

**НАЦІОНАЛЬНИЙ ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ УКРАЇНИ
«КИЇВСЬКИЙ ПОЛІТЕХНІЧНИЙ ІНСТИТУТ
імені ІГОРЯ СІКОРСЬКОГО»**

Факультет хіміко-технологічний.

Кафедра кібернетики хіміко-технологічних процесів.

«На правах рукопису»
УДК 541.13

«До захисту допущено»

Завідувач кафедри

Т.В. Бойко

« » грудня 2018 р.

Магістерська дисертація

на здобуття ступеня магістра

**зі спеціальності 151 Автоматизація та комп'ютерно-інтегровані
технології**

на тему: «Математичне моделювання процесу озонування води»

Виконав:

Студент VI курсу, групи ХА-71мп

Тріщ Віталій Русланович

Керівник:

Доц. каф. КХТП, к.т.н., доц.,

Безносик Ю.О.

Консультант з «Startup»:

Доц. каф. ЕП, к.е.н., доц.,

Тюленєва Ю.В.

Рецензент:

Засвідчую, що у цій магістерській
дисертації немає запозичень з праць
інших авторів без відповідних
посилань.

Студент _____

Київ – 2018 року

Національний технічний університет України
«Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»

Факультет хіміко-технологічний.

Кафедра кібернетики хіміко-технологічних процесів.

Рівень вищої освіти – другий (магістерський) за освітньо-професійною програмою

Спеціальність (спеціалізація) – 151 Автоматизація та комп'ютерно-інтегровані технології

ЗАТВЕРДЖУЮ

Завідувач кафедри

_____ Т.В. Бойко

«__»_вересня_2017 р.

ЗАВДАННЯ
на магістерську дисертацію студенту
Трищ Віталій Русланович

1. Тема дисертації «Математичне моделювання процесу озонування води», науковий керівник дисертації Безносик Юрій Олександрович к.т.н., доц., затверджені наказом по університету від «__»_____20__ р. №_____

2. Термін подання студентом дисертації __10 грудня 2018 р._____

3. Об'єкт дослідження _____

4. Вихідні дані _____

5. Перелік завдань, які потрібно розробити _____

6. Орієнтовний перелік графічного (ілюстративного) матеріалу _____

7. Орієнтовний перелік публікацій _____

8. Консультанти розділів дисертації

Розділ	Прізвище, ініціали та посада консультанта	Підпис, дата	
		завдання видав	завдання прийняв
«Startup»	Тюленєва Ю.В., доц.		

9. Дата видачі завдання 4 вересня 2017 р.

Календарний план

№ з/п	Назва етапів виконання магістерської дисертації	Термін виконання етапів магістерської дисертації	Примітка
1	Розробка календарного плану	11.09.2017	
2	Пошук літературних джерел стосовно процесу розпаду озону	12.09.2017 – 20.06.2018	
3	Розроблення математичних моделей процесу озонування води	12.04.2018 – 20.09.2018	
4	Публікація матеріалів магістерської дисертації		
5	Розроблення програмного забезпечення для вирішення задачі	29.09.2018 – 20.11.2018	
6	Оформлення пояснювальної записки магістерської дисертації	01.12.2018 – 05.12.2018	
7	Підготовка доповіді до захисту роботи	02.12.2018 – 07.12.2018	

Студент

(підпис)

В.Р. Тріщ

Науковий керівник дисертації

(підпис)

Ю.О. Безносик

РЕФЕРАТ

Магістерська дисертація містить 147 сторінок, 20 рисунків, 24 таблиці, 6 додатків, 49 джерел.

ОЗОН, ОЗОНУВАННЯ, ОЗОНАТОР, КОМП'ЮТЕРНЕ МОДЕЛЮВАННЯ, РЕАКТОР, КІНЕТИКА, ПРОГРАМНЕ ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ, СТАРТАП-ПРОЕКТ, МАТЕМАТИЧНА МОДЕЛЬ

Об'єкт дослідження – комп'ютерне моделювання кінетики процесу розпаду озону в водному середовищі.

Мета роботи – розроблення програмного забезпечення для моделювання процесу озонування води.

Методи дослідження – комп'ютерне моделювання, побудова математичних моделей розпаду озону в водному середовищі.

Розглянуто процес озонування води, розроблено математичну модель розпаду озону в водному середовищі.

Результатом даної роботи є обчислювальний модуль, який можна використовувати для обрахунку кінетики перебігу процесу.

Проведено комп'ютерне моделювання процесу озонування води та розроблено стартап-проект.

Актуальність роботи. Очищення води залишається найгострішою проблемою, близько 90% всіх використовуваних водних ресурсів потребують очистки. При очистці води озоном не утворюються хлоровані вуглеводнів, які утворюються в процесі хлорування. Так, як озон є сильним окисником, що руйнує віруси і бактерії.

Зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами. Магістерська дисертація виконувалась згідно до завдань Ініціативної науково-дослідної роботи кафедри КХТП «Інтелектуальна система для розроблення еко-безпечних процесів знешкодження шкідливих викидів» (№ держреєстрації 0117U007338, 2017-2021).

Апробація результатів дисертації. Основні результати роботи доповідались на VII Міжнародній конференції студентів, аспірантів та молодих вчених з хімії та хімічної технології (Київ, 2018), VI Міжнародній науково-практичній конференції «Комп'ютерне моделювання в хімії і технологіях» (Київ, 2018), II Всеукраїнської студентської науково-практичної конференції з міжнародною участю (Київ, 2018).

Публікації. За матеріалами магістерської дисертації опубліковано 1 статтю та 2 тез доповідей в збірниках матеріалів конференцій.

РЕФЕРАТ

Магистерская диссертация содержит: 147 страниц, 20 рисунков, 24 таблицы, 6 приложений, 49 источников.

ОЗОН, ОЗОНИРОВАНИЕ, ОЗОНАТОР, КОМПЬЮТЕРНОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ, РЕАКТОР, КИНЕТИКА, ПРОГРАММНОЕ ОБЕСПЕЧЕНИЕ, СТАРТАП-ПРОЕКТ, МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ

Объект исследования - компьютерное моделирование кинетики процесса распада озона в водной среде.

Цель работы - разработка программного обеспечения для моделирования процесса озонирования воды.

Методы исследования - компьютерное моделирование, построение математических моделей распада озона в водной среде.

Рассмотрен процесс озонирования воды, разработана математическая модель распада озона в водной среде.

Результатом данной работы является вычислительный модуль, который можно использовать для расчета кинетики протекания процесса.

Проведено компьютерное моделирование процесса озонирования воды и разработан стартап-проект.

Актуальность работы. Очистка воды остается острой проблемой, около 90% всех используемых водных ресурсов требуют очистки. При очистке воды озоном не образуются хлорированные углеводороды, которые образуются в процессе хлорирования. Так, как озон является сильным окислителем, что разрушает вирусы и бактерии.

Связь работы с научными программами, планами, темами. Магистерская диссертация выполнялась согласно задач Инициативной научно-исследовательской работы кафедры КХТП «Интеллектуальная система для разработки эко-безопасных процессов обезвреживания вредных выбросов» (№ госрегистрации 0117U007338, 2017-2021).

Апробация результатов диссертации. Основные результаты работы докладывались на VII Международной конференции студентов, аспирантов и молодых ученых по химии и химической технологии (Киев, 2018), VI Международной научно-практической конференции «Компьютерное моделирование в химии и технологиях» (Киев, 2018), II Всеукраинской студенческой научно-практической конференции с международным участием (Киев, 2018).

Публикации. По материалам магистерской диссертации опубликовано 1 статью и 2 тезисы докладов в сборниках материалов конференций.

ABSTRACT

Master's graduate work consist of 147 pages, 20 figures, 24 tables, 6 appendices, 49 sources.

OZONE, OZONIZATION, OZONATOR, COMPUTER MODELING, REACTOR, KINETICS, SOFTWARE, STARTUP, MATHEMATICAL MODEL

The object of the research is computer simulation of the kinetics of the ozone decomposition process in the aquatic environment.

The purpose of the work is to develop software for modeling of water ozonation process.

The process of water ozonation has been developed, a model of ozone decay in the aquatic environment has been developed.

The result of this work is a software product that can be used to calculate the kinetics of the process.

A computer simulation of the water ozonation process was carried out and a startup was developed.

Relevance of the work. Water purification remains an acute problem, about 90% of all water resources used require purification. During water purification with ozone, chlorinated hydrocarbons that are formed during the chlorination process are not formed. So, as ozone is a strong oxidizing agent that destroys viruses and bacteria.

Communication work with scientific programs, plans, themes. The master's thesis was carried out according to the tasks of the Initiative research work of the department of the KXTP "Intellectual system for the development of eco-safe processes for the neutralization of harmful emissions" (state registration number 0117U007338, 2017-2021).

Approbation of the results of the thesis. The main results of the work were reported at the VII International Conference of Students, Postgraduates and Young Scientists in Chemistry and Chemical Technology (Kiev, 2018), VI International Scientific and Practical Conference "Computer modeling in chemistry and technologies" (Kiev, 2018), the II All-Ukrainian Student Scientific and Technical Conference practical conference with international participation (Kiev, 2018).

Publications. According to the materials of the master's thesis 1 article and 2 theses of reports are published in collections of conference materials.

ЗМІСТ

ПЕРЕЛІК УМОВНИХ ПОЗНАЧЕНЬ.....	9
ВСТУП	10
1 МЕТОДИ ОЧИСТКИ ВОДИ.....	13
1.1 Виробництво озону	21
1.1.1 Енергетика виробництва озону	21
1.1.2 Конструкції озонаторів	30
1.2 Змішання озону з водою.....	39
1.3 Фізико-хімічні основи технологічного процесу	48
1.4 Постановка задачі магістерської дисертації.....	56
2 КІНЕТИЧНІ МОДЕЛІ РОЗПАДУ ОЗОНУ В ВОДНОМУ СЕРЕДОВИЩІ.....	57
2.1 Розрахунок кінетичної моделі SBH.....	57
2.2 Розрахунок кінетичної моделі TFG.....	61
2.3 Модель «вплив пероксиду водню на розпад озону»	64
2.4 Розрахунок кінетичної моделі NFG	67
2.5 Реакції, що не увійшли в кінетичні моделі SBH, TFG і NFG .	68
2.6 Вплив фосфатного буфера на кінетичну модель розпаду озону.....	69
3 МАТЕМАТИЧНЕ МОДЕЛЮВАННЯ ПРОЦЕСУ ОЗОНУВАННЯ	72
3.1 Технічне завдання на розробку обчислювального модуля	72
3.2 Математичне забезпечення обчислювального модуля	72
3.2.1 Рішення жорстких систем методом Розенброка.....	80

3.3 Структура і технічні характеристики обчислювального модуля	85
3.4 Інструкція користувачу програмного продукту	87
4 РОЗРОБЛЕННЯ СТАРТАП-ПРОЕКТУ	92
4.1 Аналіз зовнішнього та внутрішнього середовища стартапу ..	95
4.2 Паспорт споживача	100
4.3 Аналіз джерел фінансування стартапу	101
4.4 Розрахунок ціни інноваційної пропозиції на ринку	105
4.5 Стратегія конкурентної поведінки на ринку	113
4.6 Вибір бізнес-моделі стартапу.....	114
4.7 Карта бізнес-процесів виконання стартап-проекту	116
4.8 Системний аналіз бізнес-процесів стартап-проекту.....	118
4.9 Оцінка ризиків і страхування розробки.....	119
4.10 Господарські ризики та страхування розробки	119
ВИСНОВКИ.....	123
ПЕРЕЛІК ПОСИЛАНЬ	124
ДОДАТОК А	129
ДОДАТОК Б	131
ДОДАТОК В.....	133
ДОДАТОК Д.....	135
ДОДАТОК Е	137
ДОДАТОК Ж.....	139

ПЕРЕЛІК УМОВНИХ ПОЗНАЧЕНЬ

Умовні позначення:

NFG (Nemes, Fabian, Gordon);

SBH (Staehelin, Buhler, Hoigne);

TFG (Tomiyasu, Fukutomi, Gordon);

VSC – Visual Studio Communiti;

A – амортизація основних фондів, грн;

НДР – науково-дослідна робота;

ОЗ – основні засоби, грн;

ОбК – обігові кошти, грн;

П – прибуток, грн;

Р – Рентабельність, грн;

С – собівартість, грн;

ТОВ – товариство з обмеженою відповідальністю;

ФОП – фонд оплати праці, грн;

Ц – ціна, грн;

ВСТУП

Очищення води - найгостріша проблема сьогодення. Об'єм забрудненої води постійно збільшується, і навіть та, що використовується для водопостачання, часто не може похвалитися по-справжньому високою якістю. Близько 90 % всіх використовуваних водних ресурсів потребують постійного очищення, а існуючі джерела прісної води не справляються з потребами, які пред'являють мільярди людей в цілому, так і окремі міста, організації і землевласники.

Реальними практичними методами, що володіють необхідним потенціалом знезараження води і пройшли перевірку на діючих великомасштабних спорудах водопідготовки, сьогодні є хлорування, озонування та ін. Хлорування - найбільш поширений спосіб обробки питної води.

Альтернативою процесу хлорування води є її знезараження за допомогою озону.

Озон (O_3) - газ блідо-фіолетового кольору, що володіє специфічним запахом, є природним окислювачем, при контакті з водою окисляє наявні домішки і переводить їх з розчиненого стану в суспензію, яку, в свою чергу, затримує вугільний фільтр. Залишкова кількість озону переходить знову в кисень, з якого він був зроблений. Справа в тому, що велика частина найпоширеніших забруднень води - органічного походження і вони мають схильність до окислення озоном. Його молекула вельми нестійка, легко розпадається (дисоціюють) [1].

У природі озон утворюється у верхніх шарах атмосфери (на висоті 15...30 км) з кисню під впливом УФ-випромінювання Сонця, а крім того, при дуговому зварюванні, при роботі електричних трансформаторів, ксероксів, лазерних принтерів, при ударі блискавки. Озон як складова частина атмосферного повітря визначає характер поглинання сонячної

радіації: її дуже активна в біологічному відношенні ультрафіолетова частка не досягає земної поверхні. А вміст озону, загалом-то, мізерний: товщина шару, приведеного до нормальних тиску і температур, в середньому для всієї Землі становить 2,5...3 мм. Максимум концентрації озоносферного шару досягається на висоті 20...25 км.

Існує кілька способів отримання озону, серед яких найбільш поширеними є: електролітичний, фотохімічний і електросинтез в плазмі газового розряду. Електролітичний (так званий брудний) метод синтезу озону здійснюється в спеціальних електролітичних осередках. В якості електролітів використовуються розчини різних кислот та їх солі (H_2SO_4 , $HClO_4$, $NaClO_4$, $KClO_4$). Виникнення озону відбувається за рахунок [2] електролітичного розкладання води і створення атомарного кисню, який, приєднуючись до молекули кисню, утворює озон і молекулу водню.

Цей метод дозволяє отримувати концентрований розчин озону, але в силу своєї енергоємності і наявності домішок широкого застосування не знайшов. Фотохімічний метод отримання озону ґрунтується на дисоціації молекули кисню під дією короткохвильового УФ випромінювання. Цей метод не дозволяє отримувати озон високої концентрації. Метод знайшов застосування в медицині, харчовій, електронній промисловості. При його використанні зручно стерилізувати повітря в приміщеннях, які вимагають особливої біологічної чистоти. Електросинтез озону (чистий метод), заснований на різних видах газового розряду, а саме: бар'єрного, поверхневого і імпульсного, набув найбільшого поширення. Цей метод дозволяє отримувати озон високих концентрацій при великій продуктивності і невисоких енерговитратах обладнання.

У промислових умовах озono-повітряну суміш отримують в озонаторе за допомогою "повільного" електричного розряду при напрузі 8000...10000 В.

Процес озонування, як і процес хлорування, здійснюється просто шляхом контакту води з газом. Озон - дуже сильний окиснювач, що руйнує бактерії і віруси. На відміну від хлорування, при якому хлор може з'єднуватися з вуглеводнями, що містяться у воді, при озонуванні хлорованих вуглеводнів не утворюється; навпаки, озон може руйнувати присутні у воді вуглеводні шляхом їх окислення. Більш того, озон сам по собі ефективний при знебарвленні води і не створює стороннього присмаку і запаху.

