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

Факультет хіміко-технологічний.

Кафедра кібернетики хіміко-технологічних процесів.

Рівень вищої освіти - другий (магістерський)

Спеціальність 8.05020202 - Комп'ютерно-інтегровані технологічні процеси і виробництва

ЗАТВЕРДЖУЮ
В.о. завідувача кафедри
_____ Т.В.Бойко
(підпис)
« » 20 р.

ЗАВДАННЯ
на магістерську дисертацію студенту
Мацібура Олександр Петрович
(прізвище, ім'я, по батькові)

1. Тема дисертації Комп'ютерно-інтегрована система для моделювання процесу знешкодження рідких радіоактивних відходів
науковий керівник дисертації кандидат технічних наук, доцент Бугаєва Людмила Миколаївна.
(прізвище, ім'я, по батькові, науковий ступінь, вчене звання)

затверджені наказом по університету від « » 201 р. №

2. Строк подання студентом дисертації 9 червня 2017 р.

3. Об'єкт дослідження: моделі технологічної схеми знешкодження РРВ методом іонно-селективної очистки та порівняння його ефективності із методами знешкодження РРВ на базі процесів упарювання, бітумування та цементування.

4. Предмет дослідження: комп'ютерно - інтегрована система для моделювання процесу знешкодження рідких радіоактивних відходів іонно-селективним методом.

5. Перелік завдань, які потрібно розробити: вивчити процес сорбції радіонуклідів Co та Mn на різних сорбентах; розробити та проаналізувати варіанти технологічної схеми процесу очищення рідких радіоактивних відходів. Вибрати її базовий

варіант; виконати аналіз структури обраної технологічної схеми; провести розрахунок матеріальних балансів технологічної схеми.

6. Орієнтовний перелік ілюстративного матеріалу: презентація.

7. Орієнтовний перелік публікацій: The use of ion-selective method for the disposal of liquid radioactive waste from nuclear power plants; Можливості знешкодження рідких радіоактивних відходів; Застосування іонно-селективного методу для знешкодження рідких радіоактивних відходів атомних електростанцій; Оцінювання екоефективності хіміко- технологічних схем за допомогою алгоритму WAR; Сучасні програми - симулятори для моделювання та розрахунку хіміко-технологічних систем.

8. Консультанти розділів дисертації

Розділ	Прізвище, ініціали та посада консультанта	Підпис, дата	
		завдання видав	завдання прийняв
Практична частина	м.н.с., Ярошенко К.К.		

9. Дата видачі завдання 1 вересня 2017 р.

Календарний план

№ з/п	Назва етапів виконання магістерської дисертації	Термін виконання етапів магістерської дисертації	Примітка
1	Розробка календарного плану	12.09.2015	
2	Літературний огляд за темою магістерської дисертації	15.09.2015 – 23.12.2015	
3	Дослідження та вибір розрахункового модуля	12.02.2016 – 17.04.2016	
4	Побудова структури дисертації	18.04.2016 – 20.08.2016	
5	Розробка технологічної схеми	24.08.2016 – 25.12.2016	
6	Проходження науково дослідної практики	01.02.2017 – 28.02.2017	
7	Аналіз отриманих результатів	01.03.2017 – 25.04.2017	
8	Розрахунок технологічної схеми	01.05.2017 – 24.05.2017	
9	Оформлення дисертації	25.05.2017 – 08.06.2017	
10	Попередній захист магістерської дисертації	09.06.2017	

Студент _____ Мацібура О.П.
(підпис) (ініціали, прізвище)

Науковий керівник дисертації _____ Бугаєва Л.М.
(підпис) (ініціали, прізвище)

РЕФЕРАТ

Магістерська дисертація складається зі вступу, __ розділів, висновку, переліку посилань з __ найменуваннями, __ додатків і містить __ рисунок, __ таблиці. Повний обсяг магістерської дисертації складає __ сторінок, додатки — __ сторінок.

Актуальність теми. Розробка методів для очищення і утилізації радіоактивних відходів, що сприятимуть зменшенню технологічного навантаження на навколишнє природне середовище та дозволить в значній мірі збільшити експлуатаційний термін використання енергетичних блоків.

Зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами

Дисертаційна робота магістра виконувалась у Національному технічному університеті України «Київському політехнічному інституті імені Ігоря Сікорського» та державній установі «Інститут геохімії навколишнього середовища національної академії України» згідно з планом науково-дослідницьких робіт кафедри кібернетики хіміко-технологічних процесів.

Метою дослідження є: із використанням комп'ютерних експериментів дослідити процес очищення рідких радіоактивних відходів на основі іонно-селективного методу.

Для вирішення поставленої задачі потрібно обрати найбільш ефективний варіант технологічної схеми, що забезпечить найкраще очищення. Виконати розрахунки складових апаратів схеми та обрати найкращі їх параметри.

Для реалізації поставленої мети були сформульовані наступні **задачі дослідження:**

1. Вивчити сорбцію радіонуклідів Co та Mn на різних сорбентах;
2. Розробити технологічну схему процесу очищення рідких радіоактивних відходів;
3. Скласти структурний аналіз технологічної схема та розрахувати її матеріальні баланси;

4. Провести розрахунок матеріальних балансів технологічної схеми процесу очищення рідких-радіоактивних відходів в середовищах Chemcad 6.3 та Matlab Simulink;
5. Розробити web-проект на основі магістерської роботи, який буде містити основну інформацію про роботу та проводити розрахунки матеріальних балансів.

Об'єктом дослідження є моделі технологічної схеми знешкодження РРВ методом іонно-селективної очистки та порівняння його ефективності із методами знешкодження РРВ на базі процесів упарювання, бітумування та цементування.

Предметом дослідження є комп'ютерно - інтегрована система для моделювання процесу знешкодження рідких радіоактивних відходів іонно-селективним методом.

Методи дослідження: математичне моделювання та комп'ютерні експерименти із варіантами технологічної схеми.

Наукова новизна одержаних результатів. Найбільш суттєвими науковими результатами магістерської дисертації є удосконалення принципової технологічної схеми шляхом підвищення ефективності ежектора.

Практичне значення одержаних результатів визначається тим, що запропоноване технологічне рішення та розроблена в відповідності до нього технологічна схема забезпечить найкращий степінь очищення.

Апробація результатів дисертації. Основні положення роботи доповідались і обговорювались на 4 конференціях.

Публікації. Наукові положення дипломної *роботи* опубліковані у 6 роботах.

Ключові слова. АВТОМАТИЗАЦІЯ, ЗНЕШКОДЖЕННЯ РІДКИХ РАДІОАКТИВНИХ ВІДХОДІВ, ІОННО-СЕЛЕКТИВНИЙ МЕТОД.

РЕФЕРАТ

Магистерская диссертация состоит из введения, __ глав, заключения, списка ссылок с __ наименованиями, __ приложений и содержит __ рисунков, __ таблицы. Полный объем магистерской диссертации составляет __ страниц, приложения - __ страниц.

Актуальность темы. Разработка методов для очистки и утилизации радиоактивных отходов, которые будут способствовать уменьшению технологической нагрузки на окружающую среду и позволит в значительной степени увеличить эксплуатационный срок использования энергетических блоков.

Связь работы с научными программами, планами, темами.

Диссертационная работа магистра выполнялась в Национальном техническом университете Украины «Киевский политехнический институт имени Игоря Сикорского» и государственном учреждении «Институт геохимии окружающей среды Национальной академии Украины» согласно плану научно-исследовательских работ кафедры кибернетики химико-технологических процессов.

Целью исследования является: с использованием компьютерных экспериментов исследовать процесс очистки жидких радиоактивных отходов на основе ионно-селективного метода.

Для решения поставленной задачи необходимо выбрать наиболее эффективный вариант технологической схемы, который обеспечит наилучшую очистку. Выполнить расчеты составляющих аппаратов схемы и выбрать лучшие их параметры.

Для реализации поставленной цели были сформулированы следующие **задачи исследования**:

1. Изучить сорбцию радионуклидов Co и Mn на разных сорбентах;

2. Разработать технологическую схему процесса очистки жидких радиоактивных отходов;

3. Составить структурный анализ технологической схема и рассчитать ее материальные балансы;

4. Провести расчет материальных балансов технологической схемы процесса очистки жидких-радиоактивных отходов в средах Chemcad 6.3 и Matlab Simulink;

5. Разработать web-проект на основе магистерской работы, который будет содержать основную информацию о работе и проводить расчеты материальных балансов.

Объектом исследования являются модели технологической схемы обезвреживания ЖРО методом ионно-селективной очистки и сравнение его эффективности с методами обезвреживания ЖРО на базе процессов упаривания, битумирования и цементирования.

Предметом исследования является компьютерно - интегрированная система для моделирования процесса обезвреживания жидких радиоактивных отходов ионно-селективным методом.

Методы исследования: математическое моделирование и компьютерные эксперименты с вариантами технологической схемы.

Научная новизна полученных результатов. Наиболее существенными научными результатами магистерской диссертации является совершенствование принципиальной технологической схемы путем повышения эффективности эжектора.

Практическое значение полученных результатов определяется тем, что предложенное технологическое решение и разработана в соответствии с ним технологическая схема обеспечит лучший степень очистки.

Апробация результатов диссертации. Основные положения работы докладывались и обсуждались на 4 конференциях.

Публикации. Научные положения дипломной работы опубликованы в 6 работах.

Ключевые слова. АВТОМАТИЗАЦИЯ, ОБЕЗВРЕЖИВАНИЯ ЖИДКИХ РАДИОАКТИВНЫХ ОТХОДОВ, ИОННО-СЕЛЕКТИВНЫЙ МЕТОД.

ABSTRACT

The master thesis consists of an introduction, __ chapters, a conclusion, a list of references with __ names, __ applications and contains __ drawings, __ tables. The full volume of the master thesisis __ pages, applications - __ pages.

Relevance of the topic. Development of methods for the purification and utilization of radioactive waste that will contribute to reducing the technological load on the environment and will significantly increase the operational life of energy blocks.

Relationship of work with scientific programs, plans, themes.

The master thesis was performed at the National Technical University of Ukraine "Kiev Polytechnic Institute named after Igor Sikorsky" and the state institution "Institute of Environmental Geochemistry of the National Academy of Ukraine" according to the plan of scientific research works of the department of cybernetics of chemical-technological processes.

The purpose of the study is to: use computer experiments to investigate the process of purification of liquid radioactive waste based on the ion-selective method.

To solve the task, it is necessary to choose the most effective variant of the technological scheme, which will ensure the best cleaning. Perform calculations of the constituent devices of the circuit and choose the best parameters.

To achieve this goal, the following **research objectives** were formulated:

1. To study the sorption of Co and Mn radionuclides on different sorbents;

2. Develop a technological scheme for the process of purification of liquid radioactive waste;

3. Draw up a structural analysis of the technological scheme and calculate its material balances;

4. To carry out calculation of material balances of technological scheme of the process of liquid-radioactive waste treatment in Chemcad 6.3 and Matlab Simulink environments;

5. Develop a web-project based on master's work, which will contain basic information about the work and carry out calculations of material balances.

The object of the study are models of the technological scheme for neutralizing liquid radioactive waste by the method of ion-selective purification and comparing its effectiveness with the methods of neutralizing liquid radioactive waste on the basis of evaporation, bituminization and cementing processes.

The subject of the study is a computer - integrated system for modeling the process of neutralization of liquid radioactive waste by the ion - selective method.

Research methods: mathematical modeling and computer experiments with variants of the technological scheme.

Scientific novelty of the results. The most significant scientific results of the master's thesis is the improvement of the principle technological scheme by increasing the efficiency of the ejector.

The practical value of the results is determined by the fact that the proposed technological solution and technology in accordance with the technological scheme for ensuring the best quality of cleaning.

Approbation of the dissertation results. The main provisions of the work were reported and discussed at 4 conferences.

Publications. Scientific provisions of the dissertation are published in 6 papers.

Keywords. AUTOMATION, DISPOSAL OF LIQUID RADIOACTIVE WASTE, ION-SELECTIVE METHOD.

ЗМІСТ

Стор.

Перелік умовних позначень…….. 11

Вступ..... 12

Розділ 1. Рідкі радіоактивні відходи та методи їх знешкодження……. 14

1.1 Основні типи рідких радіоактивних відходів, їх хімічний та радіонуклідний склад..... 14

1.2 Сорбційні методи очистки РРВ…… 16

1.3 Склад та іонообмінні властивості фероціанідів перехідних металів……. 21

1.4 Осаджувальні методи очистки РРВ……. 27

1.5 Мембрані методи очистки РРВ……...……. 30

1.6 Висновки ……..…..…… 32

Постановка задач……..……. 34

Розділ 2. Експериментальні дослідження ефективності модифікованих сорбентів…….... 35

2.1 Природні та модифіковані сорбенти, використані в дослідженні…… 35

2.2 Методика експериментальних досліджень….……..…….. 36

2.3 Аналіз результатів дослідження……..…… 37

2.4 Висновки…… 44

Розділ 3. Розробка рекомендованої технологічної схеми і розрахунок її матеріального балансу в Chemcad та Matlab…… 46

3.1 Структурний аналіз ХТС…….. 49

3.2 Розрахунок матеріального балансу Chemcad……. 57

3.2.1 Специфікація потоків…….…….…… 62

3.2.2 Опис процесу…….…….…… 63

3.2.3 Матеріальні баланси…… 66

3.3 Побудова принципової технологічної схеми в Simulink…….. 68

3.4 Висновки……...…… 73

Розділ 4. Розробка web - проекту……...……... 74

4.1 Розробка інтерфейсу web-сайту…….……...……... 74

4.2 Розрахунок ежектора…… 82

4.2 Висновки……..……... 85

Висновки……. 86

Перелік посилань…… 87

Додаток А

Додаток Б

Додаток В

ПЕРЕЛІК УМОВНИХ ПОЗНАЧЕНЬ

РРВ – рідкі радіоактивні відходи

РВ – рівні втручання

АЕС – атомна електро-станція

ПАР – поверхнево-активні речовини

ТВЕЛ – тепловидільний елемент

ХТС – хіміко-технологічна схема

ППРС – послідовність розрахунку комплексів та поодиноких вершин

ОМРД – оптимальна множина розриваючих дужок

ОПРС – оптимальна послідовність розрахунку схеми

МТБ - матеріальний баланс

ВСТУП

Однією із актуальних проблем розвитку атомної енергетики є пошук методів для очищення і утилізації радіоактивних відходів, що сприятимуть зменшенню технологічного навантаження на навколишнє природне середовище. Крім того, рішення цієї проблеми дозволить в значній мірі збільшити експлуатаційний термін використання енергетичних блоків.

Рідкі радіоактивні відходи (РРВ) АЕС, що видаляються як кубові залишки, представляють собою багатокомпонентні розчини високої концентрації (солі, радіонукліди, та інші). Традиційними методами переробки кубових залишків є бітумування, упарювання та цементування. Ці методи дозволяють перевести РРВ в інертну форму з подальшою утилізацією. Як відомо, коефіцієнти скорочення об'єму при вказаних методах утилізації мають такий порядок: для бітумування – 1,5…2,5; для упарювання – 2…3; для цементування – 0,9…1,3. Ці методи не дають значного скорочення об'єму РРВ, на відміну від селективної сорбції, що має коефіцієнт скорочення об'єму від 70 до 90. Використання селективної сорбції значно скорочує кінцевий об'єм радіоактивного продукту і дозволяє сконцентрувати радіонукліди РРВ в невеликому об'ємі сорбенту.

Радіоактивні речовини в кубових залишках знаходяться в вигляді простих і комплексних іонів, нейтральних молекул і колоїдних частинок. Основними радіонуклідами в РРВ є 134Cs, 137Cs, 60Co, 54Mn. Ізотопи цезію містяться в іонній формі. Радіонукліди кобальту і марганцю містяться в формі складних сполучень. Кубовий залишок АЕС зазвичай має водневий показник pH від 8 до 13, тобто є лужним середовищем, для окиснення якого озонування є найбільш придатним способом. Озонування може застосовуватися практично на будь-якій стадії очищення РРВ без погіршення його загальних показників. Продукти, утворені в процесі саморозпаду озону і його взаємодії з молекулами води, мають потенціал окиснення вищій ніж у вихідної молекули озону. Це обумовлює високу ефективність використання озону в технологічних процесах обробки РРВ.

Таким чином, іонно-селективний метод може розглядатися як найбільш перспективний для очищення та утилізації РРВ атомних електростанцій. При цьому основними стадіями технологічної схеми мають бути процеси підготовки вихідного розчину, його фільтрація, озонування, селективна сорбція та подальша утилізація. Тому тему магістерської дисертації можна вважати актуальною.

РОЗДІЛ 1. РІДКІ РАДІОАКТИВНІ ВІДХОДИ ТА МЕТОДИ ЇХ ЗНЕШКОДЖЕННЯ

1.1 Основні типи рідких радіоактивних відходів, їх хімічний та радіонуклідний склад

Згідно з санітарними правилами поводження з радіоактивними відходами до рідких радіоактивних відходів (РРВ) відносяться будь-які радіоактивні рідини, які не підлягають подальшому використанню, розчини органічних і неорганічних речовин, пульпи та ін. якщо в них питома активність радіонуклідів більш ніж в 10 разів перевищує значення рівнів втручання (РВ) [1].

РРВ утворюються при експлуатації підприємств ядерного паливного циклу, ядерних енергетичних установок, при використанні радіоактивних речовин у виробничих, наукових організаціях та медицині, а також при радіаційних аваріях.

Рідкі і тверді радіоактивні відходи поділяються за питомою активністю на три категорії: низько-, середньо- і високоактивні відходи, класифікація яких наведена в табл. 1.1.

Таблиця 1.1 - Класифікація рідких і твердих радіоактивних відходів по питомій радіоактивності

За складом розчинних речовин рідкі радіоактивні відходи поділяють на безсолеві (солевміст не більше 10 мг / дм^3), малосолеві (солевміст до 1 г / дм^3), середньосолеві (солевміст від 1 до 10 г / дм^3) і високосолеві - з концентрацією розчинених речовин більше 10 г / дм^3. У даній роботі основна увага приділена переробці високосолевих відходів низького і середнього рівня активності.

До найбільш характерних високосолевих РРВ відносяться кубові залишки випарних установок АЕС типу ВВЕР і РБМК, які представляють собою розчини із загальним солевмістом 300-400 г / дм^3 і pH в діапазоні 11-14. Основною сольовою складовою даного виду відходів є нітрати натрію і калію. У кубових залишках АЕС ВВЕР містяться також розчинні борати лужних металів.

Крім неорганічних сполук у складі кубових залишків часто зустрічаються органічні речовини: солі щавлевої і лимонної кислот, Трилон Б, синтетичні поверхнево-активні речовини (ПАР) різних типів, мила, нафтопродукти, масла і ін. Крім розчинних сполук в кубових залишках також присутні нерозчинні речовини: механічні суспензії, справжні і псевдоколоїди.

Основний внесок (95-98%) в загальну активність кубових залишків АЕС вносять довгоживучі радіонукліди цезію ^{134}Cs і ^{137}Cs з періодом напіврозпаду ($T_{1/2}$) 2,06 і 30 років відповідно. Інша частина активності визначається радіонуклідами $^{58,60}Co$, ^{54}Mn, ^{51}Cr, ^{59}Fe, ^{95}Zr, ^{95}Nb, ^{129}I, ^{131}I, ^{144}Ce, $^{103,106}Ru$, $^{152,154}Eu$, ^{140}Ba та інші.

Таким чином, найбільш актуальним завданням при переробці високосолевих РРВ, і зокрема, кубових залишків АЕС є видалення довгоживучих і радіотоксичність радіонуклідів 134'137С8.

При виборі місця очищення РРВ від радіонуклідів визначальним є форма їх існування в розчинах. Основними формами існування радіонуклідів у водних розчинах є [2]:

1. іонно-дисперсне (прості і комплексні позитивно і негативно заряджені мономерні і полімерні іони);

2. молекулярне (незаряджені комплекси і нейтральні молекули);

3. псевдоколоїдне (радіонуклід сорбований на колоїдних частинках з розміром 0,001-0,1 мкм);

4. колоїдне (справжні колоїди);

5. грубодисперсними (радіонуклід асоційований з частинками більше 0,1 мкм).

