 448 с
38. Холодильні установки: Підручник: У двох книгах. Кн.2 / І. Г. Чумак, В. П. Чепурненко, С. Ю. Лар’янівський та ін. – К.: Либідь, 1995. – 224 с

39. Бердищев, М.Ю. Низькопотенційні та альтернативні джерела енергії. Навчально-методичний посібник для студентів ЗДІА Енергетичного напрямку всіх форм навчання/ Бердищев М.Ю, Чейлитко А.О., Назаренко О.М. Запоріжжя: Видавництво ЗДІА, 2015. – 270 с.
40. Сулов, А. Воздушные тепловые насосы: возможности и ошибки маркетинга // Акватерм. – 2010. - № 4. – С.22 – 24.
41. Коврига, Т. Лідер енергозберігаючих технологій / Т.Коврига // Энергосбережение. – 2009. – №9. – С. 4–5
42. Мних Р.В. Кавітаційна активація малорозчинних неорганічних реагентів у технологіях очищення стічних вод (на прикладі кальцію гідроксиду): автореф. дис. на здобуття наук. ступеня канд. техн. наук: спец. 05.17.21 “Технологія водоочищення” // Р.В. Мних. - К., 2014. - 20 с.
43. Воронкін О.С. Фізико-хімічні перетворення при енергетичних взаємодіях із водою в перспективних технологіях її очищення та знезаражування / О.С. Воронкін, О.Д. Єгізарян // Вісник КДПУ імені Михайла Остроградського. - 2008. - Вип. 5 (52), Ч. 1. - с. 27-31.
44. Попова Н.В. Изучение влияния ультразвукового воздействия на показатели качества воды / Н.В. Попова, С.А. Фатеева // Вестник ЮУрГУ. - 2014. - Т. 2, № 1. - с. 30-33. - (Серия “Пищевые и биотехнологии”).
45. Знак З.О. Інтенсифікація очищення стоків ВАТ “Карпатнафтохім” розчинами натрію гіпохлориту в кавітаційних полях / З.О. Знак, Н.М. Гнатишин 174 // Вісник Національного університету “Львівська політехніка”. Хімія, технологія речовин та їх застосування. - 2013. - № 761. - с. 12-16.
46. Banduch I. Die Wirkung von Ultraschall auf die mikrobiologische Diversität und Abbauleistung eines biologischen Reaktors zur Abwasserreinigung: genehmigte Dissertation zur Erlangung des akademischen Grades Doktor-Ingenieurin / I. Banduch. - Hamburg, 2011. - 136 s.
47. Benito Y. Tratamiento de efluentes industriales mediante cavitation hidrodinamica / Y. Benito, S. Arrojo // Tecnologia del agua. - 2006. - Nu. 279. - pp. 38-41.

48. Rajendrasinh R. Gaekwad, Reshma L. Patel. Pesticide wastewater treatment by hydrodynamic cavitation process / Rajendrasinh R. Gaekwad, Reshma L. Patel. // International Journal of Advance Research in Engineering, Science & Technology(IJAREST) - 2015. - Vol.2, Iss. 5. - pp. 1-5.
49. Manisha V.Bagal, Parag R.Gogate. Wastewater treatment using hybrid treatment schemes based on cavitation and Fenton chemistry: A review / Manisha V.Bagal, Parag R.Gogate. // Ultrasonics Sonochemistry - 2014. - Vol.21, Iss. 1. - pp. 1-14.
50. Chakinala, Anand G. ; Gogate, Parag R. ; Burgess, Arthur E. ; Bremner, David H. Industrial wastewater treatment using hydrodynamic cavitation and heterogeneous advanced Fenton processing / Chakinala, Anand G. ; Gogate, Parag R. ; Burgess, Arthur E. ; Bremner, David H. // Chemical Engineering Journal - 2009. - Vol. 152, No. 2-3. - pp. 498-502.
51. P. R. Gogate, P. N. Patil. Combined treatment technology based on synergism between hydrodynamic cavitation and advanced oxidation processes / P. R. Gogate, P. N. Patil // Ultrasonics Sonochemistry - 2015. - Vol.25 - pp. 60-69.
52. Kyung-Won Junga, Min-Jin Hwanga, Yeo-Myeong Yunb, Min-Jung Chaa, Kyu- Hong Ahna. Development of a novel electric field-assisted modified hydrodynamic cavitation system for disintegration of waste activated sludge / Kyung-Won Junga, Min-Jin Hwanga, Yeo-Myeong Yunb, Min-Jung Chaa, Kyu-Hong Ahna // Ultrasonics Sonochemistry - 2014. - Vol.21, Iss. 5. - pp. 1635-1640.
53. Xian-wu Luo, Bin Ji, Yoshinobu Tsujimoto. A review of cavitation in hydraulic machinery / Xian-wu Luo, Bin Ji, Yoshinobu Tsujimoto // Journal of Hydrodynamics - 2016. - Vol.28, Iss. 3. - pp. 335-358.
54. Parag R. Gogate, Rajiv K. Tayal, Aniruddha B. Pandit. Cavitation: A technology on
55. the horizon / Parag R. Gogate, Rajiv K. Tayal, Aniruddha B. Pandit / Current science - 2006. - Vol. 91, No. 1. - pp. 35-46.

56. De la Cruz J.L.R. Un experimento de enseñanza e investigación sobre el fenómeno de la cavitación en bombas centrifugas / J.L.R. de la Cruz, G.R. Chavarria, S.H. Zapata // Lat. Am. J. Phys. Educ. - 2010. - Vol. 4, Suppl. 1. - pp. 915-924.