Застосування озонування води досить широко поширене. Найчастіше воно використовується в харчовій промисловості при дезінсекції приміщень, детоксикації зернових, виробництво харчового льоду, в різних технологічних процесах, таких як виробництво мінеральної води. Також озонування застосовується в медицині, паперово-целюлозної галузі, сільському господарстві, в рибництві та рослинництві, при очищенні і стерилізації стічних вод, для підготовки плавальних басейнів і так далі.

Метою магістерської дисертації є дослідження процесу очистки води методом озонування, його основних технологічних параметрів.

1 МЕТОДИ ОЧИСТКИ ВОДИ

З числа відомих методів очищення води багато з них перебувають поки на стадії чисто наукових розробок (до них відносяться, наприклад, пропускання постійного, змінного або імпульсного струму, кавітація, радіаційне опромінення рентгеном, гамма-квантами або прискореними електронами). Реальними практичними технологіями є хлорування, озонування та ультрафіолетове (УФ) опромінення. Кожна з цих технологій має переваги і недоліки по оптимальності в технологічному процесі, характер впливу на воду і його наслідків, економічна ефективність, можливості і витрати на впровадження технології в існуючі системи водоочищення. Вибір конкретної технології повинен ґрунтуватися на комплексному аналізі цих переваг і недоліків з гігієнічної, техніко-експлуатаційної та економічної точок зору.

Найбільш поширений спосіб знезараження питної води - хлорування, заснований на здатності вільного хлору та його сполук "пригнічувати" ферментні системи мікробів, що каталізують окислювально-відновні процеси. Для знезараження питної води застосовують хлор, двоокис хлору, хлорамін і хлорне вапно. Широкому розповсюдженню хлору у технологіях водопідготовки сприяє його ефективність при знезараженні природних вод і здатність консервувати вже очищену воду тривалий час. Крім того, попереднє хлорування води дозволяє знизити кольоровість води, усунути її запах і присмак, зменшити витрату коагулянтів, а також підтримувати задовільний санітарний стан очисних споруд станцій водопідготовки.

Хлорування процес знезараження води із застосуванням хлорвмісних агентів, які вступають в реакцію з водою або розчиненими в ній солями. Внаслідок взаємодії хлорвмісних агентів з протеїнами і аміносполуками, які містяться в оболонці бактерій і їх внутрішньоклітинному речовині, відбуваються окислювальні процеси, хімічні зміни внутрішньоклітинної

речовини, розпад структури клітин і загибель бактерій та інших мікроорганізмів.

Речовини, що містять активний хлор поділяються на дві групи: сильні окислювачі - хлор, гіпохлорити натрію і кальцію і хлорнуватиста кислота - містять так званий "вільний активний хлор", і менш сильні окислювачі - хлораміни - "пов'язаний активний хлор". Завдяки сильним окислювальним властивостям сполуки, що мають активний хлор використовують для дезінфекції питної води та води в басейнах, а також для хімічної очистки деяких стічних вод.

Найбільш широке поширення в якості сильного окислювача і знезаражувального агента отримав молекулярний хлор та його модифікації (гіпохлорити натрію і кальцію, хлористий амоній) [3].

Для станцій великої продуктивності використовують хлор-газ, що доставляється і зберігається в зрідженому стані в стандартних сталевих балонах місткістю від 25 до 69 кг. Для дозування у воду хлору використовують спеціальні апарати - хлоратори. Вільний хлор при розчиненні у воді диспропорціонує з утворенням соляної і хлорнуватистої кислот по реакції:

(1.1)

Потім відбувається дисоціація хлорнуватистої кислоти з утворенням гіпохлорит іона:

(1.2)

Не диссоційовані молекули хлорнуватистої кислоти володіють великою бактерицидною дією, ніж гіпохлорит іони. При величині рН = 5...6 хлор присутній у воді головним чином у вигляді хлорнуватистої кислоти. З підвищенням величини рН концентрація гіпохлорит іонів поступово зростає, досягаючи 97 % при рН = 9.

Якщо у хлорованій воді міститься природний аміак або азотовмісні органічні сполуки (наприклад, амінокислоти), то вільний активний хлор

вступає з ними в хімічну взаємодію і утворює хлораміни та інші хлорпохідні, так званий пов'язаний активний хлор.

У схемі освітлювальної обробки повинно бути передбачене подвійне хлорування води: прехлорування (до освітлення) і постхлорування (після освітлення).

Знезараження води хлором або препаратами, які містять хлор здійснюється такими дозами, щоб після повного окислення органічних речовин у воді залишався надлишок хлору, так званий залишковий хлор. Саме він надає воді антибактеріальну стабільність протягом певного (2...4 год) часу. Недостача хлору може призвести до не повного знезараження природних або стічних вод, а надлишок - до потрапляння в питну воду або у водойму вільного хлору. Для видалення надлишкового хлору зазвичай використовують реагенти - відновники (гідросульфід натрію, сірчистий ангідрид).

При нормальному хлоруванні питної води з подачею хлору після фільтрування і перед резервуаром чистої води дози становлять 2...3 мг/дм³ для води поверхневих вододжерел і 0,7...1 мг/дм³ для підземних вод. Контроль ефективності дезінфекції ведуть за залишковим хлором після 30 хвилинного контакту води з дозованим реагентом. У питній воді вміст залишкового хлору встановлено на рівні 0,3...0,5 мг/дм³ у вільному вигляді і на рівні 0,8...1,2 мг/дм³ у зв'язаному вигляді. Активний хлор у зазначених концентраціях присутній у воді нетривалий час (не більше кількох десятків хвилин) і остачі видаляється навіть при короткочасному кип'ятінні води.

При хлоруванні стічних вод через мінливість їх хімічного складу сувора дозування хлору утруднена. У природній воді вміст активного хлору не допускається. Доза хлору повинна в кожному конкретному випадку встановлюватися експериментально в результаті пробного хлорування.

Вибір апаратури й устаткування для знезараження води залежить від виду знезаражувального агента. При знезараженні води хлором основне призначення апаратури та обладнання - дозувати хлорреагент і забезпечити контакт води з хлором. Для знезараження води розчинами хлорного вапна або гіпохлоритов найбільшого поширення набула бочкова система, яка зображена на рисунку 1.1.

Рисунок 1.1 – Установка для знезараження води хлорним вапном:

1- затворний бак, 2 - розчинні баки, 3 - дозуючий бачок,
4 - трубопровід, 5 - воронка

Ефективність, доступність і помірна вартість, а так само великий досвід роботи з цим реагентом забезпечили хлору виняткову роль - більше

90% водопровідних станцій у світі знезаражують і знебарвлюють воду хлором, витрачаючи до 2 млн. тон цього рідкого реагенту на рік.

Однак хлор як реагент водопідготовки має суттєві недоліки. Наприклад, хлор і хлорвміщуючі сполуки володіють високою токсичністю, що вимагає суворого дотримання підвищених вимог техніки безпеки. Ці сполуки за даними численних досліджень по відношенню до людини мають високу токсичність, мутагенність і канцерогенність. Хлорування стічних вод перед скиданням у водойми призводить до того, що хлорпохідні і залишковий хлор, потрапляючи в природні водойми, мають негативний вплив на різні водні організми, викликаючи у них серйозні фізіологічні зміни і навіть їх загибель. Крім того, хлорорганічні сполуки є і забруднювачами питної води, так як, мають високу стійкість, викликають забруднення річок на значних відстанях вниз за течією, практично не видаляючись в процесі водо підготовки [4].

Вважається, що озонування є більш екологічно чистою технологією. Озонування, як засіб для знезараження, вперше було випробувано в 1886 р. у Франції. З 1905 р. в Росії почала діяти експериментальна установка для озонування води при Петропавловській лікарні. У 1911 р. в Петербурзі була введена в дію найбільша в світі виробнича установка озонування, обробляти 44 500 м³ води на добу. У світі на сьогоднішній день працює безліч систем водопідготовки, що використовують озонування: у Франції, Канаді, Швейцарії, Італії, Німеччини, Саудівської Аравії та ін.

Озонування води широко використовується, наприклад, при очищенні води з підземних та поверхневих джерел, оборотної води басейнів, очищення та стерилізації стічних вод, застосовується для знезараження води, призначеної для бутілювання, видаляючи з води всі неприємні присмаки і запахи, використовується для дезодорації повітря, очищення вентиляційних викидів і т.д.

Очищення питної води озонуванням - дуже затребувана процедура. Проведення озонування для отримання питної води дає такі результати:

- знижується кольоровість і поліпшується прозорість рідини;
- видаляються запахи і присмаки;
- видаляється марганець і залізо;
- окислюються і розкладаються сполуки азоту (аміак), ціаніди, сірководень і фенольні сполуки;
- окислюються нафтопродукти;
- відбувається дезінфекція та стерилізація.

У озонованій питній воді є, як корисні властивості, так і недоліки. При розпаді цього газу утворюється кисень у великій кількості, від чого поліпшуються лікувальні та смакові властивості рідини. Також озон володіє знезаражувальною властивістю, вбиваючи всі шкідливі мікроби і віруси, при цьому рН склад залишається без змін. Якщо говорити про мінуси застосування цього методу очищення, то варто бути обережнішими при тривалому вдиханні газу - він може надати шкідливий вплив на легені і дихальні шляхи.

Однією з переваг озону з гігієнічної точки зору є нездатність, на відміну від хлору, до реакцій заміщення, у воду не вносяться сторонні домішки і не виникають шкідливі для людини сполуки. Особливістю озону є і його швидке розкладання у воді з утворенням кисню, тобто озон володіє повною екологічною безпекою. Час "життя" озону у воді – 10...15 хв. Озон деколи використовують у поєднанні з іншими методами: хлоруванням, флотацією, електрохімічної обробкою і ультразвуком. В результаті, при застосуванні цієї технології не утворюються такі хлорвміщуючі речовини, як діоксин.

У таблиці 1.1 показана ефективність дії озону в порівнянні з іншими окислювачами на результати обробки води.

Таблиця 1.1 – Ефективність дії озону

де +++ – висока дія;

++ – задовільна дія;

+ – мала дія;

0, - – не діє.

Установки озонування води містять такі основні апарати як генератор озону; систему введення озону в воду і його змішування; реактор - ємність, в якій за рахунок перемішування і витримки забезпечується необхідний час реакції озону з водою; деструктор озону для видалення залишкового озону, що не прореагував; прилади контролю

озону у воді і повітрі. Існує декілька способів отримання озону, серед яких найбільш поширеними є: електролітичний, фотохімічний та електросинтез в плазмі газового розряду.

У більшості випадків озон одержують електросинтезом в спеціальних апаратах - генераторах озону. Повітря попередньо очищають від пилу за допомогою фільтрів і осушують. Далі повітря пропускають через простір між електродами, на які подається висока напруга. Кисень, що входить до складу повітря іонізується і утворюється озон. Після озоногенератора газ надходить в реактор, де відбувається взаємодія газу і рідини, що очищається. У складі будь-якого обладнання присутній деструктор, який забезпечує видалення зайвого, озону, який не прореагував. Відповідна установка розміщується в окремому приміщенні, де присутня ефективна вентиляція. Очищена вода надходить в резервуар чистої води по трубі. Таким чином, ми отримуємо ідеально очищену питну воду, збагачену киснем, в якій залишилися всі необхідні людині мінеральні солі.

Необхідна доза озону при знезаражування питних вод становить $0,6...3,5$ мг/дм³. Концентрація залишкового озону після камер змішування підтримується на рівні $0,1...0,3$ мг/дм³. Дози озону для знезараження стічних вод складають $6...10$ мг/дм³. Тривалість контакту $8...20$ хв.

Досвід використання озонування на сучасному етапі, накопичений для систем різної продуктивності, говорить те, що цю технологію можна і потрібно застосовувати не тільки на потужних водопровідних станціях, що відповідають за постачання водою великих міст, але й у системах водопідготовки малої і середньої продуктивності.

Безсумнівно, що якість води при водопідготовці з використанням озонування буде значно вище, ніж при інших технологіях. Ще однією перевагою використання озонування є те, що при відносно високій вартості первинних капітальних витрат експлуатаційні витрати пов'язані

тільки зі споживанням електроенергії (в середньому 0,05...0,07 кВт на 1 г озону) [5].

1.1 Виробництво озону

1.1.1 Енергетика виробництва озону

В даний час в промислових масштабах озон отримують [5-10] в пристроях (озонаторах), заснованих на плазмохімічному синтезі з використанням бар'єрного розряду. Принципово такі озонатори являють собою два електроди підключені до джерела змінного струму (з напругою 3...20 кВ) і розділені діелектричним бар'єром, через які пропускається повітря (або кисень) з певною швидкістю. Озонатори працюють при атмосферному або підвищеному тиску повітря (що сприяє утворенню озону), причому зі збільшенням частоти напруги живлення можливе зниження опору розряду і напруги живлення, і в підсумку підвищення виходу озону.

Конструктивно електроди озонаторів виконуються у вигляді концентрично розташованих циліндрів різного діаметру (на рис. 1.2, а: 1 - електрод низької напруги у вигляді трубки з нержавічної сталі; 2 - скляна трубка; 3 - електрод високої напруги у вигляді фольги) або у вигляді двох паралельних пластин (на рис. 1.2, б: 1 - скляна діелектрична пластинка; 2 - профільована пластинка; 3 - порожниста платівка з листового алюмінію).

Рисунок 1.2 – Схеми розміщення електродів і діелектрика в трубчастому (а) і пластинчастому (б) озонаторах, і способи розташування електродів і діелектрика (в-д)

Для отримання бар'єрного розряду електроди поділяють діелектриком з можливо великими питомою поверхневим опором і діелектричної постійної. При цьому діелектричний шар (скло, емаль, кераміки) виключає утворення іскри або дуги, забезпечує рівномірну структуру розряду і служить реактивним буферним опором, що обмежує струм в ланцюзі розряду. Залежно від способу розташування електродів і діелектрика повітряна розрядна прошарок П може виконуватися між електродом Е і діелектриком Д (рис. 1.2, в), між обома діелектриками (рис. 1.2, г), або між діелектриком посередині і електродами з боків (рис. 1.2, д). За даними [10] концентрація озону у діелектрика вище, ніж у металевого

електрода, тому в тому випадку, коли потрібна висока концентрація озону, використовують озонатори з двома діелектричними бар'єрами.

В основі промислового отримання озону лежить реакція розщеплення молекули кисню на атоми під дією тихого електричного розряду з подальшим приєднанням до молекули одного атома кисню:

(1.3)

З термохімічних умов при термодинамічній рівновазі (100% - вої ефективності) і наявності атомарного кисню реалізуються реакція синтезу озону:

(1.4)

Молекула озону дуже нестійка і легко дисоціює на атом і молекулу кисню. Утворений атом кисню вступає в реакцію з озоном з утворенням молекули кисню:

(1.5)

Для отримання сумарного рівняння реакції синтезу озону з кисню виключимо з попередніх рівнянь атомарний кисень, який є проміжним продуктом реакції, шляхом вирахування з першого рівняння другого:

(1.6)

Звідси випливає, що тепловий ефект при утворенні озону (48 г-екв) з кисню становить 143,64 кДж. Таким чином, теоретичне значення витрат енергії на отримання однієї молекули озону, виражене через електрон-вольти ($1 \text{ eV} = 4,45 \cdot 10^{-26} \text{ кВт} \cdot \text{г}$), становить $W = 1,47 \text{ eV}$, при виході озону $1,220 \text{ кг } \text{O}_3 / \text{кВт} \cdot \text{г}$ або витратах енергії - $(1/1,22) = 0,82 \text{ кВт} \cdot \text{г} / \text{кг } \text{O}_3$.

За даними досліджень фізики бар'єрного розряду [6, 7], озон виникає при впливі електричного розряду на пропускається через електродний проміжок повітря. При проходженні електронів, що виникають в електричному пробої, через озonoутворюючий газ, відбувається збудження, дисоціація і іонізація молекул газу, на що витрачається, що

підводиться від джерела живлення енергія. Встановлено [6], що існують три основні канали реакцій за участю атомарного кисню, що призводять до утворення озону:

- Молекула кисню дисоціюють при електронному ударі на два атома в нормальному стані. Для цього потрібно 6,0 еВ або $W = 3,0$ еВ, при виході озону 598 г O_3 /(кВт*год) або витратах енергії 1,67 кВт·год/кг O_3 і ефективності процесу 49%.
- Молекула кисню також дисоціює при електронному ударі на два атома, але один з атомів утворюється у збудженому стані. Для цього потрібно 8,4 еВ або $W = 4,2$ еВ, при виході озону 427 г O_3 /кВт·год або витратах енергії 2,34 кВт·год/кг O_3 і ефективності процесу 35%.
- Атом кисню в повітрі виникає після зіткнення молекули кисню з збудженої електронним ударом молекулою азоту. Для цього потрібно 6,17 еВ або $W = 3,1$ еВ, при енергетичному виході озону $G_{ен} = 581$ г O_3 /кВт·год або мінімальних витратах енергії $E_{мін} = 1,72$ кВт·год/кг O_3 і ефективності процесу 48%.