Якісний та кількісний розподіл форм радіонукліда залежить від природи елемента і від складу рідкої фази. Для радіонуклідів цезію в широкому діапазоні pH характерний іонний стан у вигляді однозарядних катіонів. У разі присутності в розчинах суспензій і колоїдів цезій частково переходить в псевдоколоїдний і грубодисперсний стан. Утворення комплексних сполук для цезію нехарактерно.

1.2 Сорбційні методи очистки РРВ

Сорбційні методи очищення РРВ використовуються в першу чергу для видалення радіонуклідів цезію, які знаходяться в розчинах в іонному вигляді. Сорбційні матеріали, використовувані для очищення РРВ можна розділити на наступні основні групи: органічні іонообмінні смоли; неорганічні сорбенти різного складу.

Органічні іонообмінні смоли (іоніти) представляють собою тверді, гранульовані, порошкові або волокнисті матеріали, що містять в своєму складі функціональні (іоногенні) групи, здатні до іонізації і обміну з іонами електролітів. За типом іоногенних груп іоніти поділяються на катіоніти (обмін катіонів), аніоніти (обмін аніонів) і амфоліти (обмін катіонів або аніонів, в залежності від pH середовища). За ступенем іонізації функціональних груп іоніти поділяються на сильно-, середньо- і слабокислотні катіоніти і, на сильно-, середньо- і слабоосновні аніоніти.

Сильнокислотні катіоніти, що містять сульфогруппу, здатні до обміну катіонів в широкому діапазоні pH (1-12), середньокислотні (фосфорнокислі) - при pH > 3-5, слабокислотні - при pH > 7-8.

Ряд селективності в розведених розчинах для сильнокислотних катіонітів виглядає наступним чином (в дужках дані значення коефіцієнтів селективності) [3]:

$$H^+(1,0) < Na^+(1,5) < NH_4^+ + (1,95) < K^+(2,5) < Rb^+(2,6) < Cs^+(2,7);$$

$$H^+(1,0) < Mg^{2+}(2,5) < Co^{2+}(2,8) < Ca^{2+}(3,9) < Sr^{2+}(4,95) < Ba^{2+}(8,7).$$

У разі середньо- і слабокислотних катіонітів ряд селективності виглядає наступним чином:

$$Na^+ < K^+ < Cs^+ < Mg^{2+} < Ca^{2+} < Sr^{2+} < Ba^{2+} < H^+$$

Наведені вище ряди селективності показують, що органічні іонообмінні смоли не володіють специфічністю поглинання радіонуклідів цезію з розчинів, що містять сторонні катіони.

Метод іонного обміну із застосуванням органічних іонітів застосовується для очищення розчинів з невисоким солевмістом, як правило, не більше 1 г / дм^3. При пропущенні через сильнокислотні катіоніти одночасно з радіонуклідами поглинаються і присутні в розчині катіони. Момент проскоку активності збігається

з моментом проскоку нерадіоактивних іонів [4]. Коефіцієнти очищення води від радіонуклідів отримані з використанням різних сорбентів, які працюють в H^+ - форме, коливаються в межах $10^1 – 10^3$ і залежать від цілого ряду умов, основними з яких є склад РРВ і кінетика іонного обміну на даному типі іонообмінника.

Великі концентрації солей викликають часті регенерації іонітів, що призводять до отримання значних обсягів активних регенераційних розчинів, які також підлягають переробці з метою максимального скорочення їх обсягу. Все це обмежує застосування методу іонного обміну з використанням органічних іонітів для очищення радіоактивно забруднених вод.

Неорганічні сорбенти

В даний час для очищення РРВ використовуються наступні типи неорганічних сорбентів:

• природні і синтетичні алюмосилікати (цеоліти);

• оксигідратні сорбенти;

• солі полівалентних металів і багатоосновних кислот.

Алюмосилікатні сорбенти природного або штучного походження являють собою сполуки загальної формули: $M_{2/n}O * Al_2O_3 * xSiO_2 * yH_2O$ де M - катіон лужного або лужноземельного металу з валентністю n. Сорбція здійснюється за рахунок обміну рухливих катіонів Na^+ , K^+ , Ca^{2+} , Mg^{2+} , рідше Sr^{2+} або Ba^{2+} в складі сорбенту на катіони розчину. За кристальною структурою алюмосилікати розрізняються на сітчасті (цеоліти) і шаруваті (глинисті мінерали). Детальний опис структури хімічних і іонообмінних властивостей цеолітів різних типів приведені в монографії Брека [5] і огляді [6].

Більшість ***цеолітів*** мають жорстку тривимірну сітчасту структуру, утворену тетраедрами $A10_4$ і $Si0_4$. Є цеоліти з волокнистою і шаруватою структурою. Цеоліти виявляють значну спорідненість до сорбції іонів Cs^+ при їх малих еквівалентних частках в розчинах при обмежених концентраціях, які заважають катіонам, тому вони можуть використовуватися в якості селективних іонообмінних поглиначів радіонуклідів цезію із рідких радіоактивних відходів складного сольового складу.

Серед ***природних цеолітів*** для очищення РРВ найбільше поширення набув кліноптілоліт. Представницькою формулою кліноптілоліта вважається:

$$(Na_2O)_{0,70}(CaO)_{0,10}(K_2O)_{0,15}(MgO)_{0,05}*Al_2O_3*(8,5\text{-}10,5)Si0_2\text{-}(6\text{-}7)H_2O.$$

Ряд селективності в разі кліноптілоліта виглядає наступним чином:

$$Na^+ < NH_4^+ < K^+ < Rb^+ < Cs^+ \text{ [7].}$$

Застосування цеолітів в атомній промисловості почалося в 50-і роки XX століття. В роботі [6] наведені дані щодо застосування кліноптілоліта для очищення вод басейну витримки від радіонуклідів ^{137}Cs на заводі в штаті Айдахо (США). Щорічно переробляло́ся близько 4 000 м^3 відходів. Заміна сорбенту проводилася через кожні 6-8 тижнів, після чого відпрацьований кліноптілоліт направляли на поховання разом з твердими радіоактивними відходами.

Іонообмінне поглинання цезію природними цеолітами з низькосолевих розчинів АЕС було вивчено в роботі [8]. Показано, що на сорбцію цезію великий вплив робить зернування сорбенту, яке в певній мірі може бути скомпенсовано зменшенням швидкості фільтрації потоку який очищається. Сорбція на цеолітах Cs ефективна в нейтральному і слаболужному середовищі. У сильнокислих і в лужних розчинах відбувається деалюмініювання цеолітів [9].

Крім кліноптілоліта для очищення РРВ використовували інші природні цеоліти: анальцит, шабазит, філліпсит [2]. Найкращими сорбційними характеристиками по відношенню до радіонуклідів цезію мають шабазит і філліпсит при pH > 7.

Синтетичні цеоліти отримують в результаті кристалізації гелів на основі алюмінату натрію, рідкого скла і лугу при підвищеній температурі і тиску. З промитих кристалів із застосуванням добавок сполучних речовин (15-20% глини), формують гранули, що представляють промисловий сорбент.

Найбільшого поширення для очищення РРВ отримали цеоліти двох структурних типів: А і Х. Склад зневоднених цеолітів в натрієвій формі відповідає формулам: цеоліт А: $(0{,}90-0{,}95)Na_2O*Al_2O_3*(1{,}9-2{,}0)SiO_2$; цеоліт Х: $(0{,}90-0{,}95)Na_2O*Al_2O_3*(2{,}3-2{,}5)SiO_2$. Селективність цеолітів обумовлена розміром вхідних вікон в решітці цеолітів, розмір яких становить 4 і 9 ангстрем для

цеолітів А і Х відповідно. Синтетичні цеоліти мають досить високу катіонообмінну ємністю - до 3,5 мг-екв / г. Ряд селективності при сорбції лужних елементів для цеоліту А виглядає наступним чином: $Rb^+ < NH_4^+ < Na^+ < Cs^+ < K^+$.

Для порівняльної оцінки селективності використовується коефіцієнт поділу. Спостерігається досить добре виражена кореляція між селективністю іонообмінного поглинання і відношеня Si / Al в цеолітах. За цим параметром Na-цеоліти з відношенням Si / Al > 3 відносяться до групи низькоселективних, а з відношенням Si / Al <3 - до групи високоселективних. Найбільшою селективністю володіє К-шабазит, в натрієвій формі.

Селективність до сорбції радіонуклідів цезію, висока радіаційна стійкість (до 10^{11} Рад) та можливість спікання (при 1200 ° С) відпрацьованих цеолітів дозволили використовувати їх для очищення РРВ.

Прикладом промислового використання синтетичних цеолітів є завод Sixep (Англія) [10], де очищаються води басейнів витримки відпрацьованих ТВЕЛів. Середні коефіцієнти очищення для радіонуклідів цезію становлять 2 000.

Перспективними матеріалами для обробки рідких радіоактивних відходів є ***природні глинисті мінерали***: бентоніт, каолініт, біотит, вермикуліт та ін. Для використання в фільтруючих апаратах глини зазвичай модифікують, змішуючи з сполучними речовинами.

Високу селективність до цезію виявлено у бентоніту, стабілізованого мочевиноформальдегідною смолою. При 10% вмісті смоли в гранульованому сорбенті його обмінна ємність становить 0,8 мг-екв / г [11].

У зв'язку з відносно невисокою селективністю природних і синтетичних алюмосилікатних сорбентів даний тип сорбентів використовується, як правило, для очищення від радіонуклідів цезію малосолевих РРВ, що не містять великої кількості конкуруючих іонів натрію, калію.

Неорганічні сорбенти на основі нерозчинних оксигідратів багатовалентних металів являють собою сполуки загальної формули: $MO_x(OH)_y * zH_2O$, де М - Fe(III), Cr(III), Mn(IV), Si(IV), Sn(IV), Ti(IV), Zr(IV), Sb(V) та інші. Сорбційна здатність оксигідратів пов'язана з дисоціацією ОН-груп в лужному середовищі за

основним механізмом, а в кислому - по кислотному. У зв'язку з цим, в лужному середовищі дані з'єднання поводяться як катіонообмінники, а в кислому - як аніонообмінники. Найбільшого поширення для очищення РРВ отримали сорбенти на основі силікагелю, оксигідрати титану, цирконію, марганцю і сурми. Сорбенти даного типу виявляють високу селективність до радіонуклідів Zr, Nb, Ru, Fe, Ce та інших полівалентних металів. Незважаючи на досить велику кількість робіт, в яких досліджувалася сорбція високої селективності по відношенню до цезію відзначено не було.

Солі багатоосновних кислот полівалентних металів. До даної групи належать сорбенти на основі титанату, фосфатів, антимонатів, вольфраматів, фосформолібдатів і фероціанідів багатовалентних металів.

Фосфати полівалентних металів утворюють окрему групу неорганічних сорбентів селективних до цезію, серед яких найбільш перспективними є фосфати титану TiP і цирконію ZrP. Для катіонітів цієї групи характерна залежність селективності сорбції від складу і способу їх отримання [12-14]. Для фосфату ZrP цирконію встановлено такі ряди селективності: $Mg^{2+} < Ca^{2+} < Sr^{2+} < Ba^{2+}$ і $Mg^{2+} < Ca^{2+} < Sr^{2+} < Ba^{2+}$.

Коефіцієнти розподілу цезію на ZrP досягають значень 10^3-10^6 [12]. Фосфат цирконію був застосований для очищення теплоносія дослідного реактора. Середні коефіцієнти очищення по радіонуклідам ^{137}Cs, $^{141\text{-}144}Ce$, ^{140}La, ^{140}Ba, ^{95}Zr склали 9900, 1500, 2320 і 4 відповідно після пропускання 17 тисяч колонних об’ємів.

Погана відтворюваність сорбційних властивостей і гідроліз сорбентів цієї групи в лужних середовищах є причиною, яка заважає їх широкому використанню.

Властивостями селективно сорбувати цезій мають солі гетерополікислот (ГПК), хімічний склад яких можна виразити загальною формулою: $M_3XY_{12}O_{40} * nH_2O$ [12], де M - H, Na, NH_4^+; X - P, As, Si; Y - Mo, W, V. Сорбційна ємність солей ГПК зазвичай становить 1-5 мг-екв / г і залежить від способу їх отримання (концентрації реагуючих речовин, температури і pH розчину) [13].

Найбільш відомими сорбентами з цієї групи з'єднань є фосформолібдати амонію (ФМА) $(NH_4)_3PM_{12}O_{40}$ або $(NH_4)_3HPMo_{12}O_{40}$. По даних Амфлетта [12],

коефіцієнт розподілу на фосформолібдаті амонію з 0,1 н. розчинів солей Cs, Rb, K і Na має значення 6 000, 200, 3 і 1.

Відмінність в сорбованості цезія і іонів інших лужних металів визначило область застосування солей гетерополікислот. Їх використовують для поділу макрокількостей Na^+ -Cs^+, K^+ -Cs^+, Rb^+ -Cs^+.

Застосовувані в якості сорбентів солі ГПК зазвичай виходять в вигляді дрібнодисперсного порошку, не придатного для використання в колонках. Для використання в динамічних умовах солі гетерополікислот наносять на основу, наприклад на силікагель або політетрафторетилен [14].

Обширний клас неорганічних сорбентів складають ***фероціаніди перехідних металів***. В великому числі робіт відзначається виключно висока селективність сорбентів даного типу до іонів важких лужних металів, і в першу чергу, до цезію. Склад і іонообмінні властивості фероціанідів перехідних металів детально розглянуті в наступного розділі.

1.3 Склад та іонообмінні властивості фероціанідів перехідних металів

Фероціаніди двухвалентних перехідних металів утворюються [15] в внаслідок взаємодії між розчиною сіллю перехідного металу і $H_4[Fe(CN)_6]$, $Na_4[Fe(CN_6]$ або $K_4[Fe(CN)_6]$. Залежно від природи лужного металу, початкового співвідношення реагуючих компонентів, кислотності і порядку змішування утворюються осадки простих $M_2^{II}Fe(CN)_6$ або змішаних фероціанідів загальної формули $M_{4-2x}^{I}M_x^{II}[Fe(CN)_6]$, де M^I - іон лужного металу, M^{II} - іон двухвалентного перехідного металу. Схильність іонів лужних металів входити в склад фероціанідів перехідних металів посилюється по мірі збільшення іонного радіусу лужного металу.

По сучасним уявленням щодо структури фероціанідів двухвалентних металів, вони є полімерними комплексними сполуками [15], подібними цеолітам, гетерополікислотам, кристалічній сурьмяній кислоті.

Кристалічна решітка фероціанідів зазвичай описується моделлю Кегіна і Майлса. Згідно цієї моделі, основою структури фероціанідів є поліаніоний каркас,

побудований з рівної кількості іонів перехідного металу M^{2+} і $Fe(CN)_6$, розміщених в позиціях «а» і «б» відповідно і утворюють гранецентровані кубічні решітки (Рис. 1.1).

Рисунок - 1.1. Модель кришталевої структури змішаних фероціанідів;

1 – M(II); 2 – Fe(II); 3 – M(I); 4 – C-N

Групи CN^+, октаідрично розташовані навколо атомів заліза, орієнтуються в напрямку атомів перехідного металу, утворюючи містки (Рис. 1.1.а). Частина іонів перехідного металу M^{2+} і іони лужного металу M^+ розташовуються в центрі октантів кубічної решітки. Іонообмінні властивості фероціанідів обумовлені здатністю до еквівалентного і зворотнього заміщення цих рухомих катіонів. Проте така структура не пояснює деяких властивостей фероціанідів, а зокрема, їх здатності до молекулярної сорбції.

Для змішаних ферроціанідів перехідних і лужних металів була запропонована модифікована модель структури, яка містить, на відміну від моделі Кегіна і Майлса, вакансії в позиціях іонів $Fe(CN)_6^4$. Число таких вакансій, пов'язане із відношенням M^{2+} : Fe^{2+} може бути визначено або методом рентгеноструктурного аналізу, або іонообмінним витісненням з складу фероціанідів іонів M^{2+}. На основі моделі структури з урахуванням вакансій вдалося пояснити природу молекулярної сорбції змішаними фероціанідами [16].

Наявність вакансій в позиціях іонів $Fe(CN)_6^{4-}$ призводить до того, що деякі сорбційні центри M(I) виявляються оточеними не чотирма, а меншим числом іонів $Fe(CN)_6^{4-}$. Різне оточення сорбційних центрів M(I) іонами $Fe(CN)_6^{4-}$ призводить не тільки до їх енергетичної нерівноцінності, але і до неоднакової доступності для сорбуючих іонів. В сорбційні центри, оточені чотирма іонами $Fe(CN)_6^{4-}$, іон лужного металу може проникнути тільки через канал квадратного перетину, оточений CN групами (канал першого типу), а в будь-який інший, суміжний з вакансією - через трикутний канал (канал другого типу) (Рис. 1.1.6).

Канали першого типу, які мають розмір перетину 3,0-3,5Å, пронизують весь кристал і забезпечують заповнення будь-яких сорбційних центрів іонами лужних

металів, здатних своїми розмірами проникати в ці канали. Проте у фероціанідів з кубічної решіткою канали першого типу зазвичай виявляються недоступними для іонів Cs (r_1=1,65Å), а при викривлені решітки і для іонів Rb (r_1=1,45Å).

Канали другого типу мають розмір перетину приблизно 5Å і доступні для іонів будь-яких лужних металів. Оскільки ізоляція таких каналів від поверхні кристала при M^{2+}: Fe^{2+} > 1,1 стає малоймовірною, вони забезпечують доступ сорбуючим іонам, включаючи іони Rb і Cs, з рідкої фази до сорбційних центрів, суміжним з вакансіями. Згідно цієї моделі в позиціях іонів $Fe(CN)_6^{4-}$ є вакансії, які складають до 30-40% від загального числа позицій. Внаслідок цього, число атомів перехідного металу в складі фероціаніда завжди перевищує число іонів $Fe(CN)_6^{4-}$. Дана Модель дозволила пояснити усі особливості сорбційних властивостей фероціанідів.

Загальна характеристика сорбційних властивостей фероціанідів ряду перехідних металів приведена в роботах [17, 18].

Дрібнокришталевий характер осадків змішаних фероціанідів не дозволяє використовувати їх в фільтрувальних апаратах в чистому вигляді. Тому значна увага приділяється розробці методів отримання гранульованих композиційних сорбентів. В якості носіїв використовуються різні матеріали: тефлон, полімери органічного походження, деревна тирса, силікагель, алюмосилікати та ін.

Композиційні сорбенти отримують позмінною обробкою аніонообмінних смол розчином $K_4[Fe(CN)_6]$ і розчинною сіллю перехідного металу. Так були отримані фероціаніди V; Ce, Cu, Ni, Co, Fe, Cd, Zn в комбінації з аніонообмінниками АВ-17, АН-9, Амберлітом IRA - 410, IRA-904, IR-45, IRS-50, А-27 і Дауекс $1 * 10$ [22. 23]. Вартість таких сорбентів вывдносно висока, так як включає в себе вартість іонообмінної смоли.

Модифіковані сорбенти були отримані змішуванням фероціанідних і кобальтоціанідних пульп з кістковим клеєм з подальшим висушуванням в'язкої маси в тонкому шарі. Затверділий в вигляді пластин продукт подрібнювали в кульовому млині, розсіювали на фракції і поміщали в 40% розчин формаліну для утворення білкового полімеру [19].

Сорбенти марок ДНС-2, Фежел, Біофіт представляють собою делігніфіковане деревне борошно, на яке методом гомогенного осадження нанесено шар фероціаніду заліза (III) - калію [20].

Відомі методи приготування фероціанідних сорбентів шляхом обробки гранульованих носіїв, що володіють відновними властивостями, наприклад, активованого вугілля, тирси та ін. розчином фероціаніду тривалентного заліза. В результаті відновлення на поверхні носіїв відкладається шар фероціаніду калію-заліза $KFe[Fe(CN)_6]$ [21].

В Інституті хімії ДВО РАН для очищення РРВ розроблені сорбенти на основі вуглецевих радіаційно і хімічно стійких волокон, модифіковані фероціанідами перехідних металів [22]. Розроблений сорбент марки FN застосовувався для очищення від радіонуклідів цезію і кобальту РРВ, що утворюються при утилізації атомних підводних човнів [23] і для виділення ^{137}Cs і ^{60}Co з морської води при радіохімічному аналізі [24].

Прикладом отримання композиційних сорбентів шляхом нанесення фероціаніду перехідного металу на неорганічну матрицю з високою питомою поверхнею і пористістю є спосіб отримання сорбенту марки НЖС, шляхом послідовної обробки великопористого силикагелю розчинами аміакату нікелю і фероціаніду калію [25]. Використання в якості носія замість силикагелю алюмосилікатного носія дозволило отримати сорбент марки НЖА, що володіє підвищеною стійкістю до пептизації в малосолевих розчинах [26]. Сорбенти НЖС і НЖА успішно використовувалися для очищення різних типів РРВ від радіонуклідів цезію. Недоліком даного виду сорбентів є різке зниження сорбційних показників в лужних середовищах при pH > 10.

Іншим способом отримання гранульованих фероціанідних сорбентів є метод взаємодії фероціаніду калію з іонами перехідних металів з подальшим осадженням гелю кремнієвої кислоти з розчину силікату натрію безпосередньо в пульпі коагулята і подальшим гранулюванням продукту методом змочування водою (декріптації) [27]. Даним методом отримують сорбенти ФС-1 та ФС-7 (калій-нікель фероціанід), ФС-2 і ФС-10 (калій-мідь (II) фероціанід), ФС-3 (калій-цинк

фероціанід), ФС-4 (калій-цезій-нікель фероціанід). Зміст фероціанідної складової в перерахованих вище сорбентах становить 45-50% мас, що дозволяє використовувати їх для вилучення макрокількостей іонів цезію, рубідію, талію [28].

Широкий спектр сорбентів може бути отриманий золь-гель методом [29-31]. Гранульовані фероціанідні сорбенти готуються в дві стадії. На початку отримують сферогель оксигідрату відповідного металу, а потім переводять частину оксигідрату в гексаціаноферат відповідного металу шляхом його обробки кислим розчином фероціаніда калію. Наприклад, так отримують сорбент Термоксид-ЗАВ, що представляє собою гель гідроксиду цирконію, оброблений фероціанідом калію в соляній кислоті [32].

Радіоактивні речовини в кубових залишках знаходяться у вигляді простих і комплексних іонів, нейтральних молекул і колоїдних частинок. Основними радіонуклідами в кубових залишках є $^{l34,137}Cs$, ^{60}Co, ^{54}Mn. Для радіонуклідів цезію характерна іонна форма, і вони ефективно витягуються селективною сорбцією. Радіонукліди кобальту і марганцю в кубових залишках знаходяться в формі комплексів з сполуками, які використовуються для дезактивації обладнання (етилендіамінтетрацетат натрію (ЕДТА), щавлева кислота та ін.). Комплексні сполуки радіонуклідів кобальту і марганцю неможливо витягти сорбційними методами, тому для виділення ^{60}Co, ^{54}Mn потрібне руйнування комплексів, наприклад шляхом окислення газоподібним озоном. Використання озону дозволяє комплексно вирішити проблему очищення розчинів, як від органічних, так і неорганічних забруднень, при цьому в вихідний розчин не вноситься нових домішок.

В процесі окислення кубових залишків одночасно проводиться руйнування органічних речовин, «отруючих» сорбенти, і комплексів ^{60}Co і ^{54}Mn, які переходять в нерозчинну форму за рахунок сорбції на осадках гідрооксидів і оксидів перехідних металів (Fe, Ni, Cr і ін). Отримані осадки, на яких сконцентровані радіонукліди ^{60}Co і ^{54}Mn відокремлюються за допомогою методу мікрофільтрації.

Освітлений розчин містить тільки радіонукліди $^{134,137}Cs$, які ефективно витягуються селективною сорбцією на фероціанідних сорбентах.

Таким чином, спосіб очищення кубового залишку від радіонуклідів передбачає використання трьох послідовних стадій обробки:

• окислення озоном для руйнування комплексних сполук, які зв'язують радіонукліди ^{60}Co і ^{54}Mn, а також органічних речовин, отруючих іонно-селективні сорбенти, і переведення їх в шламову складову;

• відділення шламів з співосадженими на них радіонуклідами кобальту і марганцю при фільтрації на мембранних фільтрах;

• Іонно=селективне очищення від радіонуклідів цезію на іонно-селективному сорбенті, завантаженому в фільтри-контейнери.

Випробування, проведені в 2002-2003 рр. на пілотній установці іонно-селктивного очищення на АЕС (ФЕІ, м Обнінськ), повністю підтвердили працездатність основних вузлів і установки в цілому, функціональність і результативність обраної технології [33]. Це дало можливість розробити проект промислової установки іонно-селективного очищення РРВ АЕС і пустити її в експлуатацію на Кольській АЕС. Кубові залишки після очищення на селективному сорбенті до активності -150 Бк / дм доупарюють до отримання сольового плаву з подальшим розміщенням його на спеціальних пунктах захоронення радіоактивних відходів або полігонах промислових відходів [34].

Для очищення рідких радіоактивних відходів для утилізації атомних підводних човнів були запропоновані сорбційно-реагентні матеріали, які одночасно володіють високою селективність до радіонуклідів, як в іонній, так і в колоїдній формі. Принцип дії таких сорбентів заснований на тому, що хімічні компоненти, що додаються в розчин або присутні в ньому, реагують з сорбційно-реагентним матеріалом з утворенням високодисперсного осаду який захоплює присутні в розчині радіонукліди. Використання сорбційно-реагентних матеріалів дозволяє отримувати високий ступінь очищення рідких відходів складного сольового складу [35].

Проведений аналіз літературних даних дозволяє зробити висновок про те, що для сорбційної очистки РРВ від довгоживучих радіонуклідів цезію найбільш прийнятні неорганічні сорбенти, що володіють більшою, в порівнянні з

органічними іонообмінними смолами, селективністю до зазначених радіонуклідів, а також високою хімічною, термічною і радіаційною стійкістю. Для очищення високосолевих розчинів найбільш перспективними є сорбенти на основі фероціанідів перехідних металів.

1.4 Осаджувальні методи очистки РРВ

Осаджувальні методи очищення РРВ засновані на співосадженні радіонуклідів з осадками малорозчинних сполук (колекторів). Перехід радіонуклідів в фазу колектора пояснюється сорбційними і іонообмінними процесами, утворенням хімічних сполук і твердих розчинів, колоїдно-хімічною взаємодією [36].

Найбільш часто в якості колекторів радіонуклідів використовують осадки гідроксидів заліза (II, III), алюмінію, марганцю (IV). Гідроксиди заліза і алюмінію утворюються за рахунок внесення в вихідний розчин розчинних солей відповідних металів з подальшим коректуванням pH до початку утворення відповідних гідроксидів. Осадки гідроксиду марганцю (IV) отримують шляхом окислювально-відновних реакцій з участю розчинних солей двох- і семивалентного марганцю.

У монографії [37] представлені результати систематичних досліджень використання оксігідратних колекторів для осадження мікрокомпонентів з розчинів. Механізм співосаждення радіонукліда, в основному, залежить від його стану в розчині. Радіонукліди, що знаходяться в розчині в катіонній формі співосаджуються з оксігідратними колекторами за рахунок катіонного обміну з воднем гідроксильних груп сорбенту. Залежність ступеня осадження від pH розчину в цьому випадку має S- подібну форму: до деякого значення pH сорбції практично не спостерігається, потім сорбція різко зростає і при певному значенні pH ($pH_{макс}$) досягає максимального значення. Даний характер залежності спостерігається, зокрема для радіонуклідів цезію ($pH_{макс}$ ~ 10) [2]. В присутності сторонніх катіонів лужних металів співосадження радіонуклідів цезію сильно зменшується.

Практичне використання методу коагуляції солями алюмінію [2] показало, що ступінь очищення водопровідної води від радіонуклідів ^{137}Cs складає всього 10-

15%. Майже всі радіонукліди Cs, Co, Mn та ін. на осаді гідроксиду заліза видаляються краще, ніж на гідроксиді алюмінію. Використання на стадії коагуляції природних мінералів - вермикуліту, біотиту, бентоніту та ін. збільшує ступінь очищення від цезію до 66-91% [2]. Наведені вище літературні дані показують, що ефективність співосадження радіонуклідів цезію на осадках гідроксидів заліза і алюмінію вкрай низька. Селективне осадження радіонуклідів цезію в кислому середовищі може бути здійснено на осадках солей гетерополікислот, діпікріламіна, а так само з використанням солі тетрафенілбората натрію [38, 39]. Використання перерахованих вище осаджувачів, внаслідок їх дорожнечі обмежується, в основному, аналітичними цілями. На практиці, найчастіше для селективного співосаждення цезію використовують осадки фероціанідів перехідних металів: міді, нікелю, заліза, цинку і ін. [38]. Висока специфічність даних колекторів пов'язана з протіканням процесу іонного обміну цезію на інші іони лужних і перехідних металів, що містяться в осаді, з утворенням малорозчинних цезієвих форм фероціанідів. Завдяки низькій розчинності осадів, що утворюються, ступінь вилучення іонів цезію може бути дуже високою.

В роботі [40] досліджено співосадження мікрокількостей цезію з осадками фероціанідів різних металів. Показано, що найбільш ефективними колекторами цезію є осадки фероціанідів двовалентних перехідних металів (нікелю, кобальту, міді, заліза і кадмію). Оптимальне дозування фероціаніду перехідного металу становить близько 10 мг / дм^3, при цьому коефіцієнт очищення розчину становить близько 300. Відділення осаду фероціаніду перехідного металу проводили шляхом мікрофільтрації через металокерамічну мембрану "Трумем".

У статті [41] досліджено вплив різних чинників на процес співосаждення мікрокількостей цезію з осадом фероціаніду нікелю-калію. Показано, що найбільш ефективне відділення осаду спостерігається при фільтрації через мікрофільтраційні мембрани з розміром пір не більше 0,2 мкм. Оптимальне мольне співвідношення $Ni^{2+}/Fe(CN)_6^{4-}$ становить 1,33- 1,75; концентрація електроліту (нітрату натрію) - не менше 0,05 моль / дм^3 , а значення pH розчину - не більше 10.

Вплив органічних комплексоутворюючих і поверхнево-активних речовин на процес співосадження мікрокількостей цезію з осадом фероціаніду нікелю-калію вивчено в роботі [42]. Показано, що присутність в розчині оксалат-іонів і Трилону Б призводить до різкого зменшення ступеня осадження цезію. Вплив поверхнево-активних речовин різних типів виражено в значно меншій степені. Для зменшення негативного впливу органічних речовин був перевірений метод їх хімічної деструкції газоподібним озоном. Проведення попереднього озонування розчинів дозволило повністю усунути негативний вплив органічних комплексоутворюючих або поверхнево-активних речовин на процес співосаждення цезію з осадом фероціаніду нікелю-калію.

Розглянуті вище осаджувальні методи очищення РРВ показують, що очищення РРВ від довгоживучих радіонуклідів цезію найбільш прийнятні методи, засновані на селективному співосадженні цезію з осадками фероціанідів перехідних металів. Відомості про використання осаджувальних методів для очищення від цезію високосолевих розчинів в літературі відсутні.

1.5 Мембрані методи очистки РРВ

Мембрані методи очищення засновані на переважній проникності одного або декількох компонентів рідкої або колоїдної системи через розділову перегородку-мембрану. За типом рушійної сили процесу мембранні методи поділяються на ***баромембрані*** (рушійна сила - різниця тисків по обидві сторони мембрани) і ***електромембрані*** (рушійна сила - різниця електричних потенціалів по обидві сторони мембрани).

Баромембрані процеси розрізняються розміром пор мембран, робочим тиском і, відповідно, розміром затримуваних частинок. Відомо чотири види баромембраних процесів: мікрофільтрація, ультрафільтрація, нанофільтрація, зворотний осмос [43].

Мікрофільтрація - процес мембранного поділу під тиском 0,01-0,1 МПа на тонкопористих мембранах з розміром пір від 0,05 до 5 мкм, при якому затримуються частинки і розчинені макромолекули розміром більше 0,1 мкм.

Ультрафільтрація - процес мембранного поділу під тиском 0,1-1МПа на тонкопористих мембранах з розміром пір від 0,01 до 0,1 мкм.

Нанофільтрація - процес мембранного поділу під тиском 1-1,5 МПа на тонкопористих мембранах з розміром пір від 0,001 до 0,01 мкм.

Зворотний осмос - процес мембранного поділу розчинів під тиском до 40 МПа на мембранах з розміром пор $(1-5)*10^{-3}$ мкм.

Як матеріали для мембран використовують, як правило, органічні полімерні матеріали: полісульфони, поліміди, складні ефіри целюлози та ін. [44].

Незважаючи на високі роздільчі властивості, органічні полімерні мембрани мають невисоку хімічну, термічну, біологічну та радіаційну стійкість. Зазначених недоліків позбавлені мембрани на основі неорганічних матеріалів. Найбільшого поширення отримали неорганічні керамічні і металокерамічні мембрани [45]. Металокерамічні мембрани TRUMEM з розміром пір 0,03-0,2 мкм складаються з трьох шарів: металевої пористої підкладки, проміжного шару з керамічних частинок і фільтруючого шару з оксидів металів, наприклад, Al_2O_3, TiO_2, ZrO_2. Мембрани даного типу використовуються, зокрема для поділу та виділення білків, вірусів, барвників [46].

Керамічні мембранні фільтри для мікро- і ультрафільтрації являють собою одно- або багатоканальні циліндричні трубки, виконані з пористої кераміки з нанесеним на зовнішню поверхню селективним шаром. Матеріалом підкладки служить, як правило, альфа-форма оксиду алюмінію, а селективного шару - частинки або волокна на основі оксидів або карбідів титану, цирконію, кремнію. Для керамічних мембран характерна висока механічна, термічна (до 900 ° С) і хімічна стійкість (робочий діапазон pH 0-13) [47].

У зв'язку з тим, що радіонукліди цезію в розчинах присутні в іонному стані безпосереднє використання для їх видалення процесів мікро- і ультрафільтрації малоефективне. Для збільшення глибини очищення використовують метод

попереднього перекладу радіонуклідів в тверду дисперговану фазу, за рахунок співосадження або введення в оброблюваний розчин диспергованого сорбенту. Для фіксації радіонуклідів на суспендованій фазі перед ультрафільтрацією радіоактивних вод використовують гідроокис титану [48], фероціаніди заліза [49], бентоніт [50] і т.п.

Зворотньоосмотичні мембрани мають пори з розміром порядку $(1-5)*10^{-3}$ мкм і дозволяють розділяти розчини з різною концентрацією напівпроникною мембраною, що пропускає тільки молекули розчинника (води). Кращі зразки зворотньоосотичних мембран в області солевмісту до 1 г / дм^3 мають коефіцієнт затримання не менше 0,995. Установки низьконапірного зворотного осмосу, які дозволяють ефективно опріснювати природні води при робочих тисках до 1,5 МПа [51], малопридатні для ефективної обробки радіоактивних вод, тому що не дозволяють отримувати концентрати з солевмістом більше 10-15 г / дм^3. В роботі [52] наводяться результати випробувань системи регенерації борної кислоти на AEC Prairie Island з реактором типу PWR. Показано, що обробка реакторних вод зворотним осмосом дозволяє видалити з води SiO_2 і інші домішки при невисокій втраті борної кислоти. Розроблена система дозволяє за місяць обробити близько 1500 м^3 реакторних вод.

Серед електромембраних процесів поділу найбільшого поширення набув метод електродіалізу, під яким розуміють процес демінералізації розчинів, заснований на явищі переносу іонів через напівпроникні діафрагми під дією постійного електричного струму [53].

Електродіаліз почав використовуватися для очищення радіоактивних вод раніше інших мембранних процесів. Перші публікації про його застосуванні датуються 60-ми роками XX століття [54].

В роботі [2] наведені результати електродіалізного очищення дистильованої і водопровідної води від ряду індивідуальних радіонуклідів і суміші продуктів поділу. В оптимальних умовах ступінь очищення води від радіонуклідів цезію та стронцію склала 99%, від йоду - 97%. Погано видалялися радіонукліди в колоїдному і зваженому стані (^{95}Zr, ^{103}Ru, ^{144}Ce і ін.).

1.6 Висновки

Проведений огляд науково-технічної і патентної літератури показав, що в даний час для очищення рідких радіоактивних відходів (РРВ) низького і середнього рівня активності від довгоживучих радіонуклідів кобальту та марганцю використовуються сорбційні, осаджувальні і мембрані методи, а також їх різні поєднання. Для видалення радіонуклідів кобальту та марганцю, що знаходяться в розчинах в основному, в іонному стані найбільш широко використовуються сорбційні методи з використанням органічних іонообмінних смол і неорганічних сорбентів різних типів. Використання останніх, більш перспективно, в зв'язку з можливістю отримання сорбентів з підвищеною селективністю до іонів цезію, а також високою хімічною, термічної та радіаційної стійкістю. Для очищення високосолевих розчинів найбільш перспективними є сорбенти на основі фероціанідів перехідних металів, які виявляють підвищену селективність до цезію в присутності макрокількостей сторонніх катіонів. Однак, до теперішнього часу для очищення високосолевих РРВ, а саме кубових залишків АЕС використовують виключно сферогранульований сорбент на основі фероціаніду нікелю-калію і гідроксиду цирконію марки Термоксід-35. Відомості про використання для цієї мети інших типів фероціанідних сорбентів в літературі відсутні.

Сорбенти першого типу містять не більше 7-8% мас, фероціанідної складової, що знижує їх ефективність при очищенні високосолевих розчинів від цезію.

Сорбенти другого типу, отримані шляхом спільного осадження золю кремнієвої кислоти з осадками фероціанідів перехідних металів є дуже перспективними для вилучення радіонуклідів цезію з високосолевих розчинів за рахунок високого вмісту фероціанідної складової в складі сорбентів. Однак відомостей про використання сорбентів даного типу для очищення високосолевих РРВ в науково технічній і патентній літературі не виявлено. Крім того, випуск сорбентів типу ФС в даний час повністю припинено.

Сорбенти третього типу, отримані золь-гель методом, випускається в дослідно-промисловому масштабі науково-виробничою фірмою «Термоксід». Сорбент марки Термоксід-35 в даний час досить широко використовується для

очищення кубових залишків АЕС. Незважаючи на очевидні переваги даного сорбенту, він володіє і рядом недоліків, головним з яких є його висока вартість.

Осаджувальний метод може бути використаний, як універсальний спосіб видалення радіонуклідів цезію з розчинів. найбільш перспективним є метод очищення РРВ, заснований на селективному співоосадженні цезію з осадками фероціанідів перехідних металів. Однак відомості про використанні даних методів очищення високосолевих розчинів відсутні.

Незважаючи на велику кількість публікацій, недостатньо повно вивчено вплив органічних комплексоутворюючих і поверхнево-активних речовин на очистку РРВ сорбційними і осаджувальними методами, а також поведінку фероціанідних сорбентів при підвищених температурах.

ПОСТАНОВКА ЗАДАЧ

На основі аналізу літературних джерел та консультацій із спеціалістами Інституту геохімії навколишнього середовища НАУ було поставлено наступні задачі магістерського дослідження:

1. Вивчити процес сорбції радіонуклідів Co та Mn на різних сорбентах.
2. Розробити та проаналізувати варіанти технологічної схеми процесу очищення рідких радіоактивних відходів. Вибрати її базовий варіант.
3. Виконати аналіз структури обраної технологічної схеми.
4. Провести розрахунок матеріальних балансів технологічної схеми процесу очищення рідких-радіоактивних відходів в програмних середовищах Chemcad 6.3 та Matlab Simulink;
5. На основі магістерської роботи розробити web-проект, який буде містити основну інформацію про виконані дослідження та надавати можливість проводити розрахунки матеріальних балансів.

РОЗДІЛ 2. ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНІ ДОСЛІДЖЕННЯ ЕФЕКТИВНОСТІ МОДИФІКОВАНИХ СОРБЕНТІВ

Для створення наближених до реальних умов, сорбцію ^{60}Co та ^{54}Mn проводили з модельного розчину не упарених РРВ. Для імітації радіоактивних ізотопів ^{60}Co та ^{54}Mn модельного розчину були внесені стабільні Co та Mn. Визначення концентрації Co та Mn в розчинах проводилися методом атомно-абсорбційної спектроскопії.