Видно, що, в порівнянні з ідеальними термодинамічними умовами синтезу озону, витрати енергії при електросинтезі в 2...2,86 рази вище, а ефективність і вихід озону на таку ж величину менше. Крім того, наведені величини енергоспоживання є мінімальними значеннями, так як в реальних процесах завжди існують інші канали втрат енергії, тому наведені цифри повинні бути збільшені в 1,7...2,0 рази. Зокрема, у зв'язку з тим, що 85...95% споживаної озонатором електроенергії витрачається на тепловиділення, електродний систему необхідно охолоджувати, оскільки озон при підвищеній температурі понад 50 °С швидко розкладається.

При зростанні концентрації озону в озоні повітряній суміші енерговитрата різко збільшується. Наприклад, за даними [11] фірми «Озон» для повітряних озонаторів середній приріст відносних

енерговитрат $E_{отн} = (E_{п}/E_{мін}) 100\%$, де $E_{п}$ - витрати енергії при підвищеній концентрації озону, в залежності від вагової концентрації озону в озоноповітряній суміші C_o (мас.%) визначається співвідношенням: $E_{отн} = 1,86 \exp(0,837 C_o) + 127$. Таким чином, концентрація генеруемого з газової суміші озону надає певний вплив на споживання електроенергії.

Наведений в літературі [11] і рекламних проспектах мінімальна питома витрата електроенергії в озонаторах звичайної конструкції при технічно обґрунтованих концентраціях озону (15...25 г O_3/m^3 повітря) становить 3,8...4,6 кВт·год/кг O_3 , проте необхідна певна обережність при оцінці цих значень.

За результатами останніх досліджень [11] мінімальне споживання електроенергії досягається при концентрації озону в газовій суміші близько 18 г O_3/m^3 повітря. На практиці частіше використовуються більш високі концентрації (до 20 г O_3/m^3), незважаючи на збільшення вартості процесу, так як при підвищених дозах озону повніше і інтенсивніше протікають реакції окислення забруднень оброблюваної води.

При озонуванні води використовують [11-13] озонатори, що виробляють озон в кількості 15...20 г O_3/m^3 повітря, при споживанні електроенергії відповідно 13...18 кВт*год/кг O_3 . При цьому ексергетичний ККД реалізованих процесів електросинтезу озону досягає всього 1...2%.

При сучасних вимогах по продуктивності озонаторних установок для озонування води [11] при обсязі переробляється води на порядок більше діючих (103 м³/добу), найважливішими завданнями виробництва озону є зниження витрат на його синтез і утилізація низькопотенційної теплоти з водоохолоджуючих елементів озонаторів.

Продуктивність озонаторів прямо пропорційна споживаній потужності, однак на їх коефіцієнт корисної дії значно впливають фізичні властивості використовуваних для синтезу озону повітря і кисню

(вологість, температура, тиск), а також температура охолоджуючої електроди води.

Для оцінки можливостей енергозбереження при виробництві озону розглянемо основні технологічні параметри процесу.

Вплив температури газу в розрядному проміжку.

Температура газу на вході в озонатор не повинна перевищувати 35 °С, а електроди охолоджуються водою з оптимальною температурою 15 °С. При підведенні енергії до розрядному обсягом озонатора тільки частина її витрачається на освіту озону, а основна її частина перетворюється в теплоту, яка нагріває озоноповітряну суміш і частина її видаляється через водоохолоджувані електроди. Оскільки озон є термічно нестабільним газом (вище 60...70 °С він швидко розкладається), то організація ефективного охолодження розрядного проміжку в озонаторе є надзвичайно важливою проблемою.

Відомо [11] напівемпіричної вираз зв'язує збільшення температури газу, проходить через розрядну зону ($\frac{dT}{dt}$ (°С/с); де t - час проходження розрядної зони (с), $t_{в\ вх}$ і $t_{в\ вих}$ - вхідна і вихідна температури повітря (°С)), величину розрядного проміжку (d , м) і значення щільності потужності λ_g , де P - потужність (Вт), а S - площа електродів (m^2), відповідно, для одного електрода з одностороннім охолодженням і для обох електродів при двосторонньому охолодженні:

$$(1.7)$$

де λ_g - коефіцієнт теплопровідності газу, кДж/м•°С.

На основі рівнянь (1.2) встановлено [14], що в трубчастих озонаторах з довжиною електродів близько метра підйом температури відбувається на початковій ділянці електрода (~10% довжини), а потім температура газу залишається незмінною. Якщо для одностороннього охолодження товщина розрядного проміжку $d = 1$ мм, то підвищення

температури газу в $50\text{ }^{\circ}\text{C}$ з урахуванням температури охолоджуючої води ($15\dots 20\text{ }^{\circ}\text{C}$) досягається при $P/S = 1,5\dots 2,0\text{ кВт/м}^2$.

Принципове значення для ефективної роботи озонаторів має спосіб охолодження електродів і діелектрика. В даний час в промисловості реалізуються два методу водяного охолодження - одностороннє і двостороннє.

Класичний варіант одностороннього охолодження використовується в конструкції Велсбаха [12] - має озоногенеріруючий елемент коаксіальної збірки, коли в тонкостінну трубу, охладжувану із зовнішнього боку водою, вставлена діелектрична труба, металізована зсередини для підводки високої напруги. Незважаючи на високу технологічність така конструкція має відносно низьку щільність потужності і високу металоємність. Варіант конструкції Велсбаха, коли охолоджується зовнішня металева труба, зашклена зсередини, а центральна труба металева, менш технологічний при обслуговуванні, але реалізує вищий тепловідвід (на $10\dots 15\%$), так як значна частина теплоти в бар'єрному розряді виділяється поблизу діелектричного електрода.

Двостороннє охолодження збільшує тепловідвід в 4 рази, що дозволяє працювати з підвищеними частотами і виходом озону. Виникає при цьому проблема охолодження електрода, який знаходиться під високою напругою, вирішують наступним чином [11]: охолодженням водою, що підводиться через ізолюючі (пластмасові) спіралі; охолодженням діелектричними рідинами (деіонізованою водою високої чистоти, маслами, полімерними речовинами). Недоліками даних способів охолодження є низька електрична стійкість зволжених пластмас, необхідність установки додаткових теплообмінників або холодильних машин.

Крім згаданих технічних прийомів охолодження в літературі описані [11] інші - за допомогою теплових труб, повітряно-крапельне і повітряне.

На основі аналізу рівнянь (1.1) можна зробити наступні висновки:

- збільшення температури газу в розрядному проміжку лінійно залежить від величини розрядного проміжку і величини щільності потужності;
- двостороннє охолодження дозволяє ввести в розрядну зону озонатора в 4 рази більше енергії, ніж одностороннє, при інших рівних умовах;
- зниження вхідної температури повітря дозволяє підвищити щільність потужності і продуктивність озонатора;
- тепловиділення в розрядному проміжку має складний характер, причому за даними [9] Більшість теплоти виділяється поблизу електрода, покритого діелектриком;
- певним критерієм якості охолодження є перепад температури охолоджуючої води на вході і виході з озонатора. На основі практики використання озонаторів рекомендують [11] допустимий перепад в 4...5 °С, причому охолодження з меншою швидкістю води, призводить до істотного розкладання озону, а з більшою – до нераціонального витрачання води.

Вплив тиску газу і величини розрядного проміжку.

Дані параметри являються найважливішими характеристиками, що визначають ефективність роботи озонатора. Це пов'язано з тим, що в повітряному озонаторе озон утворюється при зіткненні трьох частинок: атомарного і молекулярного кисню, а також молекул азоту, що забирають надлишкову енергію. Швидкості даних взаємодій визначаються тиском

газу в квадратичній залежності. Підвищення тиску сприятливо позначається на швидкості утворення озону. Однак, одночасно зі збільшенням тиску зростає величина пробійної напруги, змінюється структура розряду і збільшується температура газу. За даними різних дослідників [6-10] для синтезу озону з повітрям є оптимальне співвідношення між тиском і величиною розрядного проміжку: $r_g \approx 0,1 \dots 0,3$; де r_g - тиск газу, кПа.

Вважається [11], що зменшення величини розрядного проміжку є практично обов'язковим для всіх найбільш досконалих конструкцій озонаторів, що працюють як на повітрі, так і кисні. Це пов'язується як з поліпшенням охолодження розрядної зони озонатора, так і з тим, що при малих розрядних проміжках порядку 0,1...0,3 мм синтез озону відбувається більш ефективно при одних і тих же значеннях i (і, отже, при однакових величинах $\Delta T_{\text{газ}}$), ніж при більш широких проміжках (0,5...1,5 мм).

Детальні закономірності впливу параметра $r_g \cdot d$ на ефективність синтезу озону невідомий, що вимагає додаткових досліджень.

Вплив вологості повітря.

Присутність вологи в між електродному просторі важливим чином впливає на продуктивність і термін використання озонаторів. У класичній праці [5] по електросинтезі озону показано, що стабільної роботи озонатора необхідно використовувати попередньо осушене повітря до точки роси - 60 °С або нижче. При більшій вологості продуктивність озонатора поступово падає, причому, тим швидше, чим вище вологість. Це пов'язано з утворенням на поверхні діелектрика провідних плівок, за рахунок розчинення в плівці води оксидів азоту і збільшення поверхневої провідності діелектрика.

При використанні оптимально осушеного повітря концентрація озону зазвичай становить 1,5...2,5 % (~20...35 г О₃/м³ повітря), а питомі

енерговитрати на його отримання (при концентрації озону 2 мас. %) – 13...16 кВт*год/кг О₃.

Вплив частоти струму живлення.

Озонатори в складі установок для озонування води традиційно [13] харчуються струмом частотою 50...60 або 600 Гц. При використанні змінного струму частотою 50 Гц продуктивність регулюється зміною прикладеної напруги, направленої за допомогою автотрансформаторів. Однак величина $\cos \varphi$ при цьому не перевищує 0,4. Тому переваги використання змінного струму з частотою ≥ 600 Гц полягають в наступному: зростає потужність апаратів, що дозволяє зменшити їх габарити; досягається збільшення $\cos \varphi$ до 0,9, тобто збільшується активна потужність; забезпечується можливість експлуатації озонаторів при більш низькій напрузі з одночасним підвищенням їх коефіцієнта корисної дії. Досвід експлуатації різних систем електроживлення озонаторних установок показав [14], що з економічних міркувань для водопідготовчих станцій малої продуктивності (до 7 кг/год по озону) вигідніше використання напруги з частотою струму 50 Гц, а для великих станцій - 600 Гц.

1.1.2 Конструкції озонаторів

Озонатори промислового типу відрізняються [5] один від одного конструктивним оформлені, засобами охолодження електродів і діелектрика, а також використовуваним напругою і частотою струму. У технології обробки води застосовуються [11-14] два основних типи озонаторів: трубчасті (горизонтальні і вертикальні) і плоскі пластинчасті. Найбільшого поширення набули трубчасті озонатори з горизонтально розташованими електродами (рис. 1.3).

Рисунок 1.3 – Схема трубчатого озонатора конструкції Вельсбаха [12]: 1 - електрод низької напруги; 2 - діелектрик; 3 - електрод високої напруги; 4 - скляна трубка; 5 – трансформатор

Такі озонатори складаються з циліндричного корпусу, розділеного на три секції, і знімних сферичних днищ. Для закріплення розміщується в корпусі пакету електродів в ньому встановлені вертикальні опорні решітки. У середній секції розташовані трубчасті електроди, між якими циркулює охолоджуюча вода, а крайні секції служать для подачі сухого повітря і виведення озону. Кожна розрядна трубка являє собою два

співвісно розташованих електрода: заземлений електрод низької напруги у вигляді трубки з нержавіючої сталі і електрод високої напруги у вигляді скляної трубки з нанесеним на її внутрішню поверхню шаром струмопровідного покриття з графіту, графіто-мідної суміші або алюмінію. За допомогою центрувальних кілець кожна трубка встановлюється строго по осі сталевій трубки з повітряним прошарком 2,5 мм.

Продуктивність сучасних трубчастих генераторів по озону становить за даними [11] до 200г О₃/г на 1 м² площі діелектрика при частоті струму 50 Гц і температурі охолоджуючої води 15 °С. У 1 м³ озонованого повітря в середньому міститься 12...20 г озону. Озонатор практично споживає споживає в середньому до 13...18 кВт*год/кг О₃, а енерговитрати всього поста озонування – 20...30 кВт*год/кг О₃, що в 30,5 раз більше ніж теоретичне витрат енергії (0,82 кВт г/кг О₃).

Для відводу теплоти із зони розряду зовнішні електроди охолоджуються водою з температурою 20 °С, яка підвищується, як правило, не більше ніж на 6...8 °С, причому витрата води становить 3...5 м³ на 1 кг озону. Оскільки, за даними [11], якість води в електродах з нержавіючої сталі не змінюється, то її можна застосовувати для технологічних цілей і господарсько-питного водопостачання, що важливо для енергозбереження.

Пластинчасті озонатори виконують з прямокутних, паралельно розміщених закритих ємностях і охолоджуваних циркулюючою водою пустотілих алюмінієвих або чавунних елементів 1-4 (рис. 1.4) між якими попарно встановлені скляні пластини 2 на відстані 3 мм один від одного.

Рисунок 1.4 – Схема пластинчастого озонатора конструкції Отто [16]

До зовнішньої поверхні елементів щільно прилягає шар фольги або металевої фарби 3 (рис. 1.4), що виконує роль електрода. Елементи 1-4 через один підключені до джерела живлення (20 кВ і 500 Гц), а решта - заземлені. Повітря надходить в кожух озонатора, проходить через розрядний простір 5 і відводиться в випускний патрубок. Витрата електроенергії в таких озонаторах на освіту 1 кг озону складає 18,1 кВт*год.

Французька фірма «Треїлігаз» випускає пластинчасті озонатори з подовжньою циркуляцією повітря. При цьому подовжена прямокутна форма електродів і розташування кожного розрядного елемента у власному кожусі дозволяє підвищити продуктивність по озону в порівнянні з озонаторами трубчастого типу на 50%.

Огляд сучасних конструкцій озонаторів і їх характеристик наведено в роботах [5, 7, 10, 11]. Найважливішими технологічними і енергетичними параметрами озонаторів є: продуктивність по озону G_o (кг O_3 /год) при концентрації озону Co_3 (г/м³); номінальна концентрація утворюється озону Co_3 (г O_3 /м³ повітря); енергоспоживання E (кВт*год/кг O_3) при концентрації озону Co_3 (г/м³); питома продуктивність U_p (кг O_3 /г*дм²) при концентрації озону Co_3 (г/м³).

За кордоном існує більше сотні фірм, які виробляють озонаторне обладнання, і їх кількість постійно збільшується. Основними виробниками озонаторного обладнання різних типорозмірів для обробки води є французькі фірми Треїлігаз і Дегремона, фірма ЛІТНА (Бельгія), фірма Вельсбах (США), фірми «Тошиба», «Фуджі» і «Сумітомо» (Японія) та ін. Світовими лідерами виробництва озонаторів на сьогоднішній день є транснаціональні концерни «озон» (Швейцарія) і «Ведеко-Шмідінг» (поглинула фірму «Треїлігаз»).

Виробниками озонаторів в Україні є наступні виробники [17-20]:

- СТРИМОЗОН, ТОВ (м. Харків);
- DIGIDROL (Digidrol), Nauchno-proizvodstvennoe predpriyatie, ООО (м. Запоріжжя);
- АСКО-УКРЕМ (м.Київ);
- OZON-PROM (м. Вишневе).