Вивчення форм фіксації Co та Mn природними та модифікованими сорбентами проводили методом послідовного вилуговування [55].

2.1 Природні та модифіковані сорбенти, використані в дослідженні

1. Чеський природний бентоніт Black Hill (Ca-форма)
2. Чеський промислово-модифікований бентоніт Rokla (Na-форма)
3. Природний бентоніт Черкаського родовища
4. ПБА-20 - промислово-модифікований натрієм бентоніт Черкаського родовища
5. Природний бентоніт Горбківського родовища
6. Природний палигорскіт
7. Природний цеоліт Сокирницького родовища
8. Лужно-модифікований цеоліт Сокирницького родовища
9. Кислотно-модифікований цеоліт Сокирницького родовища

2.2 Методика експериментальних досліджень

1. Приготовано модельний розчин не упарених РРВ, склад якого наведено в табл. 2.1.

Таблиця 2.1 - Склад вихідного модельного розчину РРВ

* - значення отримані гравіметрично

2. Наважки досліджуваних сорбентів (по 0,25 г) заливали 25 мл модельного розчину РРВ (Табл. 2.1). Проби залишали на різні інтервали часу від 4^x годин до 14 діб з періодичним перемішуванням при температурі 20 ± 1ºС;

3. По закінченні відповідного інтервалу часу розчини декантували та проводили вимірювання залишкової концентрації Co^{2+} та Mn^{2+} методом атомно-абсорбційної спектроскопії;

4. Після сорбції сорбент заливали 25 мл дистильованої води, для визначення частки водорозчинної форми Co^{2+} та Mn^{2+}, та витримували в контакті впродовж однієї доби при періодичному перемішуванні. Далі розчин декантували, а бентоніт заливали 25 мл ацетатно-амонійного буферного розчину (pH=5) та витримували в контакті впродовж однієї доби, для визначення частки обмінно-поглинутих Co^{2+} та Mn^{2+}. Розчин знову декантували, а сорбент заливали 25 мл 0,1М розчину HNO_3 та витримували в контакті впродовж доби для визначення частки кислоторозчинної форми сорбції Co^{2+} та Mn^{2+}. Аналогічно до п.3 в кожному фільтраті визначали ступінь десорбції Co^{2+} та Mn^{2+}, вимірюючи їх концентрації в відповідних пробах.

2.3 Аналіз результатів дослідження

Результати дослідження **сорбції** Co (Рис. 2.1а) та Mn (Рис. 2.1б), показали, що сорбційна рівновага при поглинанні даних елементів з модельного розчину РРВ як природними, так модифікованими сорбентами встановлюється протягом однієї - семи діб.

Максимальний ступінь сорбції Co та Mn встановлено для Na-модифікованих бентонітів ПБА-20, Rokla та лужно-модифікованого цеоліту (> 98%). Час

встановлення сорбційної рівноваги при сорбції як Co, так і Mn бентонітом ПБА-20 складає 1 добу, при сорбції бентонітом Rokla та лужно-модифікованим цеолітом – 4 доби. Сорбційна рівновага при сорбції обох металів кальцієвими бентонітами Черкаського родовища та Black Hill встановлюється через 7 діб від початку експерименту. Ступінь сорбції Co не перевищує 70%, а Mn - 40%. Низький ступінь сорбції Co на палигорскіті (до 30%), а Mn - на кислотно-модифікованому цеоліті (до 20%). Найнижчі ступені сорбції Co та Mn встановлені для природного цеоліту та бентоніту Горбківського родовища (< 15%). Таким чином, за ефективністю сорбції як Co, так і Mn (збільшення ступеню сорбції та зменшення часу встановлення рівноваги) розглянуті сорбенти можна розташувати в послідовності: ПБА-20, Rokla, лужно-модифікований цеоліт > Black Hill, бентоніт Черкаського родовища > палигорскіт (для Co); кислотно-модифікований цеоліт (для Mn) > бентоніт Горбківського родовища, природний цеоліт Сокирницького родовища.

Тобто, найбільш ефективними сорбентами щодо Co та Mn серед досліджених зразків є Na-модифіковані сорбенти (ПБА-20, Rokla та лужно-модифікований цеоліт). Отже, модифікація природних сорбентів натрієм в рази підвищує ступінь сорбції Co та Mn [55].

Рисунок 2.1 - Кінетика сорбції Co та Mn на природних та модифікованих сорбентах

Найменш міцно фіксованою є **водорозчинна** форма сорбції (вилуговування дистильованою водою). Встановлено, що десорбція дистильованою водою Co (Рис. 2.2а) та Mn (Рис. 2.2б) на досліджуваних природних та модифікованих сорбентах є незначною і загалом не перевищує 6%. Вміст водорозчинної форми залежить від часу сорбції та змінюється по різному для розглянутих сорбентів. При сорбції **Co** бентонітами ПБА-20, Rokla, Black Hill, та лужно-модифікованим цеолітом вміст водорозчинної форми є мінімальним (не перевищує 0,5%). На першому етапі (0 - 4 доба) спостерігається збільшення частки до максимального

значення (0,5%); на другому етапі (4 - 14 доба) – незначне зменшення частки. При сорбції Co бентонітом Черкаського родовища частка водорозчинної форми сорбції поступово збільшується до максимального значення (1%) на 7 добу експерименту. Інша картина спостерігалась для бентоніту Горбківського родовища, природного цеоліту Сокирницького родовища та палигорськіту: після різкого зростання вмісту водорозчинної форми сорбції Co до максимальних значень за перші 4 години експерименту, надалі вміст форми поступово зменшувався до мінімальних значень на 4 - 7 добу експерименту (1,8 - 1%; 2,8 - 13%; 5 - 3% відповідно) [55].

Аналогічний тренд спостерігається і при сорбції Co (Рис. 2.2а) кислотно-модифікованим цеолітом, проте час досягнення максимуму (5,4%) збільшився до 1 доби, а подальше зменшення є більш швидким і вміст водорозчинної форми досягає мінімуму (1,3%) на 7 добу експерименту.

Фіксація **Mn** (Рис. 2.2б) у водорозчинній формі всіма досліджуваними сорбентами протікала в два етапи: спочатку мало місце стрімке збільшення частки водорозчинних форм з досягненням на певний час максимальних значень, після чого протікало поступове її зменшення до 7 доби експерименту. В подальшому вміст водорозчинної форми практично не змінювався. Час досягнення максимуму суттєво відрізняється для досліджених сорбентів. За цією ознакою можна умовно виділити дві групи. До першої відносяться природні та модифіковані бентоніти а також природний та лужно-модифікований цеоліт, для яких час досягнення максимального вмісту водорозчинних форм (до 1%) складає 1 - 4 доби. До другої відносяться кислотно-модифікований цеоліт та палигорскіт (час досягнення максимуму - до 4 годин). Слід також зазначити, що максимальний вміст водорозчинних форм для сорбентів, віднесених до другої групи є більш високим та складає 5 та 1,4% відповідно [55].

В цілому можна зробити висновок, що найменша частка водорозчинної форми при сорбції як Co, так і Mn характерна для бентонітів Черкаського родовища, Black Hill, ПБА-20, Rokla та лужно-модифікованого цеоліту.

Рисунок 2.2 - Десорбція Co та Mn з природних та модифікованих сорбентів дистильованою водою

Наступною за міцністю фіксації є **іонообмінна форма**, що визначається десорбцією ацетатно-амонійним буферним розчином. Із результатів визначення вмісту іонообмінної форми **Co** (Рис. 2.3а) видно, що для всіх досліджуваних сорбентів на першому етапі (до 1 - 7 доби експерименту, в залежності від сорбенту) відбувається збільшення частки до максимальних значень. На другому етапі відбувається незначне зниження вмісту іонообмінної форми Co (бентоніти Черкаського та Горбківського родовищ, Rokla, лужно-модифікований цеоліт) або вміст практично не змінюється (інші досліджувані сорбенти). За максимальним вмістом іонообмінної форми Co досліджувані сорбенти можна розмістити в послідовність: Rokla (60%) > лужно-модифікований цеоліт (55%) > ПБА-20 (50%) > Black Hill (39%) > бентоніт Черкаського родовища (31,5%) > палигорскіт (20%) > бентоніт Горбківського родовища (8,2%) > природний цеоліт Сокирницького родовища (6%) > кислотно-модифікований цеоліт (1,5%) [55].

Частка іонообмінної форми **Mn** (Рис. 2.3б) стрімко зростає за перші 4 години сорбції із подальшими незначними коливаннями в сторону збільшення (бентоніт Rokla, палигорскіт) або зменшення (інші досліджувані сорбенти). Істотно відрізняється за динамікою вмісту іонообмінної форми Mn лужно-модифікований цеоліт, для якого частка іонообмінної форми поступово зростає протягом всього експерименту (14 діб) до максимального значення – 45,5%. Максимальна частка іонообмінної форми сорбції Mn складає на: 1) лужно-модифікованому цеоліті – 45,5%; 2) бентонітах Rokla та Black Hill – 16 та 15%; 3) бентонітах Черкаського родовища та ПБА-20 – 3,5 та 3,2%; 4) бентоніті Горбківського родовища, природному та кислотно-модифікованому цеолітах – менше ніж 1,5%.

Отже, найбільший вміст іонообмінної форми Co мають бентоніти ПБА-20, Rokla та лужно-модифікований цеоліт; Mn - лужно-модифікований цеоліт [55].

Рисунок 2.3 - Десорбція Co та Mn з природних та модифікованих сорбентів ацетатно-амонійним буферним розчином (pH=5)

Кислоторозчинна форма сорбції є необмінною та більш міцною за іонообмінну та визначається десорбцією 0,1М розчином азотної кислоти. Визначення вмісту кислоторозчинної форми сорбції **Co** (Рис. 2.4а) дозволило зробити висновок, що з часом її частка поступово зростає до досягнення максимальних значень на 7 - 14 добу експерименту: при сорбції бентонітами ПБА-20 - 35,5%, Black Hill - 26%, Черкаського родовища - 25%, Rokla - 23%, лужно-модифікованим цеолітом - 32% та палигорскітом - 7%. При сорбції Co кислотно-модифікованим та природним цеолітами, бентонітом Горбківського родовища частка кислоторозчинної форми є мінімальною (до 2%) та досягає максимальних значень за 1 добу експерименту [55].

Частка кислоторозчинної форми сорбції **Mn** (Рис. 2.4б) для більшості досліджуваних сорбентів поступово зростає з часом (2 - 14 діб експерименту, в залежності від сорбенту) до максимальних значень. Серед використаних сорбентів відрізняється лужно-модифікований цеоліт, динаміка вмісту кислоторозчинної форми Mn якого протікає в чотири етапи: 1) до 4 години експерименту – частка кислоторозчинної форми Mn різко збільшується до 11% 2) 4 години - 4 доби – поступово збільшується до 16,5% 2) 4 - 7 доба – швидко зростає до 25,3% 3) 7 – 14 доба – поступово збільшується до 30%.

Рисунок 2.4 - Десорбція Co та Mn з природних та модифікованих сорбентів азотною кислотою

Найбільша частка кислоторозчинної форми Mn складає 30% при сорбції на лужно-модифікованому цеоліті, значно менша на бентонітах Rokla та Black Hill – 11,5 та 10,5% відповідно. Частка кислоторозчинної форми Mn на бентонітах

Черкаського та Горбківського родовищ, ПБА-20, палигорскіті, природному та кислотно-модифікованому цеолітах мінімальна (1 - 5%) [55].

Тобто, найбільш ефективні за кислоторозчинною формою сорбції Co є бентоніти ПБА-20, Rokla та лужно-модифікований цеоліт; Mn - лужно-модифікований цеоліт.

Рисунок 2.5 - Частка фіксованої форми **Co** та **Mn**, сорбованих на природних та модифікованих сорбентах

Під **фіксованою** формою сорбції Co та Mn в даному випадку слід розуміти частку поглинутих металів, що не була десорбована жодним з вищевказаних способів. Визначається як різниця між сорбованим Co/Mn та сумою часток водорозчинної, іонообмінної та кислоторозчинної форм. Частка фіксованої форми **Co** (Рис. 2.5а) для першої групи досліджуваних сорбентів в залежності від часу на першому етапі зростає до максимальних значень для: бентоніту ПБА-20 – до 26% за 1 добу експерименту; бентонітів Rokla (18%), Black Hill (7,8%), лужно- та кислотно-модифікованих цеолітів (18 та 5% відповідно) – за 4 доби. На другому етапі відбувається зменшення частки фіксованої форми на 1 – 10% в залежності від сорбенту. Для другої групи сорбентів - бентоніти Черкаського (8,6%) та Горбківського (6,3%) родовищ, природний цеоліт (5,2%), Палигорскіт (5,1%) частка фіксованої форми поступово зростає протягом всього експерименту [55].

Частка фіксованої форми **Mn** (Рис. 2.5б) зростає з часом сорбції бентонітами ПБА-20, Rokla, Черкаського родовища та кислотно-модифікованому цеоліті до максимальних значень (91,5%; 71%; 33%; 14%) за 1 – 4 доби експерименту та практично не змінюється в подальшому. Вміст фіксованої форми лужно-модифікованого цеоліту та бентоніту Black Hill зростає до максимального значення (35 та 7,9%) за 2 доби сорбції з подальшим поступовим зменшенням до 24 та 3,6% на кінець експерименту.

Таким чином, найбільша частка фіксованої форми сорбції Co визначена для Na-модифікованих сорбентів: бентонітів ПБА-20 та Rokla, лужно-модифікованого цеоліту. Mn – при сорбції бентонітами ПБА-20 та Rokla.

Загалом можна зробити висновок, що для Na-модифікованих сорбентів (бентонітів ПБА-20, Rokla та лужно-модифікованого цеоліту) характерний високий ступінь сорбції з найбільшим вмістом міцних форм фіксації Co та Mn – кислоторозчинної та фіксованої, а також високим вмістом іонообмінної форми. Для природних (Ca-форма) бентонітів Black Hill та Черкаського родовища характерний порівняно з Na-модифікованими значно нижчий ступінь сорбції з переважанням іонообмінної форми сорбції Co та Mn. Для інших досліджуваних сорбентів (бентоніт Горбківського родовища, палигорскіт, природний та кислотно-модифікований цеоліт) характерні найнижчі ступені сорбції Co та Mn з високим вмістом водорозчинної та іонообмінної форм сорбції, низьким вмістом або відсутністю (для Mn) кислоторозчинної та фіксованої форм [55].

2.4 Висновки

1. Сорбційна рівновага Co та Mn при поглинанні з модельного розчину РРВ всіма дослідженими зразками сорбентів встановлюється протягом чотирьох - семи діб.

2. Встановлено, що найбільш ефективними сорбентами щодо Co та Mn є промислові модифіковані бентоніти ПБА-20, Rokla та лужно-модифікований цеоліт Сокирницького родовища (максимальний ступінь сорбції Co та Mn > 99%).

3. Промислова модифікація бентонітів натрієм та лабораторна модифікація лугом (NaOH) цеоліту значно підвищує ступінь сорбції Co та Mn в порівнянні з їх природними Ca-формами.

4. Ступінь десорбції дистильованою водою Co та Mn, сорбованих на досліджуваних природних та модифікованих сорбентах, є незначним і не перевищує декількох відсотків.

5. Максимальна частка іонообмінно сорбованого Co визначена для лужно-модифікованого цеоліту (65%), Na-модифікованих бентонітів Rokla (60%) та ПБА-20 (45%). Максимальна частка іонообмінної форми сорбції Mn - встановлена для лужно-модифікованого цеоліту (45,5%), бентонітів Rokla (16%) та Black Hill (15%).

6. Найбільша частка кислоторозчинної форми сорбції Co визначено при сорбції на бентоніті ПБА-20 та лужно-модифікованому цеоліті (35 та 40% відповідно), а найбільша частка кислоторозчинної форми сорбції Mn складає близько 30% при сорбції на лужно-модифікованому цеоліті.

7. Встановлено, що найбільш міцна фіксація Co та Mn відбувається при сорбції на промислово модифікованих бентонітах ПБА-20, Rokla та лужно-модифікованому цеоліті Сокирницького родовища.

8. Визначено фіксовану форму Co, найбільша частка якої характерна для Na-модифікованих сорбентів: бентонітів ПБА-20 та Rokla, лужно-модифікованого цеоліту; Mn – для бентонітів ПБА-20 та Rokla.

Таким чином, за всіма дослідженими параметрами (ступінь сорбції, швидкість встановлення сорбційної рівноваги, переважання міцно фіксованих форм сорбції Co/Mn – кислоторозчинної та фіксованої) серед представлених сорбентів найбільш ефективними як щодо Co, так і Mn є Na-модифіковані сорбенти – бентоніти ПБА-20, Rokla та лужно-модифікований цеоліт.

Після чого складемо принципову технологічну схема процесу очищення РРВ та проведемо її розрахунок в середовищах для моделювання Chemcad 6.3 та Matlab Simulink.

РОЗДІЛ 3. РОЗРОБКА РЕКОМЕНДОВАНОЇ ТЕХНОЛОГІЧНОЇ СХЕМИ ПРОЦЕСУ ОЧИСТКИ РРВ АЕС ТА РОЗРАХУНОК ЇЇ МАТЕРІАЛЬНОГО БАЛАНСУ В CHEMCAD ТА MATLAB

Вибір методу озонування для деструктивного окислення розчинів, що містять комплексони, обумовлений наступними його перевагами: - озонування руйнує з досить високою швидкістю практично будь-які органічні сполуки, в тому числі і комплексооутворюючі;

- утворені при окисленні комплексонів продукти деструкції не погіршують параметри подальших процесів, тому озонування може використовуватися практично на будь-якій стадії технологічної схеми очищення розчинів без погіршення загальних її показників;

-утворені в процесі саморозпаду озону і його взаємодії з молекулами води продукти радикального характеру мають потенціал окислення вище, ніж у вихідної молекули озону, що обумовлює високу ефективність використання озону в технологічних процесах;

- ступінь токсичності продуктів, що утворюються при окисленні комплексонів озоном, значно нижче вихідних з'єднань;

– озонування є практично безвідходним способом очищення, оскільки озон синтезують з кисню повітря і продуктом його розпаду також є кисень, тобто в ході процесу очищення не відбувається утворення вторинних забруднень розчинів;

– озон є одним з небагатьох окислювачів, що беруть участь в природних хімічних і біохімічних процесах, наслідком чого є його сумісність (до певних меж) з навколишнім середовищем;

– отримання озону безпосередньо в ході процесу обробки розчинів усуває необхідність в отриманні і зберіганні великих кількостей реагентів на обробку розчину, а також забезпечує швидке усунення аварійної ситуації, пов'язаної з попаданням озону в зовнішнє середовище, простим відключенням генератора озону;

– процеси озонування використовують в промисловості досить широко для водопідготовки і обробки стічних вод. В даний час промисловістю налагоджений серійний випуск устаткування продуктивністю від 1 г до 15 кг озону на годину.

В процесі озонування кубових залишків одночасно відбувається кілька фізико-хімічних перетворень. Має місце руйнування комплексів і органічних речовин, "отруючих" сорбенти. В результаті руйнування комплексів ^{60}Co і ^{54}Mn переходять в сорбуючу форму. У той же час, відбувається утворення твердої фази гідроксидів і оксидів перехідних металів (Fe, Ni, Cr і ін.), присутніх у вихідному кубовому залишку. На гідроксидах та оксидах відбувається співосадження радіонуклідів кобальту і марганцю за рахунок адсорбційних процесів. Повнота окислення комплексів в значній мірі визначає ступінь вилучення радіонуклідів ^{60}Co і ^{54}Mn.

На ступінь вилучення ^{60}Co і ^{54}Mn при співосадженні на гідроксид впливає pH розчину. При високих pH зростає розчинність гідроксидів, і, отже, знижується повнота виділення ^{60}Co і ^{54}Mn. При pH більше 12 коефіцієнт розподілу ^{60}Co і ^{54}Mn починає знижуватися. З іншого боку, визначено, що при значеннях pH розчину більше 12 починається руйнування ферроціанідних сорбентів, що використовуються для селективної сорбції радіонуклідів цезію. Тому після завершення процесу озонування необхідно провести коригування pH розчину до значень менше 12. Проте при pH розчину менше 11 проявляється різке зниження розчинності боратів, присутніх в розчинах. Таким чином, з урахуванням всіх факторів: зниження розчинності гідроксидів і підвищення коефіцієнта розподілу кобальту і марганцю, відсутність випадання боратів з кубового залишку і збереження високої ефективності ферроціанідних сорбентів до радіонуклідів цезію, коригування pH розчину після завершення озонування повинне проводитися до значення, рівного 11.

Кількість утвореного при озонуванні осаду залежить від складу кубового залишку і становить від 1 до 4 г на літр вихідного розчину, тобто не перевищує одного відсотка. Проведений гранулометричний аналіз показав, що до складу осаду від озонування входять частинки з розмірами від 0,1 до 30 мкм. Для виведення

такого осаду доцільно фільтрацію розчину проводити в дві стадії: попередня фільтрація на фільтрі, що затримує частинки з розмірами не менше 5 мкм, і мікрофільтрація на мембранному фільтрі з мембранами типу Trumem з розміром пор не більше 0.2 мкм. Використання попередньої фільтрації зменшує навантаження на мембранний фільтр і збільшує тривалість міжрегенеративного циклу фільтрації.

Таким чином, основними технологічними стадіями процесу очищення РРВ на установці іонно-селективного очищення є попередня фільтрація і підготовка вихідного розчину, озонування, фільтрація і селективна сорбція. Після озонування та фільтрації очищуючий розчин направляють на селективну сорбцію цезію на ферроціанідних сорбентах,. Сорбція проводиться на двох послідовно з'єднаних фільтрах-контейнерах (ФК). Кінцевими продуктами переробки є: очищений від радіонуклідів сольовий розчин; відпрацьований сорбент у фільтрах-контейнерах (об'ємна активність в сотні разів вище, ніж у вихідного РРВ); шлам з фільтрів, що утворюється в результаті озонування (об'ємна активність знаходиться на рівні вихідних РРВ).

3.1 Структурний аналіз ХТС

Спершу складемо таблицю відповідності потоків та апаратів для того, щоб на основі технологічної схеми сформувати структурну схему потоків та апаратів (рис. 3.1). Нумерація апаратів на структурній схемі відповідає технологічній схемі на рис. 3.1.

Рисунок 3.1. Принципова технологічна схема очистки РРВ АЕС.

1,2 – ємність реагентів; 3,4 – приймаюча ємність; 6 – вузол генерації озону; 7 – ежектор; 8 – вузол мікро-фільтрації; 9 – ємність шламу; 10 – ємність фільтрату; 12,13,14 – фільтр-контейнер; 16,17,18 – контрольна ємність; 5,11,15,19 – насоси; ЛО – лінія очистки

Таблиця 3.1 – Формалізація задачі ХТС

Продовження таблиці 3.1

Вхідні потоки схеми входять в апарати 1, 2, 3 та 4. Вихідні потоки виходять з апаратів 9 та 19. Параметричність всіх потоків однакова.

Структурна схема процесу, що відповідає технологічній схемі (рис. 3.1) зображена на рис. 3.2:

Рисунок 3.2 – Структурна схема процесу

Виконаємо послідовно всі етапи структурного аналізу цієї схеми.

1. Сформуємо матрицю суміжності А.

Цей етап виконаємо із використанням програми.

A=[0 0 1 1 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0;0 0 1 1 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0;0 0 0 0 1 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0;0 0 0 0 1 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0;0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0;0 0 0 0 0 0 1 1 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0;0 0 0 0 0 0 0 0 0 1 0 0 0 0 0 0 0 0 0;0 0 1 1 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0;0 0 0 0 0 0 0 0 1 1 0 0 0 0 0 0 0 0 0;0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0;0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 1 0 0 0;0 0 0 0 0 0 0 0 0 1 1 0 0 0 0 0 0 0 0;0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 1 0 0 1 1 1 0; 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 1 0 1 1 1 0;0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 1 1 1 0;0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 1 0 0 0 0 0;0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 1 0 0 0 1;0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 1 0 0 0 1;0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 1 0 0 0 1;0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0]

A =

0	0	1	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
0	0	1	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
0	0	0	0	0	0	1	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
0	0	1	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
0	0	0	0	0	0	0	0	1	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	1	0	0	0	0	0	0
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	1	1	1	0
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	1	1	1	0
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	1	1	0
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	1
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	1
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	1
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0

Застосуємо алгоритм покриття для визначення комплексів схеми. За алгоритмом маємо звести матрицю суміжності A послідовно в степені 2, 3, …, 19 та логічно їх помножити. В результаті отримаємо матрицю шляхів C. В Matlab ця дія виглядає так:

C=[A|A^2|A^3|A^4|A^5|A^6|A^7|A^8|A^9|A^10|A^11|A^12|A^13|A^14|A^15|A^16|A^17|A^18|A^19]

C =

0	0	1	1	1	0	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
0	0	1	1	1	0	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
0	0	1	1	1	0	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1

```
0 0 1 1 1 0 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1
0 0 1 1 1 0 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1
0 0 1 1 1 0 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1
0 0 1 1 1 0 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1
0 0 0 0 0 0 0 0 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1
0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0
0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 1 1 1 1 1 1 1 1 1
0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 1 1 1 1 1 1 1 1
0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 1 1 1 1 1 1 1
0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 1 1 1 1 1 1
0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 1 1 1 1 1 1
0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 1 1 1 1 1 1
0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 1 1 1 1 1 1
0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 1 1 1 1 1 1
0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 1 1 1 1 1 1
0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 1 1 1 1 1 1
0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 1 1 1 1 1 1
```

Для отримання матриці D, що вказує на наявні комплекси необхідно виконати в Matlab дію:

```
D=C&C'
D =
0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0
0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0
0 0 1 1 1 0 1 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0
0 0 1 1 1 0 1 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0
0 0 1 1 1 0 1 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0
0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0
0 0 1 1 1 0 1 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0
0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0
0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0
0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0
0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0
0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0
0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0
0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0
0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 1 1 1 1 1 0
0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 1 1 1 1 1 0
0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 1 1 1 1 1 0
0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 1 1 1 1 1 0
0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 1 1 1 1 1 0
0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0
```

Як можна бачити з матриці D, в схемі буде 2 комплекси:

K1=[3 4 5 7]; K2=[14 15 16 17 18];

2. Далі може бути сформована послідовність розрахунку з комплексів й поодиноких вершин:

ППРС=(1,2,К1,6,8,9,10,11,12,13, К2,19)

3. На цьому кроці для кожного комплексу отримаємо контури та множини оптимально розвиваючих дужок ОМРД.

Спершу побудуємо прадерево комплексу К1. Для цього використаємо список суміжності який показано в таблиці 3.2:

Таблиця 3.2 – Список суміжності для К1

Рисунок 3.3 – Прадерево комплексу К1

Контури комплексу К1, що отримані з дерева, наступні:

1) 3-5-7-3

2) 4-5-7-4

Складемо матрицю контурів для К1 у вигляді таблиці 3.3:

Таблиця 3.3 – Матриця контурів К1

Степінь входження дужок найбільша у дуги (5-7) f=2 , тому розірвемо цю дугу. Таким чином, оптимальна множина розриваючих дужок для першого комплексу така:

$$ОМРД_{К1} = \{ (5\text{-}7) \}$$

Будуємо прадерево комплексу К2. Для цього використаємо список суміжності який показано в таблиці 3.4:

Таблиця 3.4 – Список суміжності для К2

Рисунок 3.4 – Прадерево комплексу К2

Контури комплексу К1, що отримані з дерева, наступні:

1)14-16-15-14

2)14-17-15-14

3)14-18-15-14

Складемо матрицю контурів для К2 у вигляді таблиці 3.5:

Таблиця 3.5 – Матриця контурів К2

Степінь входження дужок найбільша у дуги (15-14) f=3 , тому розірвемо цю дугу. Таким чином, оптимальна множина розриваючих дужок для першого комплексу така:

В результаті поєднання цих множин маємо оптимальну множину розриваючих дужок для всієї схеми (рис. 3.5):

ОМРД = {(5-7) ,(15-14)}

Рисунок 3.5 – Структурна схема процесу із вказаними розірваними дужками

Таким чином, розірвавши отримані дуги, отримаємо послідовність розрахунку схеми:

ОПРС= (1, 2, 3, 6, 8, 9, 10, 11, 12, 13, 16, 17, 18,19)

3.2 Розрахунок матеріального балансу

Хіміко-технологічні розрахунки складають головну, найбільш трудомістку частину проекту будь-якого хімічного виробництва, вони ж є завершуючою стадією лабораторного технологічного дослідження і виконуються також при обстеженні працюючих цехів і установок. Метою цих розрахунків може бути визначення кінетичних констант і оптимальних параметрів виробництва або ж обчислення реакційних об'ємів і основних розмірів хімічних реакторів.

Матеріальні розрахунки, разом з тепловими, є основою технологічних розрахунків. До них слід віднести визначення виходу основного і побічних продуктів, витратних коефіцієнтів по сировині, виробничих втрат. Тільки визначивши матеріальні потоки, можна провести необхідні конструктивні розрахунки виробничого обладнання і комунікацій, оцінити економічну ефективність і доцільність процесу, складання матеріального балансу необхідне як при проектуванні нового, так і при аналізі роботи існуючого виробництва. При проектуванні нових виробництв використовується досвід тих, що існують з урахуванням результатів сучасних новітніх досліджень. На основі порівняльного техніко-економічного аналізу виробництв, що діють, можливо вибрати раціональнішу технологічну схему, оптимальні конструкції апаратів і умови здійснення процесу.

Основою матеріального балансу є закони збереження маси речовини і стехіометричних співвідношень.

Матеріальний баланс складають по рівнянню основної сумарної реакції з урахуванням побічних реакції згідно закону збереження маси речовини. Загальна маса всіх матеріалів, які поступають в апарат (або в цех) тобто прихід, рівний загальній масі матеріалів, що виходять, тобто витраті. Матеріальний баланс складають на одиницю маси основного продукту (кг, т) або на одиницю часу (год, доба).

Матеріальний баланс може бути представлений рівнянням, ліву частину якого складає маса всіх видів сировини і матеріалів, що поступають на переробку $\sum G$, а праву — маса отримуваних продуктів $\sum G'$ плюс виробничі втрати $G_{втр}$:

$$\sum G = \sum G' + G_{втр} \tag{3.1}$$

Для розрахунку МТБ використовуємо спеціалізоване програмне забезпечення ChemCad та Matlab Simulink.

Для формування технологічної схеми у ChemCad були використані стандартні прийоми роботи з програмними стимуляторами.

Процес моделювання в ChemCad включає наступні основні кроки:

- Старт нової роботи
- Визначення технічних одиниць
- Створення схеми потоків
- Відбір блоків
- Вибір параметрів термодинаміки
- Визначення вхідних потоків
- Визначення параметрів устаткування
- Запуск моделювання
- Отримання результатів
- Вивід результатів та друк

Опираючись на теоретичні відомості про процес та взявши за основу розроблену модель очистки РРВ (рис.3.1) представимо в CHEMCAD 6.3 схему для очистки РРВ (рис.3.5).

Рисунок 3.6 – Схема очистки РРВ в CHEMCAD 6.3

У таблиці 3.6 показані блоки, які використовувались в програмі.

Таблиця 3.6 – Основні блоки технологічної схеми в CHEMCAD 6.3

Продовження таблиці 3.6

Продовження таблиці 3.6

Опис блоків бібліотеки моделей:

- Stoichiometric reactor — Ця модель застосовується коли кінетика реакції невідома, але відомі стехіометричні рівняння стадій процесу і відома ступінь перетворення для кожної стадії.
- Mixer – змішувач. Змішує кілька потоків в один.
- Stream reference – SREF. Використовується для рециклів.
- Compressor – компресор. Дозволяє змінити тиск потоків. Використовується для моделювання політропних відцентрових компресорів, об’ємних компресорів, адіабатичних компресорів.
- Heat Exchanger – теплообмінник. Використовується для теплообміну між гарячими та холодними потоками.

Вхідні потоки моделі та їх тип:

- Oxygen – вхідний потік (матеріальний) – Oxygen – подача оксигену.
- ^{60}Co – вхідний потік (матеріальний) – H_2 – подача кобальту.
- ^{54}Mn – вхідний потік (матеріальний) – ^{54}Mn – подача мангану
- H_2O – вхідний потік (матеріальний) – H_2O – подача води.

Таблиця 3.7 – Специфікація апаратів

3.2.1 Специфікація потоків

В схемі очистки РРВ беруть участь наступні компоненти:

- Oxygen – оксиген;
- Ozon– озон
- ^{60}Co – кобальт;
- ^{54}Mn – манган;
- H_2O – вода.

Зведена специфікація усіх вхідних потоків представлена в таблиці 3.8:

Таблиця 3.8 – Специфікація потоків

3.2.2 Опис процесу

Кубові залишки (КЗ) після відділення великих суспензій на попередньому фільтрі (на рисунку не показаний) направляються в одну з двох прийомних ємностей ПЄ, де здійснюється коректування pH розчину до необхідного значення лугом з ємності реагентів ЄР, підігрів за допомогою пари до заданої температури і перемішування. Далі розчин насосом Н1 направляється через ежектор Е на озонування. Озонування проводиться в періодичному режимі по контуру: приймальня ємність - насос - ежектор - приймальня ємність. Ежектор забезпечує необхідну поверхню і інтенсивність масообміну озонування розчину подачею озону, одержуваного в вузлі генерування озону ВГО. Озонування закінчується при досягненні об'ємної активності розчину по Co і Mn сталої величини, яка визначається з аналізу проб.

Проводиться зворотнє коригування pH розчину азотною кислотою, що надходить в приймальну ємність з другої ємності реагентів ЄР, після чого розчин спрямовується на попередню і мікрофільтрацію в вузлі ВМФ. Потім фільтрат КЗ надходить в ємності фільтрату ЄФ і далі насосом Н2 прокачується через лінію очищення ЛО - два послідовно з'єднаних фільтри-контейнера ФК з ферроціанідним сорбентом цезію - в одну з контрольних ємностей КЄ. Якщо об'ємна активність проби з ємності КЄ виявляється нижче встановленого рівня по Cs, то очищений від радіонуклідів кубовий залишок насосами направляють в ємність прийому очищеного розчину і далі на установку кристалізації. Якщо об'ємна активність розчину буде вище встановленого рівня по $^{134,137}Cs$, то фільтрат насосом Н4 направляється в третій фільтр-контейнер на доочистку від цезію. Вибір будь-якої з послідовностей пропускання кубового залишку через фільтри-контейнери і заповнення ємностей забезпечується запірною арматурою. Після вироблення ресурсу першого по ходу розчину фільтра-контейнера його відключають. Другий фільтр стає першим, третій - другим і т.д.

Для очищення фільтрів вузла мікрофільтрації проводиться їх періодична промивка зі скиданням шламів в спеціальну ємність ЄШ. У міру накопичення певного обсягу неосвітленого шламу, він перекачується в установку цементування.

Очищений від радіонуклідів до рівнів нижче десяти втручань по воді відповідно до вимог Норм радіаційної безпеки - 99 кубовий залишок з об'ємною активністю менше 10 Бк / дм3 може бути упарений до сухих солей і захоронений на полігоні низькотоксичних відходів. Відпрацьований сорбент, розміщений безпосередньо в фільтрі-контейнері, після вичерпання ресурсу направляється на тимчасове зберігання. При необхідності сорбент може бути затверділим безпосередньо в фільтрі за допомогою високопроникних цементних розчинів, що дозволить отримати кондиційний продукт не тільки по вилуговуванню, але і по міцності на стиск.

При очищенні РРВ, що містять високі (понад 1 г / л) концентрації катіонів натрію, калію, кальцію і ін., а також домішки у вигляді мінеральних масел і твердих суспензій, виникає проблема ефективного вилучення радіонуклідів через відсутність універсального сорбенту, що дозволяє витягувати з розчину радіонукліди на тлі інших конкуруючих катіонів, а також у зв'язку з необхідністю проведення спеціальної стадії очистки РРВ від суспензій, нафтопродуктів і т.п.

Вхідні потоки схеми очистки РРВ (результати з Chemcad) показані на рисунку 3.7.

Stream No.	1	2	3	4
Name	Oxygen	Co	Mn	H2O
- - Overall - -				
Molar flow kmol/h	31.2510	0.0180	0.0281	2497.9186
Mass flow kg/h	1000.0000	100.0000	100.0000	45000.0025
Temp C	50.0000	50.0000	50.0000	50.0000
Pres atm	0.5000	0.5000	0.5000	0.5000
Vapor mole fraction	1.000	1.000	1.000	0.0000
Enth MJ/h	22.868	4.2520	4.4419	-7.0975E+005
Tc C	-118.5700	18030.5523	6287.0855	374.2000
Pc atm	50.1000	0.9274	1.4654	218.2900
Std. sp gr. wtr = 1	1.128	1.370	1.241	1.000
Std. sp gr. air = 1	1.105	191.599	122.661	0.622
Degree API	-6.0011	-28.2526	-17.4983	10.0000
Average mol wt	31.9990	5549.1826	3552.5645	18.0150

Actual dens kg/m3	0.6036	31.2101	44.2292	987.7984
Actual vol m3/h	1656.8316	3.2041	2.2609	45.5559
Std liq m3/h	0.8869	0.0730	0.0806	45.0001
Std vap 0 C m3/h	700.4482	0.4039	0.6309	55987.4638

Рисунок 3.7 - Вхідні потоки схеми (результат Chemcad)

Продукти на виході (рисунок 3.8.).

Stream No.	15	21
Name		
- - Overall - -		
Molar flow kmol/h	186.8629	5.3089
Mass flow kg/h	34924.8619	18123.9192
Temp C	4175.7421	1393.4878
Pres atm	0.0010	0.0010
Vapor mole fraction	0.0000	1.000
Enth MJ/h	36764.	92393.
Tc C	4989.8746	5743.0468
Pc atm	3348.1827	1.5265
Std. sp gr. wtr = 1	1.210	1.230
Std. sp gr. air = 1	6.453	117.872
Degree API	-14.5584	-16.4875
Average mol wt	186.9010	3413.8757
Actual dens kg/m3	658.1359	0.0250
Actual vol m3/h	53.0663	725569.6394
Std liq m3/h	28.8634	14.7313
Std vap 0 C m3/h	4188.2802	118.9918

Рисунок 3.8 - Продукти на виході

3.2.3 Матеріальні баланси

Матеріальний баланс озонатора показаний в таблиці 3.9.

Таблиця 3.9 – Матеріальний баланс озонатора

Матеріальний баланс ежектора показаний в таблиці 3.10

Таблиця 3.10 – Матеріальний баланс ежектора

Матеріальний баланс мікрофільтра показаний в таблиці 3.11

Таблиця 3.11 – Матеріальний баланс мікрофільтра

Компоненти	Вхід ($м^3$/год)	Вихід ($м^3$/год)	
		15	10
Bottoms	46199,8	27715,26	18484,54
Сума	46199,8	46199.8	

Матеріальний баланс першого фільтра-контейнера показаний в таблиці 3.12

Таблиця 3.12 – Матеріальний баланс першого фільтр-контейнера

Матеріальний баланс другого фільтра-контейнера показаний в таблиці 3.13

Таблиця 3.13 – Матеріальний баланс другого фільтра-контейнера

Матеріальний баланс третього фільтра-контейнера показаний в таблиці 3.14

Таблиця 3.14 – Матеріальний баланс третього фільтра-контейнера

Загальні масові витрати на вході показані в таблиці 3.15.

Таблиця 3.15 – Масові витрати на вході

Кінцева загальна кількість продукту показана в таблиці 3.16.

Таблиця 3.16 – Кінцева кількість продукту

3.3 Побудова принципової технологічної схеми в Simulink

Загальний вигляд технологічної схеми в середовищі Matlab Simulink зображений на рисунку 3.9.