В Росії основним виробником озонаторів є ВАТ «Курганхім-маш», яке випускає 10 типорозмірів озонаторів конструкції Велсбаха з $f = 400...880$ Гц; Кількості не більше 20...35 г O_3 /м³ при розрядному

проміжку 1,5...2,0 мм, $G_o = 0,63...25,8$ кг / год; $E = 10...13,5$ кВт * год / кг O_3 ; $Y_{II} = 1,0...1,61$ г O_3 / год*дм².

Серійні та експериментальні трубчасті і пластинчасті озонатори випускають [11] також НПП «Техозон» (м. Дзержинськ) та ін. В цілому російські озонатори мають робочі характеристики близькі до тих, що досягаються в світі.

За кордоном проводяться інтенсивні дослідження з розробки нових конструкцій озонаторів і щодо підвищення їх енергетичної ефективності.

Можна виділити основні напрямки робіт в цій області:

- Вибір матеріалів для виготовлення електродів (нержавіюча сталь, титан, анодований алюміній) і діелектричних бар'єрів з мінімальним розрядним проміжком. Наприклад, використання не скляних діелектриків (емалі, оксид алюмінію) з високою геометричною точністю, що дозволяє витримувати розрядні проміжки в 0,3...0,45 мм.
- Створення озонаторів, що працюють на підвищених частотах, завдяки чому досягається більш висока продуктивність на одиницю об'єму, в порівнянні з низькочастотними. Для живлення таких озонаторів застосовують напівпровідникові перетворювачі на основі паралельних і послідовних інверторів, зокрема на основі IGBT транзисторах.
- Удосконалення системи охолодження електродів. Охолодження обох електродів дозволяє збільшувати частоту струму до 3 кГц без перегріву електродів і, отже, без зниження ефективності роботи генератора. Пряме охолодження двох електродів збільшує до максимуму споживання кількості теплоти, виділеної в електричному розряді, що призводить до зменшення до мінімуму споживання потужності.

- Є довгострокова тенденція щодо використання в якості вихідного газу для по-одержанні озону, кисню. За даними [11] реальним є метод адсорбційної збагачення повітря киснем шляхом селективної сорбції азоту на пористих адсорбентах з отриманням концентрацій кисню на рівні 93...95%.
- При створенні озонаторних установок високої продуктивності актуальною стає проблема енергозбереження, так як енергетичний ККД озонування води за даними [11] не перевищує 5...10%, зокрема необхідна внутрішня регенерація потоків енергії в технологічній схемі озонування води і економічна утилізація скидної низко-потенціальної теплоти охолоджуючої води.

Озонатори із застосуванням вихровий труби. Відоме застосування вихрових труб в конструкції генераторів озону. Наприклад, генератор озону [21], що має корпус з введенням стисненого газу і виведенням озону, для підвищення ефективності та спрощення конструкції, забезпечений вихровою камерою (рис. 1.5, а), виконаної з діелектрика і забезпеченою струмопровідним елементом, встановленим на торці камери і розміщеним навпроти неї осьовим дифузором, виготовленим з діелектрика. Дифузор забезпечений вихідним щілинним соплом, торець якого виконаний з струмопровідного матеріалу, а введення самого газу - у вигляді тангенціального сопла.

Рисунок 1.5 – Конструкції озонаторів на базі вихрових труб

Генератор озону [22] містить (рис. 1.5, б) корпус з тангенціальним введенням стисненого газу і виведенням озону, осьової дифузори, виконаний з діелектрика з торцем вихідного щілинного сопла з струмопровідного матеріалу, він забезпечений також заглушкою, з діелектричного матеріалу з центральним струмопровідним стрижнем, встановленої в корпусі навпроти осьового дифузора. Дані озонатори [21, 22] вимагають застосування спеціальних форм електричних розрядів, що горять по осі вихрової труби.

Високочастотний генератор озону [23] з внутрішнім охолоджуваним електродом, що включає вихрову трубу, розроблений під ННГАСУ (м. Нижній Новгород) і містить (рис. 1.6) корпус 1, високовольтний 2 і низьковольтний 6 електроди, патрубки підведення стисненого осушеного газу 7 і відведення озон-повітряної суміші 10, елемент подачі високої напруги 13.

Рисунок 1.6 – Високочастотний генератор озону з вихровою трубою

Для збільшення продуктивності генератора і спрощення конструкції високовольтний електрод виконаний у вигляді вихрової труби 2 з сопловим введенням стисненого осушеного повітря 3 і трубопроводом відведення гарячого потоку 4. Вихрова труба 2 забезпечена газо-напрямним кожухом 5 з струмопровідного матеріалу і встановлена коаксіально в порожнині низьковольтного електрода 6. при цьому область високого тиску вихрової труби з'єднана з патрубком підведення стисненого осушеного газу 7, а область низького тиску через патрубки холодного повітря 8 - з газо-направляючим кожухом 5. Генератор озону містить також розрядну камеру 9, патрубки підведення і відведення охолоджуючої води 11 і 12, а корпус 1 виконаний з охолоджувальною сорочкою.

У даній конструкції реалізується водяне охолодження зовнішнього електрода з діелектричним бар'єром і повітряне охолодження

внутрішнього металевого електрода. При роботі стиснений газ через патрубок 7 і сопловий введення 3 потрапляє в вихрову трубу 2, де за рахунок інтенсивності закрутки відбувається охолодження газоповітряної суміші. Далі холодний газовий потік через патрубки 8 надходить в газо-направляючий кожух 5, що знаходиться під високою напругою, і, охолоджуючи як вихрову трубу 2, так і сам газо-направляючий кожух 5, потрапляє в розрядну камеру 9, де під дією електричного коронного розряду відбувається синтез озону. Теплоту, що виділяється в результаті синтезу озону, відводять з охолоджувальною рідиною, яка подається в камеру охолоджуючої води 14 через патрубок 11 і відводиться через патрубок 12. Гарячий газоповітряний потік відводиться від генератора озону через трубопровід 4 і використовується для регенерації адсорбентів, які застосовуються в системі підготовки повітря.

При концентрації озону в озоні повітряній суміші більше $20 \text{ О}_3/\text{м}^3$ і продуктивності в діапазоні $100 \dots 1000 \text{ г О}_3/\text{год}$ дані озонатори споживають за даними [24] до $1,5 \dots 13 \text{ кВт} \cdot \text{год}$ електроенергії.

Основним недоліком даної конструкції з охолодженням внутрішнього металевого електрода холодним потоком з вихрової труби є підвищення температури повітря на вході в міжелектродний проміжок, що знижує вихід озону.

1.2 Змішання озону з водою

Одним з найважливіших питань використання озону є проблема введення його в воду в оптимальних умовах і з мінімальними втратами. Найбільш повне розчинення газоподібного озону в воді, яка підлягає очищенню або знезараженню, є однією з основних задач техніки озонування, так як найчастіше тільки в розчиненої формі озон здатний впливати на забруднення. Критерієм ефективності процесу змішування

озонованого повітря з водою служать число і тип пристроїв, які здійснюють диспергування озону в воді, і споживання ними електроенергії. Ця проблема залишається предметом численних досліджень [11-14] і до теперішнього часу можна говорити про існування таких технічних рішень по дифузії і розчинення озону в воді:

- *Змішувачі з насадочними (або безнасадочних) колонами* - представляють собою вежі завантажені гранульованої насадкою з розвиненою площею контакту, причому вода стікає по поверхні насадки тонкою плівкою, на поверхні якої і відбувається перехід озону з газу в рідину. У безнасадочних колонах або контакторах вода розбризкується під тиском через дифузори в атмосфері озону, який дифундує в краплі рідини. В сучасних умовах такі пристрої практично не застосовуються для введення слабо розчинної озону в воду в зв'язку зі значними габаритами, невисоким коефіцієнтом масопереносу в рідкому плівці і відносно високими енерговитратами - до 15...40 Вт*год/г О₃ [11].
- *Статичні змішувачі* - являють собою стаціонарну занурювальну трубу, в якій розташовані спеціально розраховані пелюстки з гострими крайками. При цьому газ ежектируємый у високошвидкісний потік води на вході змішувача і в міру просування по довжині труби проходить диспергування бульбашок газу. Залежно від необхідного ступеня поглинання озону водою довжина змішувача може коливатися від 0,5 до 2...3 м, причому ефективність змішування в значною мірою залежить від швидкості потоку води. Середні енерговитрати на статичні змішувачі складають [11] 4...5 Вт*год/г О₃.
- *Змішувачі з U-подібними трубками* або з падаючим потоком води - відрізняються тим, що ежектируємый озон потрапляє у верхню частину низхідного потоку води і занурюється разом з останнім на

певну глибину (до 20 м), а потім піднімається разом з висхідним потоком води. Середні енерговитрати на змішувачі з падаючим потоком води становлять 4...5 Вт*год/г О₃.

- *Турбінні заглибні механічні змішувачі* для диспергування озону - вимагають установки в контактній камері ротаційного механічного емульсатора у вигляді порожнього перфорованого циліндра-ротора, забезпеченого зверху електродвигуном і обертового в воді по колу осі зі швидкістю 2900 об/хв. За рахунок вакууму, що створюється в результаті обертання циліндра, озоноване повітря, що подається знизу по осі, виходить через отвори ротора в радіальних напрямках і змішується з навколишнім водою. Такі змішувачі створюють найбільш гомогенну суміш озону з водою при мінімальному часу змішання, малих габаритах і високу ефективність в плані повноти поглинання озону (до 75...85%). Однак, турбінні змішувачі вимагають досить багато енергії для перемішування води (до 7...10 Вт*год/г О₃) і, крім того, на відміну рухомих частин і висококорозійного озоновмісного середовища неминуче ставить питання про ресурс всього пристрою.
- *Пористі або перфоровані дифузори або диспергатори* в стаціонарних камерах - є найбільш поширеними на озonoоброблюючих станціях і реалізують барботаж і диспергації газоподібного озону на пористих матеріалах, наявних в контактних камерах (фільтрувальних трубах, пористих дисках). В СРСР поширення отримали [14] малопузирькові розпилювачі озонopовітряної суміші, виконані у вигляді фільтрувальних пластин або труб виготовлених з пористої кераміки (склокераміки) або металопорошків з діаметром пір 40...100 мкм. Інтенсивність розпилення на одиницю площі пористих розпилювачів приймається рівною 15...90 м³/(м²*год). Пористі диспергатори дозволяють

отримувати бульбашки озонованого повітря з діаметром 2...3 мм, для якого характерна найменша швидкість спливання, що сприяє найбільш повного розчинення озону. Перевагами даних змішувачів є стаціонарність і незалежність роботи від величин потоків води і газу. До недоліків можна віднести значні габарити і порушення роботи при кульматації (закупорці) пір мінеральними і органічними забруднювачами води, що вимагає їх регенерації. Застосування пористих дифузорів, в порівнянні з механічними емульгаторами або турбовентиляторами, пов'язане з меншими енергетичними затратами, але вимагає використання повітря з великим тиском. Середні енерговитрати складають 2...3 Вт*год/г Оз.

На практиці для водопідготовчих станцій для змішування озону з водою переважно використовують контактні камери, що працюють при атмосферному або підвищеному тиску, в поєднанні з різними змішувачами. Сучасні конструкції контактних басейнів передявляють собою (рис. 1.7) резервуари із залізобетону, розділені перегородками на три (або чотири) послідовно з'єднані реакційні камери (I, II і III) і газовідділювач. Озон вводиться в другу і третю по ходу руху води камери зі змішанням озону і води по принципу барботування в протivotоці.

Рисунок 1.7 - Схема контактної камери: I, II і III - відповідно перше, друге і третє відділення; 1 - водозлив; 2 - про озонована вода на вугільні фільтри; 3 - струмененапрямлені перегородки; 4 - диспергатори-дифузори (або інші змішувачі); 5 - механічний змішувач; 6 - вихідна вода; 7 - випускний клапан відведення повітря на деструкцію залишкового озону; 8 - турбовентилятор

Зазвичай камери складаються з декількох відділень, де з метою підвищення ступеня розчинення озону вода може циркулювати по черзі вздовж потоку диспергуємого газу і протитечією. Барботажні пристрої у вигляді дрібнопухирцевих аераторів розташовують рівномірно по площі камер. Для створення протivotочного руху камери поділяють між собою вертикальне або горизонтально-нахиленими струменеспрямовуючою перегородками, що забезпечують рух води тільки в напрямку зверху вниз. Призначення

третьої камери - рекуперація залишкового озону з другої і третьої камер для преозонування води. Накопичення під перекриттям камер озонування повітря із залишковим озоном відсмоктується турбовентілятором і турбінним змішувачем диспергується у вигляді бульбашок у воді третьої камери, що дозволяє додатково використовувати 7...8% озону. Повітря з не прореагувававшего озоном випускається через стояки, встановлені на перекритті камери преозонування і подається на деструкцію. При роботі контактних камер регулюють такі параметри: тривалість контакту води з озоном – 7...12 хв, в залежності від якості вихідної води, вважаючи сумарний час її перебування в трьох відділеннях; висота шару води в камері - не менше 4,5 м; регулювання відносин кількості озону, що подається по камерах; втрати напору в контактній камері – 0,5 м. З огляду на певні недоліки пористих аераторів виявлені в [27] (кульманація (забивання) пір, втрати озону через нещільності стикових швів) перспективно-нормативні конструкції контактних камер, що виключають застосування диспергаторів. При цьому змішування озону з водою здійснюється за допомогою компактних статичних або ежекторних змішувачів, занурених у воду в контактній камері або розташованих за її межами. У цьому випадку весь потік води (або її частина, що відбирається інжекторним насосом) подається на статичний змішувач, куди інжектуються озоно-повітряна суміш, а водо-озонова емульсія диспергується в контактну камеру. При цьому контактна камера не має перегородок і служить тільки для створення контакту озону з водою і окислення забруднень. Як статичних змішувачів можуть використовуватися розглянуті вище, а також мембранні і різні варіанти ежекторних.

- *Мембранні змішувачі* - перспективний спосіб введення озону в воду через селективні мембрани, що дозволяють [11] виробляти розчинення озону в молекулярній формі, минаючи стадію утворення бульбашки. Такі змішувачі являють собою герметичну камеру, розділену мембраною (у вигляді порожніх волокон) на дві частини, з одного боку мембрани пропускається під тиском озон-повітряна суміш, а з іншого - вода. Дані змішувачі знаходяться на стадії лабораторних досліджень, але попередньо зрозуміло, що вони будуть надзвичайно чутливі до кольманації пір мембран.
- *Ежекторні змішувачі* (або гідравлічні емульсатори) - вважаються [11, 26] одними з найперспективніших типів змішувачів. Очищається вода під тиском, створюваним насосом, проходячи звужується частина ежектора збільшує швидкість руху з падінням тиску в даному місці, що забезпечує ежекування озонвмісної газової суміші з інтенсивним її перемішуванням з водою. Перевагами ежекторних змішувачів є: простота конструкції, малі габарити і відсутність рухомих частин; швидкість контакту газ-вода; ежектор не вимагає підведення додаткової енергії для змішування, крім енергії струменя води. Недоліками таких змішувачів є висока чутливість до корозійних відкладень, які спотворюють геометрію водяного робочого сопла і кільцевого входу газу, мають критичні розміри, що різко знижує продуктивність ежектора. Зазвичай, через втрати озону ефективність змішування знаходиться [11] на рівні 70%, тому для введення високих доз озону в воду (до 10...15 мг/л) після ежектора потрібна установка пристрою для збільшення поглинання озону. При введенні змінних і високих доз озону використовують [11] ежектори з рухомих голчастим регулятором, встановленим по осі

робочого сопла. В цілому ежекторні пристрої для змішування озону з водою, як будь-які струменеві апарати, досить чувствительно до стабільності швидкостей потоків води і газу, і при їх коливаннях можливий значний проскок озону. Середні енерговитрати на ежекторне змішання озону з водою становлять 15...20 Вт*год/г Оз.

Одним з варіантів ежектора-змішувача для озонування води є [11] так звані ежекційно-струменеві апарати з опускаючими трубами або гідравлічні емульсатори, що відрізняються (рис. 1.8) тим, що після засмоктування озоно-повітряної суміші через ежектор газоповітряної суміші надходить в, занурені під рівень води, опускаючі труби.