Рисунок 3.9 – Технологічна схема очистки РРВ в середовищі Matlab Simulink

Озонатор побудований в Simulink показаний на рисунку 3.10.

Рисунок 3.10 – Схема озонатора в середовищі Matlab Simulink

Матеріальний баланс озонатора показаний в таблиці 3.17.

Таблиця 3.17 – Матеріальний баланс озонатора

Схема ежектора побудованого в Simulink показана на рисунку 3.11.

Рисунок 3.11 – Схема ежектора в середовищі Matlab Simulink

Матеріальний баланс ежектора показаний в таблиці 3.18.

Таблиця 3.18 – Матеріальний баланс ежектора

Схема мікрофільтра показана на рисунку 3.12.

Рисунок 3.12 – Схема мікрофільтра в Simulink

Матеріальний баланс мікрофільтра показаний в таблиці 3.19.

Таблиця 3.19 – Матеріальний баланс мікрофільтра

Схема першого фільтр-контейнера показана на рисунку 3.13.

Рисунок 3.13 – Схема першого фільтра – контейнера в Simulink

Матеріальний баланс першого фільтра – контейнера показаний в таблиці 3.20.

Таблиця 3.20 – Матеріальний баланс першого фільтра - контейнера

Схема другого фільтр-контейнера показана на рисунку 3.14.

Рисунок 3.14 – Схема першого фільтра – контейнера в Simulink

Матеріальний баланс першого фільтра – контейнера показаний в таблиці 3.21.

Таблиця 3.21 – Матеріальний баланс першого фільтра - контейнера

Схема третього фільтр-контейнера показана на рисунку 4.10.

Рисунок 3.14 – Схема першого фільтра – контейнера в Simulink

Матеріальний баланс першого фільтра – контейнера показаний в таблиці 3.22.

Таблиця 3.22 – Матеріальний баланс першого фільтра - контейнера

Загальні масові витрати на вході показані в таблиці 3.23.

Таблиця 3.23 – Масові витрати на вході

Кінцева загальна кількість продукту показана в таблиці 3.24.

Таблиця 3.24 – Кінцева кількість продукту

3.4 Висновки

На основі виконаних розрахунків можна зробити висновок, що матеріальний баланс процесу очистки рідких радіоактивних відходів в середовищі Chemcad 6.3 та Matlab Simulink розрахований вірно. Наступним кроком буде розробка інформаційної структури, дизайну та інформаційне наповнення web-сайту, який буде представляти всю необхідну інформацію по магістерській роботі.

РОЗДІЛ 4. РОЗРОБКА WEB– ПРОЕКТУ

На сьогоднішній день практично кожна організація має власний web-сайт. В умовах використання сучасних інформаційних технологій - це необхідний фактор існування, що дозволяє розширити поле рекламної діяльності та залучити тим самим додаткових клієнтів.

Створення та розробка сайтів включає:

Затвердження початкового технічного завдання на розробку сайту.

Визначення структурної схеми сайту - розташування розділів, контента і навігації.

Веб-дизайн - створення графічних елементів макету сайту, стилів і елементів навігації.

Розробка програмного коду, модулів, бази даних і інших елементів сайту необхідних в проекті.

4.1 Розробка інтерфейсу web-сайту

Розроблений сайт містить 4 сторінки з інформацією за темою магістерської дисертації та її розрахунками. Вигляд сторінок, що були створені з використанням інструменту Brackets наведені на рисунках Рис. 4.1 - Рис. 4.10. Код наведений в додатку Б.

Brackets — текстовий редактор від компанії Adobe, призначений для редагування JavaScript, HTML і CSS. Сирцевий код Brackets написаний з використанням веб-технологій (JavaScript, HTML і CSS) і поширюється під ліцензією MIT. Редактор оформлений у вигляді відокремленого додатка, для установки якого підготовлені deb-, dmg- і msi- пакети для Linux, OS X і Windows.

Brackets підтримує режим Live-розробки, при якому редагований контент (JavaScript, HTML і CSS) у міру зміни відразу відображається в синхронізованому з редактором вікні браузера — розробник може змінювати вміст і відразу спостерігати до яких наслідків наводять дані зміни. Налагодження також може виконаються синхронно з браузером, розробник може встановити точку зупину або відкотитися на крок назад при перегляді результатів. Є вбудована підтримка

препроцесорів LESS і SCSS. В інтерфейсі застосовується система контекстно-залежних інструментів, що з'являються в міру необхідності в основному вікні розробки. Для розширення можливостей редактора розвивається система доповнень.

Порядок створення

1. В редакторі Brackets створюю 3 файли (index.html, style.css, kalk.html).

index.html – Головна сторінка курсового проекту. Містить посилання на інші сторінки.

style.css – Файл стилів, що використовується в головній сторінці проекту.

kalk.html – Файл розрахунку.

Для більшої зручності при роботі використовую пагін ***Emmet (brackets)***

Рисунок 4.1 – Вікно редактора Brackets

2. Задаю загальну структуру документу:

```
<!DOCTYPE html>
<html lang="en">
<head>
   <meta charset="UTF-8">
   <title>Document</title>
</head>
<body>
</body>
</html>
```

Виконуємо підключення каскадних таблиць стилів та бібліотек: *bootstrap, font-awesom.*

Поступово наповнюємо тіло html коду розміткою, паралельно задаючи стилі у файлі CSS.

Використання файлу стилів

Звязування з файлом стилів відбувається за допомогою рядку:

```
<link rel="stylesheet" href="style.css">
```

Тегове форматування тексту

Текст у HTML-документі був відформатований за допомогою відповідних тегів:

<B> та </B> - Напівжирне накреслення

^{та} - Верхній індекс

_{та} - Нижній індекс

Для визначення звичайних абзаців у мові HTML використовують теги <P> і </P>.

Приклади використання тегів:

Основними джерелами утворення радіоактивних відходів (РАВ) є діючі АЕС. Радіоактивні речовини утворюються під час роботи АЕС на потужності при ділені ядер U235, U233, Pi239 в активній зоні реактора, а також в результаті активації нейтронами різних матеріалів, які знаходяться в активній зоні, тобто як продукти ядерних реакцій. В середньому, в залежності від потужності і типу реакторної установки, за рік утворюється від 0,15 до 0,35 м3 рідких і від 0,1 до 0,3 м³ - твердих РАВ на 1 МВт.

Для того щоб розбити текст на логічні частини, я використовував заголовки. Мова HTML підтримує шість рівнів заголовків документів. Вони позначені тегами від <H1>...</H1> до <H6>...</H6>.

Приклади використаних заголовків:

<h1> Комп’ютерно - інтегрована система для моделювання процесу знешкодження рідких радіоактивних відходів </h1>

<h3>Виконав: студент гр.ХА-51м</h3>

<h3>Мацібура О.П.</h3>

<h3>Науковий керівник:</h3>

<h3>Бугаєва Л.М.</h3>

Нумеровані та марковані списки

У даному HTML-документі я використовував три види списків:

• невпорядкований (маркований);

• упорядкований (нумерований);

• список визначень.

У невпорядкованому списку для виділення елементів використовуються певні позначки (крапки, квадрати тощо). Починається такий список із тегу <UL>, а закінчується — </UL>. Кожний елемент списку починається з тегу <LI>. Тег <UL> може мати атрибут TYPE, який визначає форму позначки.

В упорядкованому списку всі елементи пронумеровані. Починається список із тегу <0L>, а закінчується — </OL>. Кожний елемент такого списку також починається з тегу <LI>. Тег <OL> може мати атрибут TYPE, який визначає тип нумерації.

Приклади використаних списків наведені нижче:

```
<ul>
<li type="A">Проаналізувати експериментальні дані;</li>
<li type="I">Розробити технологічну схему знешкодження РРВ;</li>
 <li type="i">Розрахувати апарати отриманої технологічної схеми.</li>
 <li type="1">Створити багатоваріантний продукт.</li>
 </ul>
```

Текстові гіперпосилання

Для створення гіперпосилання необхідно використовувати теги <A> та </A>, визначивши для тегу <A> атрибут HREF. Його значенням має бути адреса URL, на яку вказує посилання. Текст посилання розташовують між тегами <A> і </A>.

Нижче наведений приклад використання в моїй роботі текстового гіперпосилання:

```
<h2><a href ="http://www.igmof.org.ua/uk">Інститут геохімії навколишнього середовища</a></h2>
```

Створення таблиці

Створюючи таблиці я використовую наступні елементи. Таблицю описую за допомогою тегів <TABLE>...</TABLE>; вона повинна мати один або кілька рядків <TR>...</TR>, у кожному з яких може міститися заголовок <TH>...</TH> або дані <TD>...</TD>.

Приклад створеної таблиці наведено нижче.

```
<table  border=2 width="60%">
            <tr>
               <th><a href="https://vk.com/id43793994">Звязок з автором</a></th>
               <th><a href="http://kxtp.kpi.ua/index.php/uk/">Кафедра КХТП</a></th>
               <th><a href="http://kpi.ua/">Сайт КПІ</a></th>
               <th><a href="http://www.igns.gov.ua/">Сайт ДУ</a></th>
            </tr>
```

```
</table>
```

Карти посилань

Графічну карту посилань створюю за допомогою кількох тегів. У тегу <IMG> визначають атрибут SRC, щоб задати зображення, і атрибут USEMAP, значенням якого є ім'я карти (має починатися символом #). Власне карту створюють за допомогою тегу <MAP> з атрибутом NAME, який містить ім'я карти (визначене в атрибуті USEMAP, але без символу #) та тегу </MAP>. Між ними записують теги <AREA>, які задають параметри гарячих областей.

Приклад визначення карти посилань наведено нижче.

```
  <img src="images/scheme.jpg" class="my-scheme" alt="Навігація по сайту"
  usemap="#Navigation"></div>
  <p>
    <map id="Navigation" name="Navigation">
     <area shape="rect" coords="120,10,85,40"
href="http://findpatent.com.ua/patent/244/2442537.html" alt="Ємність реагентів">
     <area shape="rect" coords="215,10,185,40"
href="http://findpatent.com.ua/patent/244/2442537.html" alt="Ємність реагентів">
     <area shape="rect" coords="65,115,105,80"
href="https://ru.wikipedia.org/wiki/%D0%81%D0%BC%D0%BA%D0%BE%D1%81%D1%82%D1%8C"
alt="Приймаюча ємність">
     <area shape="rect" coords="240,115,200,80"
href="https://ru.wikipedia.org/wiki/%D0%81%D0%BC%D0%BA%D0%BE%D1%81%D1%82%D1%8C"
alt="Приймаюча ємність">
     <area shape="rect" coords="370,200,310,175"
href="https://uk.wikipedia.org/wiki/%D0%95%D0%B6%D0%B5%D0%BA%D1%82%D0%BE%D1%80"
alt="Ежектор">
     <area shape="rect" coords="370,170,300,135"
href="https://ru.wikipedia.org/wiki/%D0%9E%D0%B7%D0%BE%D0%BD%D0%B0%D1%82%D0%BE%D
1%80" alt="Озонатор">
    </map>
  </p>
```

Вигляд проекту з використаними каскадними таблицями стилів

На Рис. 4.2 ми можемо спостерігати головне меню. Тут доступні посилання на найважливіші сторінки, які пов’язані з проектом, зокрема сайти НТУУ «КПІ імені Ігоря Сікорського», державна установа «Інститут геохімії навколишнього середовища НАН України», кафедри КХТП, та сторінка для зв’язку з автором проекту. Також тут стисло описана головна ідея магістерської дисертації. Кнопка «Розрахунок» дозволяє перейти до вікна Рис. 4.2 в якому проводяться розрахунки.

Рисунок 4.2 – Головна сторінка створеного сайту

В даному вікні Рис. 4.3 та 4.4 ми можемо спостерігати головні завдання дослідження, що зображені за допомогою впорядкованих та не впорядкованих списків а також реалізацію створення та редагування таблиць.

Рисунок 4.3 – Зміст роботи

Рисунок 4.4 – Вигляд сторінки «Актуальність теми»

У вікні Рис. 4.5 зображено дві форми. Для введення даних для розрахунку та їх виведення.

Рисунок 4.5 – Форми введення та виведення обчислень

В частині сайту, що зображена на рис. 4.6 присутня мапа посилань. Мапа посилань створена на основі інформації про апарати. Навівши мишку на апарат та натиснувши її відбудеться перенаправлення на інформацію про апарат.

Рисунок 4.6 – Мапа посилань.

4.2 Розрахунок ежектора

Розрахунок струминного ежектора роблять у наступній послідовності:

1) визначають критичні швидкості робочого і інжектуючого потоків за формулою:

$$a_* = \sqrt{\frac{2k}{k+1} RT_0} = \sqrt{\frac{2k}{k+1} P_0 V_0} = \sqrt{\frac{2k}{k+1} \frac{P_0}{\rho_0}} \quad (4.1)$$

2) розраховують відносну температуру потоків за формулою (4.2) і відносний тиск за формулою (4.3):

$$\tau = \frac{T}{T_0} = 1 - \frac{k-1}{k+1} \lambda^2 \quad (4.2)$$

$$\Pi = \frac{P}{P_0} = [1 - \frac{k-1}{k+1} \lambda^2]^{k/(k-1)} \quad (4.3)$$

3) по знайденому значенню відносного тиску визначають газодинамічні функції - приведену швидкість потоків λ і приведений поперечний переріз потоків q;

4) проводять перевірку області значень приведеного поперечного перерізу потоків, в якій робота ежектора неможлива, за формулами (4.4-4.9). При цьому:

$$\lambda_\varepsilon \leq \lambda_{max}$$

де λ_ε - наведена швидкість потоку при заданій відносній щільності ε,

λ_{max} - наведена швидкість потоку при закінченні потоку в абсолютний вакуум;

$$\lambda = \frac{w_a}{a_*} = \sqrt{\frac{k+1}{k-1}(1 - \frac{T}{T_0})} \quad (4.4)$$

$$\tau = \frac{T}{T_0} = 1 - \frac{k-1}{k+1} \lambda^2 \quad (4.5)$$

$$\Pi = \frac{P}{P_0} = [1 - \frac{k-1}{k+1} \lambda^2]^{k/(k-1)} \quad (4.6)$$

$$\varepsilon = \frac{\rho}{\rho_0} = \Pi^{1/k} = \tau^{1/(k-1)} = [1 - \frac{k-1}{k+1} \lambda^2]^{k/(k-1)} \quad (4.7)$$

$$\beta = \frac{V}{V_0} = \frac{1}{\varepsilon} = \frac{1}{[1 - \frac{k-1}{k+1} \lambda^2]^{k/(k-1)}} \quad (4.8)$$

$$q = \frac{w_a \rho}{a_* \rho_*} = \frac{w_a}{a_*} \frac{\rho}{\rho_0} \frac{\rho_0}{\rho_*} = \frac{\lambda \varepsilon}{\varepsilon_*} \quad (4.9)$$

5) розраховують методом послідовного наближення досяжне значення коефіцієнта інжекції;

6) визначають методом послідовного наближення досяжний тиск стиснення P_c або досяжну ступінь підвищення тиску $P_c/P_н$;

7) розраховують геометричні розміри струминного апарату [56].

У вікні Рис. 4.7 показано поле введення даних для розрахунку ежектора типу - рідина – газ при критичному режимі.

Розрахунок ежектора в середовищі Mathcad наведений в Додатку А.

Рисунок 4.7 - Поле для введення даних

Результати розрахунку показані на Рис. 4.8 та Рис. 4.9.

Рисунок 4.8 – Результати розрахунку

Рисунок 4.9 – Результати розрахунку

На Рис. 4.10 показано значення тисків на графіку, які будуть відкладатися в залежності від положення перетину.

Рисунок 4.10 – Залежність тисків від положення перетину

4.3 Висновки

В цьому розділі було представлено розробку сайту, який відображає основні задачі та результати магістерської дисертації. Сайт може бути використаний для отримання інформації по результат розрахунків спеціалістами «Інституту геохімії навколишнього середовища НАН України», за даними якого було виконано дану роботу. Також він може бути корисним студентам та інженерам, робота яких пов’язана із проблемами очищення рідких радіаційних відходів.

ВИСНОВКИ

1. Проведений огляд науково-технічної і патентної літератури показав, що в даний час для очищення рідких радіоактивних відходів (РРВ) низького і середнього рівня активності від довгоживучих радіонуклідів кобальту та марганцю використовуються сорбційні, осаджувальні і мембрані методи, а також їх різні поєднання. Для видалення радіонуклідів кобальту та марганцю, що знаходяться в розчинах в основному, в іонному стані найбільш широко використовуються сорбційні методи з використанням органічних іонообмінних смол і неорганічних сорбентів різних типів.

2. Проведені дослідження показали, що за всіма параметрами (ступінь сорбції, швидкість встановлення сорбційної рівноваги, переважання міцно фіксованих форм сорбції Co/Mn – кислоторозчинної та фіксованої) серед представлених сорбентів найбільш ефективними як щодо Co, так і Mn є Na-модифіковані сорбенти – бентоніти ПБА-20, Rokla та лужно-модифікований цеоліт.

3. Виконано багатоваріантні розрахунки технологічної схеми в програмних середовищах Chemcad 6.3 та Matlab Simulink. Отримано параметри всіх потоків в схемі очищення рідких радіоактивних відходів. За їх результатами запропоновано найбільш прийнятний варіант процесу.

4. Було розроблено web-проект на основі магістерської роботи, який містить основну інформацію про виконане магістерське дослідження та надає можливість проводити розрахунки матеріальних балансів в on-line режимі.

5. Результати роботи докладались на 4 наукових конференціях міжнародних та українських. За темою магістерської дисертації було опубліковано 6 тез.

ПЕРЕЛІК ПОСИЛАНЬ

1. Санітарні правила поводження з радіоактивними відходами СП 2.6.6.1168-02.-СП6: Деан. 2003. 64 с.

2. Кузнєцов Ю.В., Щебетковскій В.Н., Трусов А.Г. Основи очищення води від радіоактивних забруднень.-М .: Атомиздат. 1974. 366 с.

3. Аширов А. Іонообмінне очищення стічних вод, розчинів і газів.-Л .: Хімія. 1983.295 с.

4. Єгоров Є.В., Макарова С.Б. Іонний обмін в радіохімії.- М .: Атомиздат. 1971.406 с.

5. Брек Д. Цеолітові молекулярні сита.- М.: Мир. 1976. 781 с.

6. Roddy J.W. A survey: utilization of zeolites for the removal of radioactivity from liquid waste streams.-Oakridge national laboratory. Oakridge, Tennessee. 1981. 20 p.

7. Челіщев Н.Ф. Іонообмінні властивості мінералів.- М .: Наука. 1 973. 203 с. 8. Зайцев Б.А., Хубецов С.Б, Корчагін Ю.П. та ін. "Очищення дебалансних вод АЕС від радіонуклідів цезію та стронцію за допомогою неорганічних сорбентів ", рег. № 80066906.-М .: 1 981. 39с.

9. Чернавський Н.Б. Сорбція стронцію на клиноптилоліті і гейландиті. // Радіохімія. 1985.Т.25, № 5. С. 37-40.

10. Howden M.J., Mouldimg T.L.J. Progress in the reduction of liquid radioactive dischargers from sellafilld. //Proceedings of Int. conf. Recod'87. Paris. 1987. V. 2. P. 1045-1054.

11. П.Тарасевіч Ю.І. Природні сорбенти в процесах очищення води. Київ: Наукова думка. 1981. 206 с.

12. Іоніти в хімічній технології. / Під ред. Нікольського Б.П., Романкова П.Г.- Л .: Хімія. 1982. 416с

13. Моїсеєв В.Є., Кузьміна Р.В., Єгоров Ю.В. Вплив умов синтезу на іонообмінні властивості фосфату цирконію. // Тез. доп. другий Всесоюзної конференції «Неорганіческіе іонообмінні матеріали», Л., 25-27 листопада, 1980.-Л. 1980. С. 83.

14. Сухарєв Ю.І., Єгоров Ю.В. Неорганічні іоніти типу фосфату цирконію.- М .: Вища школа. 1983. 110 с.

15. Амфлетт Ч. Неорганічні іоніти.- М .: Мир. 1966. 188 с.