Рисунок 1.8 – Схема введення озону в контактну камеру за допомогою гідравлічного ежекційного емульсатора (а) і його конструкція (б)

При цьому озоноване повітря по трубі 1 (рис. 8, а) і оброблена вода по трубі 2 одночасно вводяться в емульсатори 3, змішуються і відводяться по вертикальній трубі 4 в контактну камеру 5. В гідравлічних емульсаторах (рис. 1.8, б) є водяний насос-інжектор, в якому при

проходженні оброблюваної води виникає розрядження, що викликає засмоктування озонованого повітря, що виключає можливість витоку озону назовні. Спадний потік газорідинної суміші виносить не розчиняється озон на певну глибину шару рідини під трубами і рівномірно розподіляє суміш по поперечному перерізі контактної ємності. Таким чином, газові бульбашки проходять шлях в рідині практично в 2 рази більший, ніж в апаратах зі звичайним введенням газової суміші. Проозонована вода піднімається у верхню частину камери і переливається через перегородку в бічній збірний канал 6. Непрореагована частина озону відводиться через витяжний стояк 7. Сумарна тривалість контакту озон-повітряної суміші з водою складає близько 5 хв. Енергорозхід подібних установок пов'язаний з подоланням опору ежектора і шару води в контактній ємності і досягає [11] 70 Вт*ч/г О₃, при рівні використання озону - 90%.

1.3 Фізико-хімічні основи технологічного процесу

Озон - О₃, алотропна форма кисню, що є потужним окислювачем хімічних і інших забруднюючих речовин, які руйнуються при контакті. На відміну від молекули кисню, молекула озону складається з трьох атомів і має довші зв'язки між атомами кисню. За своєю реакційної здатності озон займає друге місце, поступаючись лише фтору. Озон може існувати у всіх трьох агрегатних станах. При нормальних умовах озон - газ голубуватого кольору. Фізико-хімічні властивості озону наведено у таблиці 1.2.

Таблиця 1.2 – Основні фізико-хімічні властивості озону

У штучних умовах озон отримують різними методами, але завжди розчиненим у повітрі або кисні. У виробничих процесах отримання озону для очищення води озонופовітряну суміш отримують за допомогою "тихого" електричного розряду в озонаторах.

Реакція отримання озону характерна отриманням з кисню повітря при його збудженні не тільки озону, але й атомарного кисню:

(1.8)

де Q - тепловий ефект реакції, кДж.

Як зазначалося вище, озон має високий окислювально-відновний потенціал, що є головною причиною його активності по відношенню до різного роду забруднень води, включаючи мікроорганізми. При диспергуванні озону в воду здійснюють два основних процеси - окислення і дезінфекція. Крім того, відбувається значне збагачення води розчиненим киснем.

Окислювальна дія озону може проявлятися в наступних формах: пряме окислення, окислення радикалами (непряме окислення), озоноліз, каталіз.

Прямі реакції окислення озоном розчинених речовин описують у вигляді:



Прикладом таких реакцій може служити окислення ряду органічних і мінеральних речовин (Fe^{2+} , Mn^{2+}), які після озонування осаджуються у формі нерозчинних гідроксидів або переводяться в діоксиди і перманганати, що видаляються наступним очищенням на фільтрах.

Кінетика прямих реакцій може бути виражена рівнянням:

$$(1.10)$$

Де $[\text{C}_0]$, $[\text{C}_t]$ - початкова і кінцева концентрації речовини, мг/дм^3 ;
 k - константа швидкості реакції, $\text{дм}^3/(\text{моль} \cdot \text{с})$;

$[\text{O}_3]$ - середня концентрація озону під час проходження реакції, мг/дм^3 ; t - тривалість озонування, с.

Непряме окислювання здійснюється великим числом активних радикалів, що утворюються в результаті переходу озону з газової фази в рідину і його саморозкладу. Інтенсивність непрямого окислення прямо пропорційна кількості розклася озону і обернено пропорційна концентрації присутніх у воді забруднювачів. Деякі речовини піддаються лише прямому окисленню, інші (наприклад, органічні кислоти з малою молекулярною вагою) - окисленню радикалами. Нерідко спостерігаються процеси окислення якої-небудь речовини спільним або послідовним впливом прямого окислення і окислення радикалами. Озоноліз являє собою процес фіксації озону на подвійний або потрійний вуглецевий зв'язок з подальшим її розривом і утворенням озонідів, які, так само як озон, є нестійкими сполуками і швидко розкладаються.

Каталітичний вплив озонування полягає в посиленні їм окислювальної здатності кисню, який присутній в озонованому повітрі.

Перераховуючи можливі форми окислюючого впливу озону, не можна не відзначити того факту, що в порівнянні з іншими окислювачами озон швидше вступає в реакції і в меншій дозі.

Як відомо, вода транспортує середовищем для мікроорганізмів: сапрофітних і патогенних бактерій, різних вірусів, водоростей, грибів і т.д. Озон є сильним бактерицидним і віруліцидним агентом, але на сьогоднішній день механізми інактивації окремих груп мікроорганізмів ще точно не визначені. Згідно з останніми уявленнями про бактерицидний вплив озону, дезінфектант робить безпосередній вплив на цитоплазму і ядерну структуру клітини бактерії, викликаючи припинення активності складних органічних речовин білкової природи - ензимів.

Віруси знищуються при повному окисненні їх матерії, що складається з білка і однією з нуклеїнових кислот. Інактивація бактерій і вірусів розглядається не тільки як наслідок прямого впливу озону, але і як вплив ряду інших окислювачів, що утворюються при дифузії дезінфектанту в воду, зокрема вільних радикалів.

Реакція озону з неорганічними речовинами. Хлор окиснюється озоном дуже повільно з утворенням хлорноватистої кислоти. Ця кислота потім окислюється в хлорат з частковим утворенням хлору. Можна вважати, що хлор стабільний у розчині при умовах постозонування.

Бром спочатку окислюється в гіпоброміт. Окислення в броматні з'єднання йде дуже ефективно, паралельно з взаємодією органічних сполук з гіпобромітом.

Йод реагує з озоном дуже швидко з утворенням йодноватистої кислоти та йодату.

Хлорит-іон. Загальна схема може бути записана наступним чином:

(1.11)

Ціаніди легко окислюються озоном в ціанати, які потім самі окислюються, але дуже повільно:

(1.12)

Сульфіти і сірка є відновниками і реагують з озоном з утворенням сульфату.

Іони заліза і марганцю швидко окислюються озоном до гідроксилу і діоксиду марганцю. Процес окислення двовалентного заліза може бути представлений схемою:

(1.13)

(1.14)

Окислення марганцю - процес більш складний. В області рН від 5 до 7 має місце утворення чотирьохвалентної окису марганцю, який малорозчинен у воді:

(1.15)

(1.16)

Одночасно з цим відбувається окислення вихідного розчинного двовалентного марганцю до більш високого ступеня окислення з утворенням перманганату, розчинного у воді:

(1.17)

Реакція озону з органічними речовинами:

- насичені алкільні сполуки реагують з озоном дуже повільно. Більшість хлорованих вуглеводнів і навіть ненасичені вуглеводні не реагують прямо з озоном через радикал OH^\cdot . Бензол окиснюється озоном дуже повільно, а поліциклічні вуглеводні швидше;
- час реакції озону з фенольними сполуками становить кілька секунд;

- карбоксильні кислоти, кетонові кислоти і ряд подібних сполук представляють собою кінцеві стабільні продукти процесу окислення органічних речовин озоном;
- аміни при нейтральних значеннях рН реагують досить повільно з озоном, при рН > 8 реакції окиснення відбуваються швидше. Однак в основному реакції окислення амінів йдуть через ОН⁻ радикали. Четвертинні аміни реагують з озоном швидше;
- спирти можуть взаємодіяти з озоном, утворюючи в якості проміжних сполук гідропероксиди. При цьому вони окислюються до карбоксильних кислот, в той час як вторинні спирти - до кетонів;
- серед пестицидів, що містять ефіри фосфорної кислоти, найбільш відомим є паратіон. Озонування цього з'єднання призводить до появи параоксона, який більш токсичний, ніж паратіон [27].

На відміну від хлору, який пасивний по відношенню до деяких типів бактерій, озону відводиться роль універсального окислювача, що здійснює майже миттєву інактивацію. Однак деякі бактерії і віруси чинять сильний опір озону. У колі дослідників немає єдиної думки про те, чому ті чи інші типи груп мікроорганізмів дуже швидко знищуються озоном, а, наприклад, спорозносні форми бактерій роблять значний опір. Залишається сподіватися, що буде знайдена і зведена в систему закономірність, яка пояснює прояв різної чутливості мікроорганізмів до озону.

Сукупність усіх форм окислюючої і дезінфікуючої дії озону дозволяє широко використовувати його в техніці водопідготовки на різних стадіях обробки води. Так, якщо переслідується мета дезінфекції, озон вводиться на завершальному етапі очищення (постозонування). Що стосується реакцій окислення, то вони проявляються при дифузії озону як на початку технологічної схеми очищення, так і на будь-якому її етапі в залежності від того, який інгредієнт забруднень слід видалити. Важко

провести чітку грань місця і часу проходження кожної з реакцій, так як переважання тієї чи іншої форми окисного впливу знаходиться в залежності від якості води, що очищається і місця введення озону в технологічну схему обробки. Прямі реакції окислення характерні для видалення металів (Fe, Mn), нерідко входять у складні органо-мінеральні комплекси. При спільній дії озонолізу і окислення радикалами можуть бути видалені колоїдні речовини, токсичні мікробруднення, розчинені органічні речовини природного та штучного походження, які надають воді кольоровість, запах і присмак. Насичення води киснем в ході озонування сприяє підвищенню ступеня окислення речовин, а також найбільш повному видаленню розчинених органічних забруднень біологічним шляхом, якщо озонування здійснюється перед фільтрацією, і т.д.

Розчинність озону у воді залежить від температури, активної реакції середовища і її сольового складу. При зниженні температури і підвищенні рН розчинність озону зростає, основні солі знижують його розчинність, а нейтральні підвищують. Розчинність озону у воді може бути виражена або у вигляді так званого коефіцієнта Генрі - Н, що показує відношення обсягу розчиненого озону, приведенного до нормальних умов, до об'єму води (V_{O_3}/V_v), або в абсолютних значеннях розчиненого озону ($г/дм^3$). При цьому вважається, що процес розчинення підкоряється закону Генрі, згідно з яким кількість розчиненого озону пропорційно тиску газоподібного озону над розчином.

Цей закон може бути записаний у вигляді:

$$(1.18)$$

Розчинність озону підвищується з пониженням температури води. При цьому спостерігається великий розкид в експериментальних даних різних авторів, представлених в табл. 1.3.

Таблиця 1.3 – Розчинність озону у воді

Дані, наведені в таблиці 1.3, відносяться до 100% озону при атмосферному тиску [28].

В даному розділі були розглянуті методи очистки води, переваги озонування над іншими методами очистки води, виробництво озону. Розглянуті конструкції озонаторів, технічні рішення для змішування озону з водою та фізико-хімічні основи технологічного процесу.

1.4 Постановка задачі магістерської дисертації

У магістерській дисертації вирішується завдання розробки програмного забезпечення для математичного моделювання процесу озонування води.

Рішення даної задачі включає наступні етапи:

- проаналізувати технологічні особливості виробничого процесу озонування та літературні джерела за обраною тематикою;
- розробити математичну модель розпаду озону в водному середовищі;
- розробити обчислювальний модуль для розрахунку математичної моделі процесу озонування води;
- здійснити моделювання процесу розпаду озону в водному середовищі.
- розробка стартап-проекту;
- провести економічне обґрунтування створення обчислювального модуля.

2 КІНЕТИЧНІ МОДЕЛІ РОЗПАДУ ОЗОНУ В ВОДНОМУ СЕРЕДОВИЩІ

Існує чимало літературних джерел [29-31], що описують кінетичні схеми механізму розпаду озону в водному розчині, але найбільш відомі з них це:

- 1) Модель SBH (Staehelin, Buhler, Hoigne)
- 2) Модель TFG (Tomiyasu, Fukutomi, Gordon)
- 3) Модель NFG (Nemes, Fabian, Gordon)

2.1 Розрахунок кінетичної моделі SBH

За рахунок реакції (2.1) відбувається процес розпаду озону між гідроксидом-іоном і молекулярним озоном. Гідропероксидний радикал HO_2 дисоціює, що утворився при цій реакції. Продукт дисоціації, супероксидний іон-радикал O_3^- . При протонуванні озонід-іона і подальшого розпаду радикала HO_3 утворюється гідроксильний радикал OH , що реагує з озоном по реакції (2.6) і утворює радикал HO_2 . З вище сказаного зрозуміло, що розпад озону протікає по радикальному ланцюжковому механізму, а гідроксильний радикал являється агентом переносу ланцюга реакції. Обрив ланцюга відбувається за рахунок реакцій (2.7-2.11) в таблиці 2.1 [32].

Таблиця 2.1 – Кінетичні рівняння моделі SBH

Радикал HO_2 майже повністю дисоціюється, оскільки модель SBH розроблена для нейтрального середовища рН, через що HO_2 не бере участі в реакції розриву ланцюжка. При цьому є ймовірність проходження реакції між ізонід-іоном і радикалами OH , і HO_3 . у зв'язку з високою енергією активації. Механізм проходження реакції розпаду озону за моделлю SBH зображено на рис. 2.1.

Рисунок 2.1 – Механізм розпаду озону SBH [31,32]

Введемо заміну для відповідних хімічних елементів з таблиці 2.1 та побудуємо кінетичні схеми:

Тоді, кінетична схема реакції матиме вигляд:

Початкові умови:

Дані для побудови графіків були отримані за допомогою числового метода «Ейлера».

Результати моделювання наведені на рис. 2.1. В додатку А наведено розрахунок моделі SBH.

Рисунок 2.1 – Кінетичні криві моделі SBH

З рисунку 2.1 бачимо, що концентрація O_3 зменшується і разом з цим збільшується концентрація O_2 , що свідчать про повне проходження реакції. Час реакції складає 7,5 с.

2.2 Розрахунок кінетичної моделі TFG

В моделі TFG гідроксид-іон і молекулярний кисень являються продуктами реакції ініціювання, на відміну від моделі SBH. Отримання радикала і перексид-іона є малоімовірним (в даній моделі) на відміну від моделі SBH. Це пов'язано з тим, що такий процес формально відповідає переходу кисневого атома від молекули до іона з одночасним переносу радикала .

Модель TFG наведена в таблиці 2.2.

Таблиця 2.2 – Кінетичні рівняння моделі TFG

Через те, що розрив ланцюга виникає за рахунок взаємодії гідроксильного радикала з розчиненим вуглекислим газом (в реакції 2.21) в моделі TFG не включені реакції між радикалами.

Введемо заміну для відповідних хімічних елементів з таблиці 2.2 та побудуємо кінетичні схеми:

Тоді, кінетична схема реакції матиме вигляд:

Початкові умови:

Дані для побудови графіків були отримані за допомогою числового метода «Ейлера».

Результати моделювання наведені на рис. 2.2. В додатку **Б** наведено розрахунок моделі TFG.

Рисунок 2.2 – Кінетичні криві моделі TFG

З рисунку 2.2 бачимо, що концентрація O_3 зменшується і разом з цим збільшується концентрація O_2 , що свідчать про повне проходження реакції. Час реакції складає 27 с.

2.3 Модель «вплив пероксиду водню на розпад озону»

Пероксид водню являється одним з продуктів розпаду озону. Відомо, що додавання H_2O_2 прискорює розпад озону в водних розчинах. Це обумовлено протіканням наступних реакцій (2.22-2.24) (див. табл. 2.3).

Таблиця 2.3 – Кінетичні рівняння впливу пероксида водню на розпад озону

Озон повільно реагує з не дисоційованим пероксидом водню, тому в кислому розчині H_2O_2 слабо впливає на кінетику розпаду озону. Але при дисоціації пероксиду водню утворюється гідроксипероксид-іон HO_2^- , який швидко взаємодіє з озоном по реакції (2.24). Продуктами цієї реакції являється озонід-іон і гідропероксидний радикал, який прискорює ланцюговий процес розкладу озону. Швидкість розпаду озону лінійно зростає з ростом концентрації пероксиду водню. Ріст рН приводить до збільшення степеню дисоціації H_2O_2 , збільшенню концентрації HO_2^- в розчині і саме тому сприяє прискореному впливу пероксиду водню.