16. Pekarek V., Vesely V. Synthetic inorganic ion exchangers // Talanta. 1972. V. 19. №11. p. 1245-1288.

17. Бальчугов А. А., Неудачина Л.К. Про шляхи поліпшення гідродинамічних властивостей солей гетерополікислот. // Тез. доп. Другої Всесоюзної конференції «Неорганічні іонообмінні матеріали», Л., 25-27 листопада. 1980.-Л. 1980. С. 117-118.

18. Тананаєв І.В., Сейфер Г.Б., Харитонов Ю.Я. Хімія ферроціанідов.- М .: Наука. 1971. 320 с.

19. Зільберман М.В., Вольхін В.В. Структура змішаного фероціаніда міді і відповідних йому продуктів молекулярної сорбції. // Журнал структурної хімії. 1971. Т. 12. С. 649-652.

20. Вольхін В.В. Сорбційні властивості фероціанідів двовалентних перехідних металів. // Известия АН СРСР. Серія "Неорганічні матеріали". 1979. Т. 15. № 6. С. 1086-1091.

21. Вольхін В.В., Зільберман М.В., Колесова С.А., Шульга О.О. Загальна характеристика сорбційних властивостей фероціанідів двовалентних перехідних металів. // Журнал прикладної хімії. 1975. Т. 48. С. 54-59.

22. Карпова І.Ф., Казаков О.В. Механізм утворення фероціанідно-органічних іонітів і характер обміну на них. // Вісник ЛДУ. Серія фізика хімія. 1968. Т. 10. Вип. 2. С. 105-109.

23. Watari K., Linai K., Isawa N. Adsorption of radiocesium on cation-exchange resin. // J. Nucl. Sci. Technol. (Tokyo). 1968. V. 5. P. 809.

24. Новиков М.П. Виділення цезію-137 методом сорбції на модифікованих феро- і кобальтиціанідних іоннітах. // Дис канд. хім. наук. -М. 1988. 53 с.

25. Ремез В.П., Єгоров Ю.В. Спосіб отримання неорганічного сорбенту. // Авторське свідоцтво СРСР № 1169233. 1985р.

26. Волошенко Л.Л., Зайцев Б.А., Малініна Є.І. Технологія приготування неорганічних сорбентів шляхом нанесення сорбуючої речовини на гранульовані носії. // Хімія і технологія неорганічних сорбентів, Міжвузівський збірник наукових праць, - Перм. 1979. С. 71-75.

27. Avramenko V.A., Gluschnko V.Yu, Zheleznov V.V.,e.a. New sorbents for LWR treatment. // Int. Symp. On Water and global pollution. Seul. 1996. P. 125-129.

28. Авраменко В.А., Железнов В.В., Бурков І.С., Хохлов К.А. та ін. Переробка РРВ утилізованих АЛЛ мобільними установками на основі сорбційно-реагентних технологій. // Атомна енергія. 2002. № 4. С. 38-40.

29. Желєзнов В.В. Застосування вуглецевих волокнистих фероціанідних сорбентів для виділення цезію з великих обсягів морської води. // Атомна енергія. 2002. Вип. 92. № 6. С. 460-466.

30. Малініна Є.І., Корчагін Ю.П., Грівкова А.І. та ін. Отримання і властивості фероціаніда нікелю, нанесеного на силікагель. // Хімія і технологія неорганічних сорбентов.- Перм. 1985. С. 18.

31. Корчагін Ю.П. Дослідження і застосування селективних неорганічних сорбентів для вдосконалення систем переробки рідких радіоактивних відходів АЕС. // Автореферат дис ... канд. техн. наук.-М. 1999. С. 24.

32. Козлова Г.А., Вольхін В.В., Зільберман М.В. Отримання і властивості композиційних сорбентів, що включають фероціаніди перехідних металів і силікагель. // Хімія і технологія неорганічних сорбентів. Міжвузівський збірник наукових праць Пермь: Видавництво ПЛІ. 1979. С. 95-97.

33. Вольхін В.В., Калюжний А.В., Зільберман М.В. і ін. Силікагель - фероціанідні електроноіонообмінники для сорбції цезію, рубідію і талію. // Хімія і технологія неорганічних сорбентів. Міжвузівський збірник наукових праць Пермь: Видавництво ПЛІ. 1980. С. 57-62.

34. Baran V., Caletka R., Tympl M., Urbanek V. Application of sol-gel method for preparation of some inorganic ion-exchangers in spherical form. // J. Radioanal. Chem. 1975. V. 24. № 2. C 156-160

35. Шаригін Л.М., Гончар В.Ф., Моїсеєв В.Є. Золь-гель метод отримання неорганічних сорбентів на основі гідроксидів титану, цирконію і олова. // Збірник: Іонний обмін і іонометрія.- Л .: ЛДУ. 1986. Вип. 5. С. 9-29.

36. Шаригін Л.М., Моїсеєв В.Е, Кузьміна Р.В. та ін. Вплив умов синтезу сферичного гексаціаноферату цирконію і його властивості. // Радіохімія. 1986. Т. 28, № 3. С. 361-367.

37. Моїсеєв В.Є., Шаригін Л.М., Єгоров Ю.В., Кузьміна Р.В., Пишкін В.П., Галкін В.М. Синтез та сорбційні властивості сферичного гексаціаноферату (II) цирконію. // Хімія твердого тіла. Міжвузівський сборнік.- Свердловськ .: вид. УПІім. С.М. Кірова. 1985. С. 124-128.

38. Шаригін Л.М., Моісеєв В.Е, Галкін В.М. Очищення низькоактивних стічних вод АЕС від радіонуклідів гранульованими сорбентами на основі фосфату і фероцианіду цирконію. // Радіохімія. 1984. Т. 26, № 5. С. 611-616.

39. Шаригін Л.М., Муромський А.Ю., Моісеєв В.Е і ін. Сорбційне очищення рідких радіоактивних відходів АЕС. // Атомна енергія. 1997. Т. 83, №1.С. 17-23.

40. Lehto J., Harjula R. Separation and solidification of radioactive cesium from nuclear waste solutions with potassium cobalt hexacyanoferrate (2) ion exchanger. // IAEAtecdoc-675. IAEA. November 1992. P. 85-106, 131-145.

41. Рябчиков Б.Є. Очищення рідких радіоактивних відходів. Москва: Делі принт. 2008. 516 с.

42. Дмитрієв С.А., Ліфанов Ф.А., Савкін А.Е., Лащенов СМ. (МосНПО «Радон»). Поводження з кубовими залишками АЕС. // Атомна енергія. 2000. Т. 89, № 5. С. 365-372.

43. Шаригін Л.М., Муромський А.Ю. (ПНФ «Термоксід»). Новий неорганічний сорбент для іоноселективного очищення рідких радіоактивних відходів. // Атомна енергія. 2000. Т. 89, № 2. С. 146-150.

44. Шаригін Л.М., Муромський А.Ю. Калягіна М.Л., Боровков С.І. (ГШФ «Термоксід»), Гостьков В.В., Качан П.П. (Смоленська АЕС). Осаджувально-сорбційна технологія очищення регенераційних розчинів фільтрів

конденсатоочищення Смоленської АЕС. // Атомна енергія. 2003. Т. 95, № 1. С. 25-31.

45. Шаригін Л.М., Муромський А.Ю. Моїсеєв В.Є., Третьяков Д.С. (ПНФ «Термоксід»), Кухарев Н.Д., Солдатов М.М., Горбатенко СП. (Калінінська АЕС). Глибоке очищення конденсатів випарних апаратів АЕС від радіонуклідів селективним неорганічним сорбентом. // Атомна енергія. 1996. Т. 80, № 1.С. 478-480.

46. Шаригін Л.М., Муромський А.Ю. Моїсеєв В.Є. (ПНФ «Термоксід»), Цех А.Р. (Белоярська АЕС), Вавер А.В. (Південно-Українська АЕС) Сорбційне очищення рідких радіоактивних відходів АЕС. // Атомна енергія. 1997. Т. 83, №1.С. 17-23.

47. Авраменко В.А., Бурков І.С., Желєзнов В.В., Хохлов К.А., (Ін-т хімії ДВО РАН), Лисенко Н.І. (ФГУП «ДальРАО») // Атомна енергія. 2002. Т. 92. № 6. С. 456-459.

48. Руднєв Н.А., Малофєєва Г.І. Застосування співосадження для концентрування. // В кн .: Праці комісії з аналітичної хімії.-М. 1965. Вип. 25. С. 234.

49. Єгоров Ю.В. Статика сорбції мікрокомпонентів оксигідратами.- М .: АІ. 1975. 197 с.

50. Хімія довгоживучих осколкових елементів. // Під ред. А.В. Ніколаєва.- М .: Атомиздат. 1970. С. 56-58.

51. Плющев В.Є., Степін Б.Д. Аналітична хімія рубідію і цезію. - М .: Наука. 1975. С. 75-85.

52. Мілютін В.В., Геліс В.М., Кліндухов В.Г., обручик А.В. Дослідження співосадження мікрокількостей Cs з фероціанідами різних металів // Радіохімія. 2004. Т. 46, № 5. С. 444-445.

53. Дитнерський Ю.І. Зворотній осмос та ультрафільтрація. - М .: Хімія. 1978. 352 с.

54. Мулдер М. Введення в мембранну технологію. - М. 1999. С. 70.

55. Особливості кінетики сорбції кобальту-60 та марганцю-54 природними та модифікованими сорбентами з багатокомпонентних розчинів / К. К. Ярошенко, Є. В. Бортнік, С. В. Кузенко, І. Л. Колябіна, Г. М. Бондаренко // Збірник наукових праць Інституту геохімії навколишнього середовища. - 2016. - Вип. 25. - С. 64-73.

56. Трусов Л.І. Нові мембрани TRUMEM і RUSMEM, засновані на гнучкій кераміці. // Критичні технології. Серія Мембрани. 2001. № 9. С. 20-27.

57. Розрахунок струменевих апаратів: Навчальний посібник / В.JI. Софронов, І.Ю. Русаков, Т.В. Ощепкова. - Сіверськ: Изд-во СТІ НІЯУ МІФІ, 2011.-33с.

Додаток А

$k := 1.4$
$R := 287$
$P1 := 4 \cdot 10^5$
$P2 := 1.0197 \cdot 10^5$
$T1 := 278$
$T2 := 283$
$G1 := 0.23$
$G2 := 0.05$

$$P_0 := \frac{P1}{P2} = 3.923$$
$$T_0 := \frac{T2}{T1} = 1.018$$
$$n := \frac{G2}{G1} = 0.217$$

Расчет эжектора - критический режим
Правила итераций

$\Delta\lambda := 0.1$
$i := 1, 2 .. 10$
$\lambda 2_0 := 1$
$\lambda 2(i) := \lambda 2_0 - i \cdot \Delta\lambda$

Газодинамічні функції

$$q2(\lambda 2) := \left(\frac{k+1}{2}\right)^{\frac{1}{k-1}} \cdot \lambda 2 \cdot \left(1 - \frac{k-1}{k+1} \cdot (\lambda 2)^2\right)^{\frac{1}{k-1}}$$

$$z2(\lambda 2) := \lambda 2 + \frac{1}{\lambda 2}$$

Перша ітерація

$\lambda 2 := \lambda 2(1) = 0.9$
$q2(\lambda 2) = 0.988$
$z2(\lambda 2) = 2.011$

$$\alpha := \frac{q2(\lambda 2)}{n \cdot P_0 \cdot \sqrt{T_0}} = 1.148$$

$$q1\lambda`_1 := \frac{\alpha}{1+\alpha-q2(\lambda2)} = 0.99$$

$$z1\lambda`_1 := q2(\lambda2)\cdot\frac{(z2(\lambda2)-2)}{\alpha\cdot P_0}+2 = 2.002$$

$$\lambda`1 := \frac{z1\lambda`_1}{2}+\sqrt{\left(\frac{z1\lambda`_1}{2}\right)^2-1} = 1.051$$

$$q2(\lambda`1) = 0.997$$

$$q2(\lambda`1)-q1\lambda`_1 = 0.007$$

Вторая итерация

$$\Delta\lambda := 0.1$$

$$i := 1,2..10$$

$$\lambda2_0 := 1$$

$$\lambda2(i) := \lambda2_0 - i\cdot\Delta\lambda$$

$$\lambda2 := \lambda2(2) = 0.8$$

$$z2(\lambda2) = 2.05$$

$$q2(\lambda2) = 0.952$$

$$\alpha := \frac{q2(\lambda2)}{n\cdot P_0\cdot\sqrt{T_0}} = 1.106$$

$$q1\lambda`_1 := \frac{\alpha}{1+\alpha-q2(\lambda2)} = 0.958$$

$$\lambda`1 := \frac{z1\lambda`_1}{2}+\sqrt{\left(\frac{z1\lambda`_1}{2}\right)^2-1} = 1.051$$

$$z1\lambda`_1 := q2(\lambda2)\cdot\frac{(z2(\lambda2)-2)}{\alpha\cdot P_0}+2 = 2.011$$

$$q2(\lambda`1) = 0.997$$

$$q2(\lambda`1)-q1\lambda`_1 = 0.039$$

Третя ітерація

$\Delta\lambda := 0.1$

$i := 1, 2 .. 10$

$\lambda 2_0 := 1$

$\lambda 2(i) := \lambda 2_0 - i \cdot \Delta\lambda$

$\lambda 2 := \lambda 2(3) = 0.7$

$z2(\lambda 2) = 2.129$

$q2(\lambda 2) = 0.892$

$$\alpha := \frac{q2(\lambda 2)}{n \cdot P_0 \cdot \sqrt{T_0}} = 1.037$$

$$q1\lambda`_1 := \frac{\alpha}{1 + \alpha - q2(\lambda 2)} = 0.906$$

$$z1\lambda`_1 := q2(\lambda 2) \cdot \frac{(z2(\lambda 2) - 2)}{\alpha \cdot P_0} + 2 = 2.028$$

$$\lambda`1 := \frac{z1\lambda`_1}{2} + \sqrt{\left(\frac{z1\lambda`_1}{2}\right)^2 - 1} = 1.183$$

$q2(\lambda`1) = 0.961$

$$q2(\lambda`1) - q1\lambda`_1 = 0.055$$

Четверта ітерація

$$\Delta\lambda := 0.1$$
$$i := 1,2..10$$
$$\lambda 2_0 := 1$$

$$\lambda 2(i) := \lambda 2_0 - i \cdot \Delta\lambda$$

$$\lambda 2 := \lambda 2(4) = 0.6$$

$$z2(\lambda 2) = 2.267$$

$$q2(\lambda 2) = 0.811$$

$$\alpha := \frac{q2(\lambda 2)}{n \cdot P_0 \cdot \sqrt{T_0}} = 0.942$$

$$q1\lambda`_1 := \frac{\alpha}{1 + \alpha - q2(\lambda 2)} = 0.833$$

$$z1\lambda`_1 := q2(\lambda 2) \cdot \frac{(z2(\lambda 2) - 2)}{\alpha \cdot P_0} + 2 = 2.058$$

$$\lambda`1 := \frac{z1\lambda`_1}{2} + \sqrt{\left(\frac{z1\lambda`_1}{2}\right)^2 - 1} = 1.273$$

$$q2(\lambda`1) = 0.914$$

$$q2(\lambda`1) - q1\lambda`_1 = 0.081$$

Пята ітерація

$$\Delta\lambda := 0.1$$
$$i := 1,2..10$$
$$\lambda 2_0 := 1$$

$$\lambda 2(i) := \lambda 2_0 - i \cdot \Delta\lambda$$

$$\lambda 2 := \lambda 2(5) = 0.5$$

$$z2(\lambda 2) = 2.5$$

$$q2(\lambda 2)=0.709$$

$$\alpha := \frac{q2(\lambda 2)}{n \cdot P_0 \cdot \sqrt{T_0}} = 0.824$$

$$q1\lambda`_1 := \frac{\alpha}{1+\alpha-q2(\lambda 2)} = 0.739$$

$$z1\lambda`_1 := q2(\lambda 2) \cdot \frac{(z2(\lambda 2)-2)}{\alpha \cdot P_0} + 2 = 2.11$$

$$\lambda`1 := \frac{z1\lambda`_1}{2} + \sqrt{\left(\frac{z1\lambda`_1}{2}\right)^2 - 1} = 1.391$$

$$q2(\lambda`1)=0.829$$

$$q2(\lambda`1) - q1\lambda`_1 = 0.09$$

Шоста ітерація

$$\Delta\lambda := 0.1$$
$$i := 1,2..10$$
$$\lambda 2_0 := 1$$

$$\lambda 2(i) := \lambda 2_0 - i \cdot \Delta\lambda$$

$$\lambda 2 := \lambda 2(6) = 0.4$$

$$z2(\lambda 2)=2.9$$

$$q2(\lambda 2)=0.59$$

$$\alpha := \frac{q2(\lambda 2)}{n \cdot P_0 \cdot \sqrt{T_0}} = 0.685$$

$$q1\lambda`_1 := \frac{\alpha}{1+\alpha-q2(\lambda 2)} = 0.626$$

$$z1\lambda`_1 := q2(\lambda 2) \cdot \frac{(z2(\lambda 2)-2)}{\alpha \cdot P_0} + 2 = 2.197$$

$$\lambda`1 := \frac{z1\lambda`_1}{2} + \sqrt{\left(\frac{z1\lambda`_1}{2}\right)^2 - 1} = 1.554$$

$$q2(\lambda`1) = 0.677$$

$$q2(\lambda`1) - q1\lambda`_1 = 0.051$$

Сьома ітерація

$$\Delta\lambda := 0.1$$

$$i := 1, 2..10$$

$$\lambda2_0 := 1$$

$$\lambda2(i) := \lambda2_0 - i \cdot \Delta\lambda$$

$$\lambda2 := \lambda2(7) = 0.3$$

$$z2(\lambda2) = 3.633$$

$$q2(\lambda2) = 0.456$$

$$\alpha := \frac{q2(\lambda2)}{n \cdot P_0 \cdot \sqrt{T_0}} = 0.53$$

$$q1\lambda`_1 := \frac{\alpha}{1 + \alpha - q2(\lambda2)} = 0.493$$

$$z1\lambda`_1 := q2(\lambda2) \cdot \frac{(z2(\lambda2) - 2)}{\alpha \cdot P_0} + 2 = 2.358$$

$$\lambda`1 := \frac{z1\lambda`_1}{2} + \sqrt{\left(\frac{z1\lambda`_1}{2}\right)^2 - 1} = 1.804$$

$$q2(\lambda`1) = 0.403$$

$$q2(\lambda`1) - q1\lambda`_1 = -0.09$$

N	λ_2	$q2(\lambda`1)$	$q1\lambda`_1$	$\Delta q(\lambda`1)$
1	0.9	0	0	0
2	0.8			
3	0.7			
4	0.6			
5	0.5			
6	0.4	0.677	0.626	0.051
7	0.3	0.403	0.493	−0.09

$$\lambda 2 := \frac{(0.3 \cdot 0.051 + 0.4 \cdot 0.09)}{0.051 + 0.09} = 0.364$$

Знаходимо газодинамічні функції

$$q2(\lambda 2) = 0.543$$

$$z2(\lambda 2) = 3.112$$

$$\alpha := \frac{q2(\lambda 2)}{n \cdot P_0 \cdot \sqrt{T_0}} = 0.631$$

$$z\lambda`_1 := \frac{q2(\lambda 2) \cdot (z2(\lambda 2) - 2)}{\alpha \cdot P_0} + 2 = 2.244$$

$$\lambda`1 := \frac{z\lambda`_1}{2} + \sqrt{\left(\frac{z\lambda`_1}{2}\right)^2 - 1} = 1.631$$

$$q\lambda`_1 := \frac{\alpha}{1 + \alpha - q2(\lambda 2)} = 0.58$$

$$\lambda 1 := 1$$

$$z\lambda 1 := 2$$

$$z2(\lambda 2) = 3.112$$

$$z\lambda_3 := \frac{z\lambda 1 + n \cdot \sqrt{T_0} \cdot z2(\lambda 2)}{\sqrt{(n+1) \cdot (n \cdot T_0 + 1)}} = 2.2$$

$$\lambda_3 := \frac{z\lambda_3}{2} - \sqrt{\left(\frac{z\lambda_3}{2}\right)^2 - 1} = 0.642$$

$$q\lambda_3 := \left(\frac{k+1}{2}\right)^{\frac{1}{k-1}} \cdot \lambda_3 \cdot \left(1 - \frac{k-1}{k+1} \cdot \lambda_3^{\,2}\right)^{\frac{1}{k-1}} = 0.847$$