Введемо заміну для відповідних хімічних елементів з таблиці 2.3 та побудуємо кінетичні схеми:

Тоді, кінетична схема реакції матиме вигляд:

Початкові умови:

$$C_a = C_a(0), C_b = C_b(0), C_c = C_c(0), C_d = C_d(0), C_k = C_k(0), C_m = C_m(0), C_f = C_f(0), \\ C_g = C_g(0)$$

Дані для побудови графіків були отримані за допомогою числового метода «Ейлера».

Результати моделювання наведені на рис. 2.3. В додатку В наведено розрахунок моделі «Вплив пероксиду водню на розпад озону».

Рисунок 2.3 – Кінетичні криві моделі «Вплив пероксиду водню на розпад озону»

З рисунку 2.2 бачимо, що концентрація O_3 зменшується і разом з цим збільшується концентрація O_2 , що свідчить про повне проходження реакції. Час реакції складає 60 с.

2.4 Розрахунок кінетичної моделі NFG

В основі механізму NFG лежить модель TFG, яка доповнена реакціями розпаду гідроксильного радикала і озоніда-іона, в результаті яких утворюється іон-радикал кисню. Дані стадії грають важливу роль дуже лужному середовищі. Дана модель наведена в таблиці 2.4.

Таблиця 2.4 – Кінетичні рівняння моделі NFG

Продовження таблиці 2.4

2.5 Реакції, що не увійшли в кінетичні моделі SBH, TFG і NFG

Деякі з процесів не увійшли в приведені вище кінетичні схеми хоча вони протікають у водному середовищі.

В таблиці 2.5 наведені додаткові реакції, що беруть участь в процесі розпаду озону.

Таблиця 2.5 – Реакції, що не увійшли моделі SBH, TFG і NFG

2.6 Вплив фосфатного буфера на кінетичну модель розпаду озону

Кінетична схема, що описує вплив фосфат-іонів на процес розпаду озону представлена в таблиці 2.6. Відмітимо, що для аніонів неорганічних кислот типова величина константи рекомбінації складає $k_{ob}=5.0 \cdot 10^{10} \text{ M}^{-1}\text{c}^{-1}$. Це значення використовується для проведення розрахунків.

Таблиця 2.6 – Кінетичні рівняння впливу фосфат-іонів на розпад озону

Продовження таблиці 2.6

Інгібуючий ефект фосфатного буфера обумовлений, головним чином, взаємодією гідроксильного радикала з іонами PO_4^{3-} , HPO_4^{2-} і H_2PO_4^- , а також з не дисоційованою фосфорною кислотою.

Взаємодія H_3PO_4 з OH^- -радикалом має зворотній характер. При чому константа швидкості прямої реакції: $\text{H}_2\text{PO}_4^- + \text{OH}^- \rightarrow \text{H}_2\text{PO}_4 + \text{OH}^-$ складає $4.2 \cdot 10^4 \text{ M}^{-1}\text{s}^{-1}$, а константа зворотного процесу: $\text{H}_2\text{PO}_4 + \text{H}_2\text{O} \rightarrow \text{H}_3\text{PO}_4 + \text{OH}^-$ рівна $1.4 \cdot 10^4 \text{ M}^{-1}\text{s}^{-1}$. Через те, що в більшості робіт дана реакція не приведена, тому в подальшому моделюванні вона не враховуватиметься.

З метою перевірки кінетичної схеми з таблиці 2.6 проведемо порівняння теоретичних кінетичних кривих з експериментально залежними концентраціями [32] озону від часу, при його розпаді в водному розчині в присутності фосфатного буфера.

З даних, що приведені на рис. 2.4, слідує, що теоретично вираховані криві не протирічають експериментальним даним. Якщо при моделюванні не враховувати вплив фосфатного буфера, то розрахована швидкість розпаду озону буде значно вищою, чим те, що спостерігається в експериментах.

Рисунок 2.4 а) залежність розрахованої константи швидкості розпаду озону від рН при різних концентраціях фосфат-іонів, б) експериментальні і теоретичні кінетичні криві розпаду озону при рН 6.9 [32]

В даному розділі розглянуто моделі розпаду озону в водному середовищі. Розглянуто характеристику проходження реакції. Їх розрахунки виконані в програмному середовищі Mathcad. Результати наведені в додатках **A, Б і В**.

3 МАТЕМАТИЧНЕ МОДЕЛЮВАННЯ ПРОЦЕСУ ОЗОНУВАННЯ

3.1 Технічне завдання на розробку обчислювального модуля

Розробити обчислювальний модуль призначений для комп'ютерного моделювання процесу очищення води озонуванням.

Вихідними даними для розрахунку є:

- 1) Початкові концентрації реагуючих речовин (C , моль/м³).

Результатами розрахунку є:

- 1) Кінетичні криві реакції в залежності від часу перебування в реакторі.

Середовище для реалізації обчислювального модуля VSC 2017 C++.

Реакцій як беруть участь в процесі розпаду озону в водному середовищі приведені в табл. 3.1.

3.2 Математичне забезпечення обчислювального модуля

Математичне моделювання є одним із основних сучасних методів дослідження. Загалом під моделюванням розуміється процес дослідження реальної системи, який включає побудову моделі, її дослідження та перенесення одержаних результатів на досліджувану систему. Модель можна визначити як об'єкт, що в деяких відношеннях збігається з прототипом і є засобом опису, пояснення та/або прогнозування його поведінки. Під математичною моделлю реальної системи (процесу) розуміється сукупність співвідношень (формул, рівнянь, нерівностей, логічних умов, операторів тощо), які визначають характеристики станів системи залежно від її параметрів, зовнішніх умов (вхідних сигналів, впливів), початкових умов та часу.

Математичне моделювання включає три взаємопов'язаних етапи:

- 1) складання математичного опису досліджуваного об'єкту;
- 2) вибір методу вирішення системи рівнянь математичного опису і реалізації його в формі програми;
- 3) встановлення відповідності (адекватності) моделі об'єкту.

Дослідимо кінетику хімічних реакцій, що протікають в реакторі та змодельємо їх [33-35]. В реакторі протікає реакції розпаду озону (див. табл. 3.1).

Таблиця 3.1 – Розпад озону в водному середовищі

Продовження таблиці 3.1

Продовження таблиці 3.1

Основною стадією ініціювання являється реакція (3.3) між озоном і гідроксид-іоном, через яку виникає гідроксид-іон HO_2^- . Реакції (3.1-3.2) враховують термічний розпад озону, що існує в кислому середовищі. Стадії (3.4-3.11) представляють собою основну групу реакції, завдяки яким проходить розвиток ланцюгового процесу розпаду озону. Ці стадії приведені в більшості опублікованих кінетичних схемах. (3.12-3.22), (3.26) і (3.28) являються реакціями завершення ланцюга, які призводять до «загибелі» вільних радикалів у наслідок їх взаємодії один з одним. В результаті реакції (3.30) і (3.31) утворюється іон-радикал кисню O^- , хімічні перетворення (3.32-3.38) які грають вагомий роль в лужному середовищі.

На основі вибраної кінетичної схеми з використанням основного закону хімічної кінетики складає система диференціальних рівнянь, які приведені в табл. 3.2. Рівняння цієї системи описує зміну в часі концентрацій розчиненого озону та з'єднань, які утворилися при його розпаді.

Для полегшення обрахунку вилучимо рівняння та їх компоненти, що не впливають на проходження реакції. Важливі компоненти наведені нижче, введемо їх заміну для полегшення обчислень:

Таблиця 3.2 – Система диференціальних рівнянь

Продовження таблиці 3.2

Продовження таблиці 3.2

Система диференціальних рівнянь з таблиці 3.2 дуже велика, через що застосування аналітичних підходів для її рішення не є перспективним. Тому використовували числові методи такі як метод Рунге-Кутта, Ейлера. Рішення даної системи диференціальних рівнянь не може бути вирішена одним з вище перелічених методів, через велику різницю між константами швидкості реакції. З чого слідує, що система диференціальних рівнянь є жорсткою. Тому користуватимосся числовими методами, які реалізовані в пакеті Matlab.

Оскільки система жорстка то для рішення можна скористатися одним з методів: ode15s і ode23s. ode15s це адаптивний метод з багатьма кроками та змінного порядку. ode23s це однокроковий метод, який використовує модифіковану формулу Розенброка [36] другого порядку. Порівняно з ode15s алгоритм ode23s забезпечує високу швидкість рішення при меншій точності рішення жорсткої системи диференціальних рівнянь.

3.2.1 Рішення жорстких систем методом Розенброка

Двостадійний метод Розенброка третього порядку точності [36]

Метод застосовується для вирішення систем рівнянь, в яких права частина не залежить від t , тобто для систем виду:

$$(3.53)$$

Обмеження на вигляд системи не є істотним, для систем виду

$$(3.54)$$

Завжди можна ввести ще одну змінну u_{n+1} і додати ще одне рівняння

$$(3.55)$$

Тоді, замінивши в правій частині входження t на y_{n+1} , отримаємо систему виду (3.53).

Схема метода:

(3.56)

де J – яacobіан, I – одинична матриця.

Параметри схеми:

(3.57)

Одностадійна комплексна схема Розенброка (CROS).

Загальний вигляд багатостадійних схем сімейства Розенброка [38] має такий вигляд:

(3.58)

де f_u - матриця Яcobіана розв'язуваної задачі; s - число стадій методу; α, β - задані комплексні числа.

Формули переходу на новий часовий шар для однопараметричного сімейства одностадійних схем Розенброка мають такий вигляд:

(3.59)

де J – матриця якобіана вирішуваної системи, $\text{Re} k$ – дійсна частина вектору k з комплексними координатами, E – одинична матриця, τ – крок методу, β і α_1 – числові параметри, що визначають властивості конкретної схеми.

Дана схема володіє точністю $O(\tau^2)$ при, тому вибрано τ і наведемо досліджувані властивості системи в залежності від значення коефіцієнта β .

З'ясуємо, при яких значеннях параметра β дана схема є А-стійкою (наведені далі міркування засновані на [39-42]).

Функція стійкості одностадійної комплексної схеми Розенброка має такий вигляд [43]:

(3.60)

а за визначенням схема є А-стійкою, якщо $|R(\zeta)| \leq 1$ при $|\zeta| \leq 0$.

Нехай $\beta = a + ib$, $\zeta = \zeta_1 + i\zeta_2$. Запишу умову А-стійкості і отримаємо допустимі значення коефіцієнта β .

(3.61)

Після перетворень отримав наступну нерівність:

(3.62)

Але $\tau > 0$ тому повністю прихожу до умови А-стійкості для одностадійної комплексної схеми Розенброка: $\text{Re}(\beta) \geq \frac{1}{2}$.

Нагадаю, що схема є Lp-стійкою, якщо вона А-стійка і виконується наступна умова: при [11].

Комплексна схема Розенброка є L1-стійкою, якщо параметр β лежить на правій половині окружності з центром в точці i і радіусом 1 , а на кінцях цієї окружності володіє властивостями L2-стійкості [7].

Кінцевий вид одностадійної комплексної схеми Розенброка, для визначеності обрано

$$(3.63)$$

В точках i комплексна схема Розенброка має другий порядок апроксимації і володіє L2-стійкістю. Але при намаганні поєднати ці якості схеми при переході до дійсних чисел виявляється, що такий перехід без втрати якого-небудь із своїх властивостей неможливий: L2-стійкість не є досяжною в разі дійсних коефіцієнтів, тому доводиться робити вибір між другим порядком апроксимації і L1-стійкістю. Значення коефіцієнта β , при яких виконується одне з описаних вище властивостей, рівні відповідно (пересікання прямої) з віссю дійсних чисел) і $\beta=1$ (перетин пів окружності) з віссю дійсних чисел).

Із приведених вище слідує, що схема Розенброка з комплексними коефіцієнтами володіє кращими якостями, ніж аналогічна схема з дійсними коефіцієнтами.

Криві розраховані за методом Розенброка наведені на рис. 3.1, код з використанням метода Розенброка в додатку Д.

Рисунок 3.1 – Розпад озону в водному середовищі (за методом Розенброка)

Початкові умови:

Дані для побудови графіків були отримані за допомогою числового метода Розенброка.

Результати моделювання наведені на рис. 2.1. В додатку Д наведено розрахунок розпаду озону в водному середовищі.

3.3 Структура і технічні характеристики обчислювального модуля

Відповідно до математичної моделі (див. табл. 3.2) було розроблено алгоритм обчислювального модулю представлений у додатку **Е**. Програмний код обчислювального модуля, розробленого в середовищі Visual Studio Community 2015 C++ наведено в додатку **Ж**.

Структура обчислювального модуля:

- файл форми – MyForm.h, MyForm.cpp;
- файл проекту – Реактор_Тріщ.sln.

Призначення основних елементів програмного модуля наведено в табл. 3.3.

Таблиця 3.3 – Основні елементи обчислювального модуля та їх призначення

3.4 Інструкція користувачу програмного продукту

Програмний модуль призначений для моделювання процесу озонування води в реакторі ідеального змішування барботажного типу, що працює в ізотермічному неперервному режимі. Графічний інтерфейс користувача, який відкривається при завантаженні програми наведено на рисунку 3.2. Головне вікно містить поля для вводу вихідних даних, а саме концентрацій компонентів реакції, що відбувається в апараті, в початковий момент часу. Для виконання розрахунків слід ввести початкові дані у відповідні поля та натиснути кнопку «Розрахувати». Після чого на формі з'являється таблиця з концентраціями компонентів (див.рис.3.2):

- час перебування реакційної суміші в апараті, с;
- профілі зміни концентрації компонентів реакції за часом перебування в реакторі;

Рисунок 3.2 – Головне вікно програми

Графічна інтерпретація результатів розрахунку виводиться на окрему вкладку. Для цього необхідно на основній формі натиснути клавішу «Графік». Результат побудови графік наведений на рис. 3.4.

Рисунок 3.3 – Результати розрахунку

Рисунок 3.4 – Графік зміни концентрацій компонентів за часом проходження реакції

Для отримання загальної інформації щодо програмного продукту або інструкції щодо користування програмою необхідно використати спеціальне меню «Довідка» (див. рис. 3.5), відповідно, вибравши пункт «Про програму» або «Інструкція користувачу».

Рисунок 3.5 – Меню для виклику довідкової інформації

На рисунку 3.6 наведено вигляд форми «Інструкція користувачу». Тут наведено короткі рекомендації щодо користування програмним модулем.

На рисунку 3.7 наведено форму «Про програму», в якій описано призначення обчислювального модуля та наведено дані про розробника.

Рисунок 3.6 – Вікно «Інструкція користувачу»

Рисунок 3.7 – Вікно «Про програму»

Результати моделювання за методом Розенброка наведені на рис. 3.1 (залежність концентрацій від часу проходження реакції).

Отже, за результатами розробленого програмного модуля було отримано профілі розподілу концентрацій реагуючих речовин – O_3 , O_2 , OH , HO_2 , HO_3 та ін. Результати розрахунку трохи відрізняють, між програмним модулем і обрахунками в Matlab, через використання різних методів обрахунку (Розенброка в середовищі Matlab, додаток Д і Ейлера в програмному модулі, додаток Ж).

З графіків на рис. 3.1 та рис. 3.4 (час $t=2t$) бачимо, що час повного проходження реакції склалає 190 с.

В даному розділі подана характеристика елементів, що входять до складу розробленої програми, а саме основних процедур та компонентів, що були використані. Коди розрахунків, виконаних в середовищі MatLab наведені додатку Д. Програмний код C++ наведено в додатку Ж.

4 РОЗРОБЛЕННЯ СТАРТАП-ПРОЕКТУ

Робота є розробка стартап-проекту з розробки та впровадження технології очистки води методом озонування. У роботі проаналізовано ринок споживачів та виробників оптичних аналізаторів, а також поставників сировини, оцінено ризики проекту, розраховано техніко-економічні показники, проаналізовано стратегії поведінки на ринку.

Бізнес-ідея: впровадження нової технології

Мета стартапу: впровадження нової технології для кращої очистки води

Місце у ланцюжку цінностей інноваційного процесу:

Розробка ПЗ

Модель стартапу: B2B

Назва продукту: SoftWater (технологія очистки води озонування)

Суб'єкти замовлення: Власна ідея на основі потреби ринку

Об'єкт дослідження: Станції очистки води та водопідготовки, потреби споживачів та користувачів існуючих аналогів.

Продукт: Технологія очистки водри озонуванням. Комплектація: опис 1 та результати моделювання процесу.

1. Технологія впровадження:
2. Патент на авторське право ідеї технології озонування води
3. Підготовчі курси для працівників (для здобуття навичок роботи за новою технологією, або найм обучених працівників в штат).

Кваліфікація персоналу

За етапом роботи над проектом та відповідною кваліфікацією персонал поділяється на групи:

Таблиця 4.1 – Кваліфікація персоналу

Споживач

Продукт орієнтований на станції очистки води.

Ринок збуту

У перший рік існування стартап орієнтується на місто Київ та регіональних (Київська область) споживачів, після чого планується вихід ідеї за кордон України (здебільшого країни ближнього зарубіжжя).

Конкурентні переваги

Однією з переваг озону з гігієнічної точки зору є нездатність, на відміну від хлору, до реакцій заміщення, у воду не вносяться сторонні домішки і не виникають шкідливі для людини сполуки. Особливістю озону є і його швидке розкладання у воді з утворенням кисню, тобто озон володіє повною екологічною безпекою. Час "життя" озону у воді – 10...15 хв. Озон деколи використовують у поєднанні з іншими методами: хлоруванням, флоатацією, електрохімічної обробкою і ультразвуком. В результаті, при

застосуванні цієї технології не утворюються такі хлорвміщуючі речовини, як діоксин.

У таблиці 4.2 показана ефективність дії озону в порівнянні з іншими окислювачами на результати обробки води.

Таблиця 4.2 – Показники, за якими продукт виграє на ринку.
Ефективність дії озону

4.1 Аналіз зовнішнього та внутрішнього середовища стартапу

Невід'ємною частиною проектування стартапу є аналіз зовнішнього та внутрішнього середовища.

Зовнішнє середовище – усі умови і фактори, які виникають незалежно від діяльності проекту і здійснюють суттєву дію на нього.

Внутрішнє середовище визначає технічні і організаційні умови роботи стартапу і є результатом управлінських рішень. Метою аналізу внутрішнього середовища служить виявленню слабких і сильних сторін діяльності організації.

Критерії для аналізу зовнішнього середовища:

- Політичні фактори (загальна політична ситуація в країні, закони, політична стабільність);
- Економічні чинники (курс валют, інфляція, вартість капіталу, рівень доходу населення, податки, загальна динаміка розвитку економіки);
- Соціальні фактори (демографічна ситуація, рівень зайнятості населення, особливості менталітету, смаки і переваги);
- Фактор попиту (обсяги ринку, динаміка його розвитку);
- Фактор конкуренції (щільність ринку, кількість основних конкурентів);
- Технологічні фактори (рівень розвитку науки, галузеві технології, інновації);
- Природно-екологічні чинники (кліматична зона, екологія).

Критерії для аналізу внутрішнього середовища:

- Організація (кваліфікація співробітників, націленість на результат);
- Фінанси (прибуток, витрати, швидкість обороту грошових коштів, стабільність);

- Інновації (частота впровадження інновацій, ступінь новизни, термін окупності вкладених коштів);
- Маркетинг (ефективність реклами, популярність, відгук споживачів, асортимент, рівень цін, додаткові послуги, обслуговування клієнтів).

У своїй роботі я звернувся до такого методу аналізу, як SWOT-аналіз. Аббревіатура методу утворена за допомогою з'єднання початкових літер слів повного найменування: Strengths - Weaknesses - Opportunities - Threats (сила - слабкість - можливості - загрози).

Метод полягає у виявленні позитивних та негативних компонентів, чинників, ситуацій зовнішнього середовища, та розташування їх у сітковій таблиці у відповідності до імовірності виникнення та сили впливу на досліджуваний об'єкт, підприємство чи організацію.

Таким чином, можна виявити напрям фокусу для підтримання функціонування та розвитку проекту.

Таблиця 4.3 – Таблиця можливостей зовнішнього середовища

Таблиця 4.4 – Таблиця загроз зовнішнього середовища

Отже, головну увагу при втіленні проекту слід звертати на зміни в інвестиційному середовищі, та на розвиток розважальної індустрії.

Серед небезпек варто вирізнити можливість повернення економічного спаду та зміни в податковій системі нашої держави стосовно підприємництва.

Внутрішнє ж середовище являє собою сукупність чинників, що створюються і контролюються фірмою/підприємством/компанією. Складові внутрішнього середовища фірми безпосередньо впливають на її ефективність: стратегії, цілі, завдання, структура, технологія, персонал, організаційна культура.

Важливо відзначити, що його аналіз має бути системним. Залежно від конкретної ситуації він може бути унікальним, але при цьому обов'язково слід дотримуватися головної умови – повноти аналізу, його якості і кінцевої ефективності.

Зовнішнє та внутрішнє середовище фірми тісно взаємопов'язані: з одного боку, фірма створює внутрішнє середовище під впливом та на базі врахування факторів зовнішнього середовища, з другого – фірма адаптується до зовнішнього середовища за допомогою чинників внутрішнього середовища.

Таблиця 4.5 – Таблиця переваг та недоліків внутрішнього середовища

4.2 Паспорт споживача

Орієнтована юридична особа (компанія) споживач кінцевого продукту особа будь-якого віку, за платоспроможністю від 62000 грн.

За способом життя орієнтуємося на всіх людей (адже технологія моделювати процес очистки води).

Тип особистості може різнитися, основні акценти особистості оптиміст та реаліст. За ставленням до товару, обґрунтована мотивація до придбання, повна і ґрунтовна інформація про товар та пошук вигоди.

Сімейні цінності вносять високу кореляцію у ставленні особи до товару. За співвідношенням бажання придбати і цінової межі є збалансованим, так як сплативши за одну програму можна здійснити моделювання процесу очистки води озоном, що дозволяє не будуючи устаткування дізнатися характер протікання процесу.

4.3 Аналіз джерел фінансування стартапу

На етапі створення або розширення бізнесу одним з ключових питань є отримання фінансування. Кошти можуть бути необхідні для закупівлі обладнання, оренди офісу, найму кваліфікованих фахівців або в якості оборотних коштів. Якщо власник бізнесу або автор бізнес-ідеї не розташовує власними фінансовими ресурсами, він звертається до зовнішніх джерел запозичення. Основна проблема зовнішнього фінансування стартапів полягає в тому, що існує великий ризик неповернення засобів, що вкладаються в новий бізнес.

Виділяють такі основні моделі фінансування стартапів:

- 1) *Особисті заощадження стартаперів;*
- 2) *Бізнес-партнерство.* Якщо свого капіталу замало для початку підприємницької діяльності, але є життєздатна ідея для стартапу, виходом може стати пошук партнера для спільного володіння бізнесом;
- 3) *Модель «3Д»:* домашні, друзі, дурні. Використовуються на перших етапах становлення проекту, коли вже є витрати, а прибутку ще немає;

- 4) *Кредитування*. Один з найбільш небажаних видів фінансування нового проекту, краще брати кредит на більш пізніх етапах;
- 5) *Венчурні фонди*. Венчурними називають фонди приватного капіталу, які інвестують у підприємства, що знаходяться на ранніх стадіях свого розвитку;
- 6) *Бізнес-ангели*. Бізнес-ангел — це фізична особа, яка готова вкладати кошти в стартап на нульовому або початковому етапі, в обмін на частку в майбутньому підприємстві;
- 7) *Бізнес-інкубатори*. Добре підходить тим, хто має ідею для стартапу, проте не знає як втілити її в реальному житті без підприємницького досвіду. Таким людям інкубатори надають інфраструктуру (офіс, оргтехніку, зв'язок), участь у тренінгах та тематичних заходах, послуги консультантів або менторів. Вони допомагають провести маркетингові дослідження, скласти бізнес-план, розвинути проект до рівня, коли ним можуть зацікавитися потенційні інвестори;
- 8) *Бізнес-акселератори*. Є моделлю підтримки бізнесу на ранній стадії, яка передбачає інтенсивний розвиток проекту в найкоротші терміни. Участь в акселераторі являє собою обмежені за часом платні освітні програми для підприємців, які приходять в акселератор з уже сформульованої ідеєю і командою;
- 9) *Краудфандинг*. Організовується інтернет-платформа, на якій реєструються учасники — люди, які хочуть долучитись до реалізації інновацій, але яким недостатньо особистих коштів для інвестування в проекти в якості бізнес-ангела або венчурного капіталіста.;

10) *Грантові організації*. Первинна фінансова підтримку на доволі лояльних умовах. Суть діяльності грантових організацій полягає у наданні фінансової підтримки молодим креативним людям із прогресивними ідеями.;

11) *Initial Public Offering (IPO)*. Одним із способів залучення зовнішніх інвестицій є первинна публічна пропозиція акцій. IPO є пропозицією, яку компанія робить всім зацікавленим інвесторам;

12) *Субсидії*

Масштаби бізнесу компанії, її імідж і популярності серед інвесторів, загальноекономічна ситуація в країні і світі, стан ринку – ось головні чинники вибору моделі фінансування стартапів. У таблиці представлено передбачення місця моделей у фінансуванні «SoftWater»

Таблиця 4.6 – Джерела фінансування стартапу

На початкових етапах команда розробників є основним ресурсом, і діє за моделлю «ЗД», оскільки ми можемо знайти необхідні місця для розташування нашої технології.

Однак на наступних етапах виробництва необхідне залучення коштів інвесторів, меценатів. Тому вже під час першого етапу команда займається пошуком інвесторів та представленням свого проекту, піаром. Це і розмови телефонні, зустрічі з імовірними інвесторами, так і розміщення стартапу на сайтах, як Startup.Network, BYITSMART.

Прогнозовані інвестори: ТОВ «ЕКОСИСТЕМ УКРАЇНА», Корпорація «Енергоресурс-інвест», ТОВ "Дигидрол", ТОВ «НПО «Екософт». Ці установи, компанії мають величезний інтерес до нашого стартапу, бо він використовуватиме у своїй діяльності екологічну технологію очистки води, яка є «дуже цікавою» для інвесторів.

4.4 Розрахунок ціни інноваційної пропозиції на ринку

Оскільки в процесі очистки води постає питання про характер протікання очистки води озоном, є доцільним створення програмно-розрахункового модуля, який би проводив моделювання та розрахунок технології очищення води.

Для економічного обґрунтування НДР необхідно розрахувати основні техніко економічні показники: собівартість; прибуток; капіталовкладення; рентабельність; коефіцієнт економічної ефективності; фондоємність; фондоддача [44].

Собівартість – витрати на виробництво і реалізацію товару (послуги або виконання роботи) в грошовому вигляді. Розраховується за формулою (4.1):

(4.1)

де А – амортизація основних фондів, ОбК – обігові кошти

Основні фонди (ОФ) – це засоби праці, які багаторазово приймають участь у виробничому процесі, частково або повністю зберігають свою натуральну форму і їх вартість переноситься на вартість готової продукції частинами у вигляді амортизації.

До ОФ відносять: будівлі і споруди; транспорт; машини і обладнання; господарський і виробничий інвентар; нематеріальні активи (ліцензії, сертифікати і т. д.).

Амортизація - це процес поступового перенесення вартості основних фондів на вартість продукції в міру зносу.

Грошовим вираженням амортизації є амортизаційні відрахування (4.2).

(4.2)

де H_a - норма амортизації, Φ_{nn} - повна початкова вартість ОФ.

Повна початкова вартість ОФ – вартість ОФ до моменту запуску їх, а Норма амортизації - це відсоток амортизаційних відрахувань від балансової вартості основних фондів. Норма амортизації встановлюється податковим законодавством.

Прибуток – частина отриманих грошей від продажу продукції (послуги чи роботи), яка залишається на підприємстві.

(4.3)

де Ц – ціна на продукцію (послугу чи роботу).

Рентабельність виробництва:

(4.4)

Термін повернення капіталовкладень:

(4.5)

Коефіцієнт економічної ефективності:

(4.6)

Фондовіддача виробничих фондів:

(4.7)

де B – кількість виробів.

Фондоємність:

(4.8)

При розрахунку амортизації слід врахувати той факт, що термін експлуатації ОФ становитиме півроку (місяць на безпосередню розробку і 5 місяців на реалізацію програми на ринку).

Таблиця 4.7 – Розрахунок амортизації ОФ

Обігові кошти включають: оборотні фонди та розрахунки. Оборотні фонди підприємства – матеріальні і фінансові активи, які повністю використовуються у виробничому процесі, а їх вартість переносить на вартість готової продукції повністю і одразу. Розрахунки – гроші у будь-якому вигляді.

Таблиця 4.8 – Обігові кошти

Форма оплати праці розробника – відрядна, консультанта – акордна. Фонд оплати праці включає: заробітну плату розробника 6400 грн; заробітну плату консультанта 4500 грн 20 робочих годин з оплатою 32 грн/год); відрахування у фонд соціальних заходів грн.

Звідси:

Продаж розрахункового модуля, буде реалізовуватись на ринку колишніх країн СНД. Основний ринок зосередиться в Україні. З даних міркувань, необхідно вивчити ринок, та визначити попит. Даний розрахунковий модуль можуть купувати як підприємства які уже мають виробництво очищеної води, для розрахунку модернізованої системи

виробництва, так і підприємства хімічної промисловості, що мають можливість створити таке виробництво.

В Україні до підприємств, яких може зацікавити даний розрахунковий модуль, за даними [45-48], відносяться:

- ТОВ «ЕКОСИСТЕМ УКРАЇНА»
- Корпорації «Енергоресурс-інвест»;
- ТОВ "Дигидрол";
- ТОВ «НПО «Екософт»
- Компанія «Pacific Ozone Technology, Inc.» (США [49])

З перчислених вище зацікавлених підприємств потенційними покупцями можуть бути лише третя частина. З цих міркувань планується протягом півроку продати десять екземплярів програми, вартістю 13000 грн.

Розрахуємо рентабельність за формулою (4.4):

Розрахуємо термін повернення капіталовкладень за формулою (4.5):

Оскільки ми плануємо продавати програму періодично то
Розрахуємо оптимальну ціну для програми за формулою:

(4.9)

де Ц-ціна програми, В – кі-ть екземплярів програми.

Знайдемо оптимальну ціну для програми:

Збільшемо ціну програми до 62000 грн за екземпляр і розрахуємо прибуток:

Розрахуємо рентабельність за формулою (4.4):

Розрахуємо термін повернення капіталовкладень за формулою (4.5):

Знайдемо коефіцієнт економічної ефективності за формулою (4.6):

Розрахуємо фондівдачу за формулою (4.7):

Знайдемо фондоемність за формулою (4.8):

Розраховані основні техніко-економічні показники наведені в таблиці 4.9.

Таблиця 4.9 – Основні техніко-економічні показники

Отже, можна зробити висновок, що якісними показниками розробки обчислювального модуля є прибуток, що становить 556232 грн/рік,

рентабельність – 872%, річна собівартість продукції 63768 грн/рік та показник ефективності підприємства - 6,67.

З отриманих результатів можна зробити висновок, що розробка обчислювального модуля є економічно доцільною і вигідною. Термін повернення капіталовкладень вкладникам становитиме приблизно 0,15 роки.

4.5 Стратегія конкурентної поведінки на ринку

Інноваційна стратегія реалізується в рамках стратегічного планування. З вибором стратегії пов'язана розробка планів, проведення досліджень, здійснення інших форм інноваційної діяльності. Основа розробки інноваційної стратегії ґрунтується на теорії життєвого циклу продукту, ринковій позиції фірми та її науково-технічній політиці.

Сучасні вітчизняні технології не в повній мірі забезпечують необхідні вартісні та якісні показники надання послуг, що є однією із головних причин низького рівня конкурентоспроможності. Отже, на сьогоднішній день існує об'єктивна потреба у забезпеченні конкурентоспроможності підприємств України шляхом інтенсифікації інноваційних процесів, тому ми використовуємо наступальну стратегію та стратегію спеціалізації

Наступальна стратегія характерна для фірм, які базують свою діяльність на принципах підприємницької конкуренції. Вона пов'язана з прагненням фірм досягти технічного й ринкового лідерства шляхом створення та впровадження нових продуктів. Така стратегія передбачає постійну орієнтацію фірми на світові досягнення науки й технології, наявність наукових розробок, що фінансуються та здійснюються самою фірмою, швидке реагування та пристосування до нових технологічних

можливостей. Особливістю наступальної інноваційної стратегії є активна участь співробітників фірми у створенні та впровадженні інновацій.

Після проходження початкових етапів, виявлення недоліків, при дотриманні технології “SoftWater” якість очищуваної води покращуватиметься. Наступальна стратегія припускає активну інноваційну політику компанії.

Стратегія спеціалізації передбачає концентрацію на потребах одного цільового сегменту, без прагнення охопити увесь ринок. Мета тут полягає в задоволенні потреб вибраного цільового сегменту краще, ніж конкуренти (інші технології очистки води). Така стратегія може спиратися як на диференціацію, так і на лідерство по витратах, або і на те, і на інше, але тільки у рамках цільового сегменту.

4.6 Вибір бізнес-моделі стартапу

Сьогодні виділяють наступні види бізнес моделей:

- *Франчайзинг* - вид відносин між ринковими суб'єктами, коли одна сторона за певну плату передає іншій право на певний вид бізнесу, використовуючи розроблену бізнес-модель
- *Прямі продажі* - продаж споживчих товарів і послуг, здійснювана від людини до людини поза стаціонарними точок роздрібною торгівлі
- *B2B (Business-to-Business - бізнес-для-бізнесу)* - вид інформаційного та економічної взаємодії, класифікованого за типом взаємодіючих суб'єктів (юридичні особи). Компанії поставляють товари і послуги для інших компаній, а не для кінцевого споживача. Наприклад, виготовлення рекламної продукції для іншої компанії, яка займається просуванням товару або послуги

- *B2C (Business-to-Consumer - бізнес-для-споживача)* - форма електронної торгівлі, метою якої є прямі продажі. Ефективний спосіб усунення географічної віддаленості між великими і малими містами за рахунок уніфікації цінової політики та діяльності служб доставки
- *B2G (Business-to-Government - бізнес для уряду)* - комунікація між бізнесом і державою. Система характеризує електронну комерцію і застосовується, наприклад, в організації держзакупівель
- *G2B (Government-to-Business - уряд для бізнесу)* - набір програмних і урядових коштів для онлайн-взаємодії виконавчої влади і комерційних структур (сайти урядових органів, держзакупівлі і т. д.)

З усіх можливих моделей бізнес-процесів найбільше підходять B2B.

B2B (*Business-to-Business - бізнес-для-бізнесу*) - термін, що позначає комерційні взаємини між організацією (бізнес) та юридичним лицем.

При аналізі бізнес-моделей для стартапу обираємо модель B2B, тому що технологія застосовуватиметься для масового виробництва..

4.7 Карта бізнес-процесів виконання стартап-проекту

Таблиця 4.10 – Карта бізнес- процесів виконання стартап-проекту

Продовження таблиці 4.10

4.8 Системний аналіз бізнес-процесів стартап-проекту

Таблиця 4.11 – Системний аналіз бізнес – процесів стартап - проекту

4.9 Оцінка ризиків і страхування розробки

На сьогоднішній день не існує такого бізнес-плану у якому не було б прихованих труднощів, які можуть загрожувати його існуванню. Передбачити подібні труднощі та шляхи їх подолання являється дуже важливою задачею для будь-якого підприємства. Тому насамперед потрібно виявити та оцінити можливі проблеми, з якими може зіткнутися підприємство.

У цьому розділі необхідно виявити основні типи ризиків у діяльності підприємства, передбачити моменти їх можливого виникнення, розробити заходи щодо їх зменшення - мінімізації. Необхідно оцінити реальність проекту нової діяльності підприємства та визначити можливі витрати підприємства у разі непередбачуваних ситуацій.

4.10 Господарські ризики та страхування розробки

Підприємницький ризик в сучасних умовах – це можливість неповернення коштів, витрачених на виробництво та реалізацію продукції, яка залежить від видів людської діяльності та природних явищ. Таке поняття дає змогу: характеризувати ризик не лише з точки зору якісної оцінки, але й з кількісної; застосовувати конкретні методи та прийоми щодо його запобігання; ідентифікації його з ризиками, притаманними іншим сферам діяльності підприємств. Результати впливу ризиків та методи страхування наведені в таблиці 4.12. Для визначення ймовірності впливу ризиків використовувались наступні показники:

- 0 - ризик розглядається як неістотний;
- 25 - ризик, швидше за все, не реалізується;
- 50 - про настання події нічого напевно сказати не можна;
- 75 - ризик, швидше за все, виявиться;
- 100 - ризик напевно реалізується.

Таблиця 4.12 – Господарські ризики та страхування розробки

Продовження таблиці 4.12

В даному розділі проведено аналіз зовнішнього а внутрішнього ринку, створено паспорт споживача, проведено аналіз джерел фінансування, розраховано ціну інноваційної пропозиції на ринку, розроблено стратегію конкурентної поведінки на ринку, вибрано бізнес-модель стартап-проекту, розроблено карту бізнес-процесів виконання стартап-проекту та проведений системний аналіз та оцінка ризиків.

ВИСНОВКИ

В магістерській дисертації «Очищення води методом озонування» розроблено було вирішено наступні задачі:

1. проаналізовано технологічні особливості виробничого процесу озонування;
2. розроблено математичну модель розпаду озону в водному середовищі;
3. розроблено обчислювальний модуль для розрахунку математичної моделі процесу озонування;
4. Проведено комп'ютерне моделювання кінетики процесу розпаду озону в водному середовищі;
5. Отримано результати моделювання процесу розпаду озону в водному середовищі та кінетичні криві.
6. Розраховано стартап-проект «SoftWater». Наведені розрахунки показують можливість запуску стартапу у виробництво. Було обрано шляхи розвитку на початковому та наступних етапах запуску проекту, методики ринкового впровадження, стратегії розвитку, бізнес-модель стартапу (B2B), проаналізовано цільових споживачів, конкурентів та ризику;
7. Проведено економічне обґрунтування створення обчислювального модуля, та визначено, що розробка обчислювального модуля є економічно доцільною та вигідною.

ПЕРЕЛІК ПОСИЛАНЬ

1. Озонування води [Електронний ресурс] – Режим доступу до ресурсу: <http://ecotronic.com.ua/ru/article/506/>.
2. Озонування води [Електронний ресурс] – Режим доступу до ресурсу: <http://linex-west.com/ua/articles/1>.
3. Воронов, Ю.В. Водоотведение и очистка сточных вод: Учебник для вузов / Ю.В. Воронов, С.В. Яковлев. - М.: Издат-во Ассоциации строительных вузов, 2006 - 704 с.
4. Сартакова О.Ю. Чистая вода: традиции и новации: Учебное пособие / О.Ю. Сартакова, О.М. Горелова. - Барнаул: Издат-во Алт ГТУ, 2002. - 178 с.
5. Энергетика и защита окружающей среды. Свойства и применение озона: учеб. пособие / Морозов А.П., Коптев А.П., Семкин И.Г. и др. Магнитогорск: МГТУ, 2002. 175 с.
6. Самойлович В.Г., Гибалов В.И., Козлов К.В. Физическая химия барьерного разряда. М.: Изд-во МГУ, 1989. 210 с.
7. Филиппов Ю.В., Вобликова В.А., Пантелеев В.Т. Электросинтез озона. М.: Изд-во МГУ, 1989. 120 с.
8. Козлов К.В. Распределение температуры и профиль тепловыделения в разрядном промежутке озонатора / Вестник МГУ, сер. 2. Химия. 1990. т. 31. С. 20-30.
9. Пейго Ли. Исследование электрических характеристик барьерного озонатора с учетом тепловых процессов // Автореф. дисс. канд. техн. наук. М.: МЭИ, 1998. 16 с.
10. Лунин В.В., Попович М.П., Ткаченко С.Н. Физическая химия озона. М.: Издд-во МГУ, 1998. 480 с.
11. Драгинский В.Л., Алексеева Л.П., Самойлович В.Г. Озонирование в процессах очистки воды / под общ. ред. В.Л. Драгинского. М.: ДеЛи

- принт, 2007. 400 с.
- 12.Схема трубчатого озонатора системы Велсбах [Электронный ресурс] – Режим доступа до ресурсу: [http://ru-ecology.info/pics/20106160316000 5/](http://ru-ecology.info/pics/201061603160005/).
 - 13.Кожин В.Ф., Кожин И.В. Озонирование воды. М.: Стройиздат, 1974. 159 с.
 - 14.Орлов В.А. Озонирование воды. М.: Стройиздат, 1984. 88 с.
 - 15.Васильев А.Л., Васильев Л.А. Использование вихревых элементов в устройствах синтеза озона / Вода: экология и технология. ЭКВАТЭК-2000 // Тезисы докладов 4-го Международного конгресса. М., 2000. С. 231-235.
 - 16.Схема пластинчатого озонатора системы Отто [Электронный ресурс] – Режим доступа до ресурсу: [http://ru-ecology.info/pics/202611102780 012/](http://ru-ecology.info/pics/202611102780012/).
 - 17.СТРИМОЗОН [Электронный ресурс] – Режим доступа до ресурсу: <https://streamozone.business-guide.com.ua/>.
 - 18.Digidrol [Электронный ресурс] – Режим доступа до ресурсу: <https://digidrol.ub.ua/#>
 - 19.Корпорация АСКО-УКРЕМ [Электронный ресурс] – Режим доступа до ресурсу: <https://www.acko.ua/>.
 - 20.ТМ OZON-PROM - производство озонаторов, продажа и аренда [Электронный ресурс] – Режим доступа до ресурсу: <https://ozon-prom.com.ua/>.
 21. А. с. 1177267 СССР, С01В 13/30. Генератор озона. Опубл. 22.03.1984.
 22. А. с. 1468854 СССР, С01В 13/10. Генератор озона. Опубл. 01.07.1987.
 23. А. с. 1680617 СССР, С01В 13/10. Высокочастотный генератор озона / Васильев Л.А. и др. опубл. 01.06.1991.К
 - 24.Найденко В.В., Васильев Л.А., Васильев А.Л. Озонаторные модули // Водоснабжение и са-нитарная техника. 1992. № 10. С. 12-15.

- 25.Кульский Л.А., Строкач П.П. Технология очистки природных вод. К.: Вища шк., 1986. 352с.
- 26.Васильев А.Л., Васильев Л.А. Использование вихревых элементов в устройствах синтеза озона / Вода: экология и технология. ЭКВАТЭК-2000 // Тезисы докладов 4-го Международного конгресса. М., 2000. С. 231-235.
- 27.Драгинский В.Л. Озонирование в процессах очистки воды / В.Л. Драгинский, Л.П. Алексеева, В.Г. Самойлович. - М.: ДеЛи принт, 2007. - 400 с.
- 28.Орлов В.А. Озонирование воды / В.А. Орлов. - М.: Стройиздат, 1984. - 88 с.
- 29.Experimental aspects of mechanistic studies on aqueous ozone decomposition in alkaline solution [Электронный ресурс] – Режим доступа до ресурсу: <https://eurekamag.com/pdf/010/010632031.pdf>.
- 30.Quantification of hydroxyl radical generation with spin trapping ESR technique in batch system [Электронный ресурс] – Режим доступа до ресурсу: https://www.jstage.jst.go.jp/article/jwet/1/1/1_1_43/_pdf.
- 31.DEVELOPMENT OF THE OZONIZER AND OZONATION TECHNOLOGY FOR WATERWORKS IN JAPAN [Электронный ресурс] – Режим доступа до ресурсу: https://www.jstage.jst.go.jp/article/jwet/2/2/2_2_37/_pdf.
- 32.Игнатъев А.Н. Математическое моделирование процессов озонирования водных растворов химических соединений : диссертация ... кандидата химических наук : 02.00.04
- 33.Трищ В.Р., Безносик Ю.О. Комп'ютерне моделювання процесу озонування води. // VII Міжнародна конференція студентів, аспірантів та молодих вчених з хімії та хімічної технології, 11-13 квітня 2018 – Збірка тез доповідей учасників – Київ, 2018. – с. 194.

- 34.Тріщ В.Р., Безносик Ю.О. Моделювання кінетики процесу озонування води. Шоста міжнародна науково-практична конференція «Комп'ютерне моделювання в хімії і технологіях та системах сталого розвитку – КМХТ2018», Київ 16-18 травня 2018 року. ЗБІРНИК НАУКОВИХ СТАТЕЙ. – Київ, 2018. – с. 227-229. – ISBN 978-617-696-740-8
- 35.Тріщ В. Р. COMPUTER MODELING OF WATER OZONIZATION PROCESS. // матеріали II Всеукраїнської студентської науково-практичної конференції з міжнародною участю, 22 березня 2018 р.- К.: КПІ ім. Ігоря Сікорського.–Том II.–342с..
- 36.Розенброк Х. Вычислительные методы для инженеров-химиков / Х. Розенброк, С. Стори. – Москва: Мир, 1968. – 444 с.
- 37.Метод Розенброка решения жестких систем [Электронный ресурс] – Режим доступа до ресурсу: <http://bbi-math.narod.ru/rosenbrock/rosenbrock.html>.
- 38.Калиткин. Н.Н. Полуявные схемы для задач большой жесткости. ЭНТП, Серия Б, Т. VII-1, ч.1. М.: Янус-К, 2008, С.153-171.
- 39.Альшин А.Б., Альшина Е.А., Калиткин Н.Н., Корягина А.Б. Схемы Розенброка с комплексными коэффициентами для жестких и дифференциально-алгебраических систем // Журнал вычислительной математики и математической физики. – 2006. – Т.46, № 8. – С.1392-1414.
- 40.Альшин А.Б., Альшина Е.А., Лимонов А.Г. Двухстадийные комплексные схемы Розенброка для жестких систем // Журнал вычислительной математики и математической физики. – 2009. – Т.49, №2. – С.270-287.
- 41.Ширков П.Д. Оптимально затухающие схемы с комплексными коэффициентами для жестких систем ОДУ // Математическое моделирование. – 1992. – Т.4, № 8. – С.47-57.

- 42.Калиткин Н.Н., Панченко С.Л. Оптимальные схемы для жестких неавтономных систем // Математическое моделирование. – 1999. Т.11, № 6. – С.52-81.
- 43.Новиков Е.А. Исследование (m,2)-методов решения жестких систем. // Вычислительные технологии. – 2007. – Т.12, №5. – С.103-115.
- 44.Покропивний, С.Ф. Економіка підприємства [Текст] / С. Ф. Покропивний. – К.: КНЕУ, 2003. – 608 с.
- 45.КОМПЛЕКСНІ РІШЕННЯ ДЛЯ ОЧИСТКИ ВОД [Электронный ресурс] – Режим доступа до ресурсу: <http://ekosystem-ukraine.com.ua/>.
- 46.Водопостачання та водовідведення [Электронный ресурс] – Режим доступа до ресурсу: <http://energoresurs.com/>.
- 47.Промышленная и коммерческая очистка воды [Электронный ресурс] – Режим доступа до ресурсу: <http://digidrol.com.ua/index/0-5>.
- 48.Промышленные системы очистки воды [Электронный ресурс] – Режим доступа до ресурсу: <https://ecosoft.ua/promyshlennyye-sistemy/>.
- 49.Pacific Ozone – Ozone Generators and Complete Integrated Systems [Электронный ресурс] – Режим доступа до ресурсу: <http://pacificozone.com/>.

ДОДАТОК А**Розв'язання математичної моделі СВН в середовищі Mathcad**

Додаток А (продовження)

ДОДАТОК Б**Розв'язання математичної моделі TFG в середовищі Mathcad**

Додаток Б (продовження)

ДОДАТОК В

Розв'язання математичної моделі «вплив пероксиду водню на розпад озону» в середовищі Mathcad

Додаток В (продовження)

ДОДАТОК Д

**Розв'язання математичної моделі кінетики хімічних реакцій
процесу розпаду озону в водному середовищі, Matlab.**

Файл з функцією

Додаток Д (продовження)

Файл виклику функції і побудови графіків

ДОДАТОК Е**Алгоритм розрахунку кінетики розпаду озону**

Додаток Е (продовження)

ДОДАТОК Ж

**Розрахунок математичної моделі кінетики хімічних реакцій процесу
розпаду озону в водному середовищі, C++.**

Файл "MyForm.h"

Файл "MyForm.cpp"

Додаток Ж (продовження)

Додаток Ж (продовження)

Додаток Ж (продовження)

Додаток Ж (продовження)

Додаток Ж (продовження)

Додаток Ж (продовження)

Додаток Ж (продовження)

Додаток Ж (продовження)