Для визначення значень температур тормозіння в характерних перерызах ежектора скористуємось наступними рівняннями:

$$T`_1 := T1 = 278$$

$$T2 = 283$$

$$T`_3 := T`_1 \cdot \left(\frac{n \cdot T_0 + 1}{n+1}\right) = 278.893$$

$$T`4 := T`_3 = 278.893$$

$$Th := T2$$

Для визначення значень температур тормозіння в характерних перерызах ежектора скористуємось наступними рівняннями:

$\sigma\partial := 0.98$ $\sigma c := 0.985$ $\sigma вх := 0.99$ втрати

$$Ph := \frac{P2}{\sigma вх} = 1.03 \cdot 10^5$$

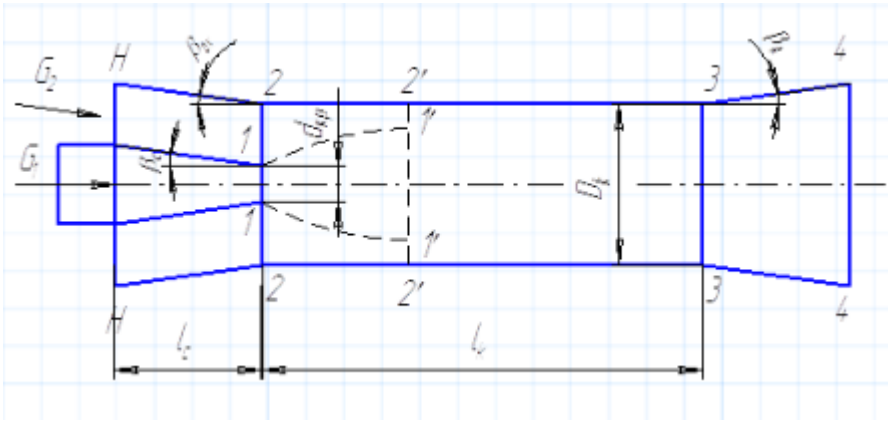
$$P3 := \frac{\alpha \cdot P1 + P2}{1+\alpha} = 2.173 \cdot 10^5$$ приближено

$$P3 := P1 \cdot \frac{\sqrt{(n+1)\,(n \cdot T_0 + 1)}}{1 + \frac{1}{\alpha}} \cdot \frac{1}{q\lambda_3} = 2.226 \cdot 10^5$$ точніше

$$P4 := P3 \cdot \sigma\partial = 2.182 \cdot 10^5$$

$$P0 := \frac{P1}{\sigma c} = 4.061 \cdot 10^5$$

Определение расхода газа и размеров сечений сопла и камеры



Швидкість потоку на вихооді із сопла (переріз 1)

$$W_1 := \sqrt{\frac{2 \cdot k}{k+1} \cdot R \cdot T1} = 305.096 \qquad \frac{м}{c}$$

$$m := \sqrt{\frac{k}{R} \cdot \left(\frac{2}{k+1}\right)^{\frac{k+1}{k-1}}} = 0.04 \qquad \left(\frac{c \cdot K^{\frac{1}{2}}}{м}\right)$$

$$q\lambda 1 := 1$$

$$F1 := \frac{G1 \cdot \sqrt{T1}}{m \cdot q\lambda 1 \cdot P1} = 2.372 \cdot 10^{-4}$$ м Площа перерізу 1 ежектуючого газу

$$dkp := \sqrt{\frac{4}{3.14} \cdot F1} = 0.017$$ м Критичний дыаметр сопла

$$Dk := \sqrt{\frac{4\ F1 \cdot \left(1 + \frac{1}{\alpha}\right)}{3.14}} = 0.028$$ м Діаметр камери змішування

$$lk := 4 \cdot Dk = 0.112$$ м Довжина камери змішування

$$lc := \frac{lk}{4} = 0.028$$ м Довжина дифузора

$F3 := \frac{3.14\ Dk^2}{4} = 6.132 \cdot 10^{-4}$ $м^2$ Площа перерізу 3

Знаходимо геометричні параметри перерізу 0 і Н

$lвх := lc = 0.028$ м

$\beta вх := 35$ Градуси

$\beta вх := \beta вх \cdot \frac{\pi}{180} = 0.611$ Радіани

$\beta д := 15$ Градуси

$\beta д := \beta д \cdot \frac{\pi}{180} = 0.262$ Радіани

$D_0 := dkp + 2 \cdot lвх \cdot \tan(\beta вх) = 0.057$ м

$F_0 := \frac{3.14\ D_0^{\ 2}}{4} = 0.003$ м

$Dh := Dk + 2\ lвх \cdot \tan(\beta вх) = 0.067$ м

$Fh := \frac{\pi \cdot Dh^2}{4} = 0.004$ $м^2$

Визначаємо статичні тиски в характерних перерізах

Витрата газу через переріз 3

$G3 := m \cdot F3 \cdot q\lambda_3 \cdot \frac{P3}{\sqrt{T1}} = 0.28$ $\left(\frac{кг}{с}\right)$

$G4 := G3 = 0.28$ $\left(\frac{кг}{с}\right)$

Для знаходження F4 задаємо ГДФ $\lambda_4 \le \lambda_3$

$\lambda_3 = 0.642$ то $\lambda_4 := 0.5$

$$q\lambda_4 := \left(\frac{k+1}{2}\right)^{\frac{1}{k-1}} \cdot \lambda_4 \cdot \left(1 - \frac{k-1}{k+1} \cdot \lambda_4^{\,2}\right)^{\frac{1}{k-1}} = 0.709$$

Звідси знаходимо F4

$$F4 := F3 \cdot \frac{q\lambda_3}{q\lambda_4} = 7.328 \cdot 10^{-4} \qquad м^2$$

$$D_4 := \sqrt{\frac{4 \cdot F4}{\pi}} = 0.031 \qquad м$$

Знаходимо довжину дифузора

$$l\partial := \frac{D_4 - Dk}{2 \cdot \tan(\beta\partial)} = 0.005 \qquad м$$

По рівнянням нерозривності знаходимо ГДФ в перерізах 0 і Н

$$Gh := G2 = 0.05$$

$$G0 := G1 = 0.23$$

$$q\lambda_0 := \frac{G2}{m \cdot F_0 \cdot \frac{P0}{\sqrt{T1}}} = 0.02$$

$$q\lambda h := \frac{G2}{m \cdot Fh \cdot \frac{Ph}{\sqrt{T1}}} = 0.057$$

В результаты розрахунків методом ітерацій потрібно отримати λ_0 і λh

Знаходимо ГДФ $\pi(\lambda)$

$$\pi(\lambda) := \left(1 - \frac{k-1}{k+1} \cdot \lambda^2\right)^{\frac{1}{k-1}}$$

По знайденим $\pi(\lambda)$ знайдемо статичний тиск перерізу

$$P`(P) := P \cdot \pi$$

$\lambda 1 = 1$ $P1 = 4 \cdot 10^5$ $P0 = 4.061 \cdot 10^5$

$\pi(\lambda 1) = 0.634$

$P`1 := P1 \cdot \pi(\lambda 1) = 2.536 \cdot 10^5$ Статичний тиск

$\lambda 2 = 0.364$ $P2 = 1.02 \cdot 10^5$ $Ph = 1.03 \cdot 10^5$

$\pi(\lambda 2) = 0.946$

$P`2 := P2 \cdot \pi(\lambda 1) = 6.464 \cdot 10^4$ Статичний тиск

$\lambda_3 = 0.642$ $P3 = 2.226 \cdot 10^5$

$\pi(\lambda_3) = 0.837$

$P`3 := P3 \cdot \pi(\lambda 1) = 1.411 \cdot 10^5$ Статичний тиск

$\lambda_4 = 0.5$ $P4 = 2.182 \cdot 10^5$ $Ph = 1.03 \cdot 10^5$

$\pi(\lambda_4) = 0.899$

$P`4 := P4 \cdot \pi(\lambda 1) = 1.383 \cdot 10^5$ Статичний тиск

Задамося значеннями статичного тиску і тиску тормозіння, при яких відповідні графіки для різних потоків сходяться. Для статичного тиску $P`рав := 1.41 \cdot 10^5$, для тиску тормозіння $Pрав := 2.226 \cdot 10^5$

Значення тиску на графіку будуть відкладатися в залежності від положення перерізу. За початок координат приймемо перерізи на вході в ежектор, т.б. 0 і Н. Тоді:

$lh := 0$

$l_0 := lh = 0$

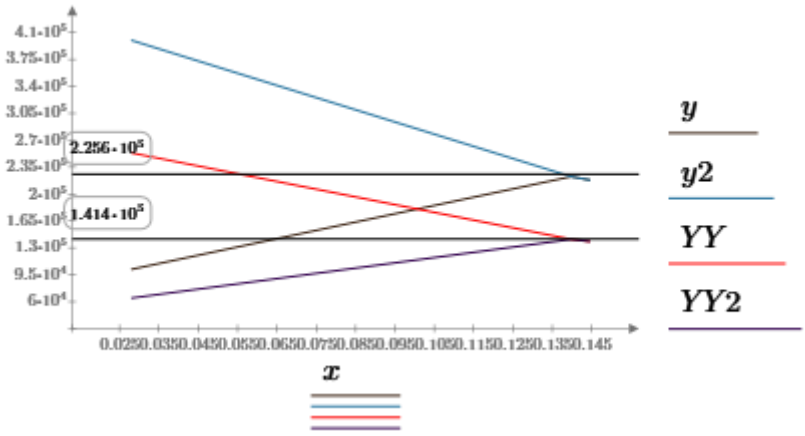
$l1.2 := lвх = 0.028$

$lPAB := lвх + 1.5 \cdot Dk = 0.07$

$$l_3 := lвх + lk = 0.14$$

$$l_4 := lвх + lk + l\partial = 0.145$$

x	$y2$	y	YY	$YY2$
$l1.2$	$P1$	$P2$	$P`1$	$P`2$
l_3	$P3$	$P3$	$P`3$	$P`3$
l_4	$P4$	$P4$	$P`4$	$P`4$



Розрахунок першого докритичного режиму

Для розрахунку ежектора на докритичному режимі використовуються ті же рівняння, що і при розрахунку критичного режиму. Визначення невідомого α, ГДФ і Р3 Р4 на докритичних режимах відбувається в наступному порядку:

а) вибираємо довільне $\lambda 2$ із інтервалу (0, $\lambda 2кр$)

$\lambda 2 = 0.364$ критичне

$\lambda 2 := 0.2$ приймаємо

б) розраховуємо ГДФ z($\lambda 2$) і q($\lambda 2$) по формулах

$$q2\lambda2 := \left(\frac{k+1}{2}\right)^{\frac{1}{k-1}} \cdot \lambda_2 \cdot \left(1 - \frac{k-1}{k+1} \cdot \left(\lambda_2\right)^2\right)^{\frac{1}{k-1}}$$

$$q2(\lambda2) = 0.31$$

$$z2(\lambda2) := \lambda2 + \frac{1}{\lambda2}$$

$$z2(\lambda2) = 5.2$$

Проводимо розрахунок відносно геометрії α

$$D`1 := 0.028$$

$$D`3 := 0.042$$

$$F`1 := 3.142 \cdot \frac{D`1^2}{4} = 6.158 \cdot 10^{-4}$$

$$F`3 := 3.142 \cdot \frac{D`3^2}{4} = 0.001$$

$$F`2 := F`3 - F`1 = 7.698 \cdot 10^{-4} \qquad D`2 := \sqrt{\frac{4 \cdot F`2}{3.142}} = 0.031$$

$$\alpha` := \frac{F`1}{F`3 - F`1} = 0.8$$

$$n := \frac{q2(\lambda2)}{\alpha` \cdot P_0 \cdot \sqrt{T_0}} = 0.098$$

$$z\lambda_3 := \frac{z\lambda1 + n \cdot \sqrt{T_0} \cdot z2(\lambda2)}{\sqrt{(n+1) \cdot \left(n \cdot T_0 + 1\right)}} = 2.288 \qquad z\lambda1 = 2$$

$$\lambda_3 := \frac{z\lambda_3}{2} - \sqrt{\left(\frac{z\lambda_3}{2}\right)^2 - 1} = 0.588$$

$$q\lambda_3 := \left(\frac{k+1}{2}\right)^{\frac{1}{k-1}} \cdot \lambda_3 \cdot \left(1 - \frac{k-1}{k+1} \cdot \lambda_3^{\,2}\right)^{\frac{1}{k-1}} = 0.8$$

$$\lambda1 = 1$$

$$q\lambda1 := 1$$

$$\sqrt{(n+1)\ (n \cdot T_0 + 1)}$$

$\sigma\partial = 0.98$

$P4 := P3 \cdot \sigma\partial = 2.083 \cdot 10^5$

$\frac{P4}{P2} = 2.043$

Для знаходження F4 задаємось ГДФ $\lambda 3 \le \lambda 3$ $\lambda_4 := 0.3$

$$q\lambda_4 := \left(\frac{k+1}{2}\right)^{\frac{1}{k-1}} \cdot \lambda_4 \cdot \left(1 - \frac{k-1}{k+1} \cdot \lambda_4^{\,2}\right)^{\frac{1}{k-1}} = 0.456$$

звідси

$$F4 := F`3 \cdot \frac{q\lambda_3}{q\lambda_4} = 0.002$$

$$D_4 := \sqrt{\frac{4 \cdot F4}{3.142}} = 0.056$$

$$l\partial := \frac{D_4 - Dk}{2 \cdot \tan(\beta\partial)} = 0.052$$ Довжина дифузора

Знаходимо ГДФ $\pi(\lambda)$:

$$\pi(\lambda) := \left(1 - \frac{k-1}{k+1} \cdot \lambda^2\right)^{\frac{1}{k-1}}$$

По знайденим $\pi(\lambda)$ знаходимо статичний тиск в перерізі

$$P`(P) := P \cdot \pi$$

$\lambda_3 = 0.588$ $P3 = 2.125 \cdot 10^5$

$\pi(\lambda_3) = 0.862$

$P`3 := P3 \cdot \pi(\lambda 1) = 1.347 \cdot 10^5$ статичний тиск

$\lambda_4 = 0.3$ $P4 = 2.083 \cdot 10^5$

$\pi(\lambda_4) = 0.963$

$P`4 := P4 \cdot \pi(\lambda 1) = 1.32 \cdot 10^5$ статичний тиск

$l_3 := lвх + lk = 0.14$

$l_4 := lвх + lk + l\partial = 0.191$

Розрахунок на режимі запирання

На режимі запирання при достатньо великому P1зп, внаслідок збільшення швидкості $\lambda 1`$ і зменшення площі F2` надзвукової струї газу ця струя "запирається". При цьому G2, $\lambda 2$, n рівні нулю і на виході з ежектору G3=G1, тобто в ежекторі тиче лише ежектуючий газ G1. Характеристика $\frac{P4зп}{P2}$ для режиму запирання визначається в наступній послідовності:

а)

$\alpha = 0.631$

$$q(\lambda 1`зп) := \left(\frac{k+1}{2}\right)^{\frac{1}{k-1}} \cdot \lambda 1`зп \cdot \left(1 - \frac{k-1}{k+1} \cdot \lambda 1`зп^2\right)^{\frac{1}{k-1}}$$

$$q(\lambda 1`зп) := \frac{\alpha}{\alpha + 1} = 0.387$$

$$f(\lambda 1`зп) := \left(\frac{k+1}{2}\right)^{\frac{1}{k-1}} \cdot \lambda 1`зп \cdot \left(1 - \frac{k-1}{k+1} \cdot \lambda 1`зп^2\right)^{\frac{1}{k-1}} - q(\lambda 1`зп)$$

$\mathbf{root}(f(\lambda 0), \lambda 0, 1, 2) = 1.819$

$\lambda 1`зп := \mathbf{root}(f(\lambda 0), \lambda 0, 1, 2)$

$\lambda 1`зп = 1.819$

б)

$$z(\lambda 1`зп) := \lambda 1`зп + \frac{1}{\lambda 1`зп}$$

$z(\lambda 1`зп) = 2.369$

$$\frac{P1}{P2}=3.923$$

$$\frac{P1зп}{P2}=Позп$$

$$Позп:=\left(\frac{k+1}{2}\right)^{\frac{1}{k-1}}\cdot\frac{1}{\alpha}\cdot\frac{1}{\left(z\left(\lambda 1`зп\right)-2\right)}=6.783$$

в)

$$\sigma k:=\frac{P3}{P4}=1.02 \qquad \frac{P4}{P2}=2.043$$

$$\frac{P4зп}{P2}=\frac{P1зп}{P2}\cdot\sigma k\cdot\sigma д=Позп\cdot\sigma k\cdot\sigma д$$

$$Позп\cdot\sigma k\cdot\sigma д=6.783$$

Додаток Б

HTML

Index.html

```
<!DOCTYPE html>
<html>
<head>
   <meta charset="UTF-8">
   <title>Main</title>
   <link rel="stylesheet" href="https://maxcdn.bootstrapcdn.com/bootstrap/4.0.0-alpha.5/css/bootstrap.min.css" integrity="sha384-AysaV+vQoT3kOAXZkl02PThvDr8HYKPZhNT5h/CXfBThSRXQ6jW5DO2ekP5ViFdi" crossorigin="anonymous">
   <link rel="stylesheet" href="css/style.css">
   <link rel="stylesheet" href="css/font-awesome.min.css">
</head>
<body>
  <header>
      <nav class="navbar navbar-light bg-faded">
        <ul class="nav navbar-nav">
          <li class="nav-item active">
              <a class="nav-link" href="index.html">Головна<span class="sr-only">(current)</span></a>
          </li>
          <li class="nav-item dropdown">
              <a class="nav-link dropdown-toggle" href="http://example.com" id="navbarDropdownMenuLink" data-toggle="dropdown" aria-haspopup="true" aria-expanded="false">
              Зміст роботи
              </a>
            <div class="dropdown-menu " aria-labelledby="navbarDropdownMenuLink">
              <a class="dropdown-item" href="javascript:PopUpShow()">Актуальність теми</a>
              <a class="dropdown-item" href="javascript:PopUpShow1()">Мета дослідження</a>
              <a class="dropdown-item" href="javascript:PopUpShow2()">Об'єкт дослідження</a>
               <a class="dropdown-item" href="javascript:PopUpShow3()">Завдання дослідження</a>
            </div>
          </li>
          <li class="nav-item active">
              <a class="nav-link" href="scheme.html">Технологічна схема<span class="sr-only">(current)</span></a>
          </li>
          <li class="nav-item active">
              <a class="nav-link" href="rozrahunok-scheme.html">Розрахунок технологічної схеми</a>
```

```
        </li>
        <li class="nav-item active">
            <a class="nav-link" href="rozrahunok.html">Розрахунок ежектора</a>
        </li>
      </ul>
      <a href="https://vk.com/matsibura_oleksandr"><i class="fa fa-vk fa-2x"></i></a>
      <a href="https://vk.com/matsibura_oleksandr"><i class="fa fa-facebook fa-2x"></i></a>
    </nav>
  </header>
    <div class="b-popup" id="popup1">
        <div class="b-popup-content">
            <p>Основними джерелами утворення радіоактивних відходів (РАВ) є діючі АЕС. Радіоактивні речовини утворюються під час роботи АЕС на потужності при ділені ядер U235, U233, Pi239 в активній зоні реактора, а також в результаті активації нейтронами різних матеріалів, які знаходяться в активній зоні, тобто як продукти ядерних реакцій. В середньому, в залежності від потужності і типу реакторної установки, за рік утворюється від 0,15 до 0,35 м3 рідких і від 0,1 до 0,3 м<sup>3</sup> - твердих РАВ на 1 МВт.</p>
            <p>В процесі експлуатації енергоблоків АЕС утворюється три основних види РАВ: газо аерозольні, рідкі та тверді, і головною умовою безпеки є їх знешкодження. З огляду на негативний вплив РАВ на людей і навколишнє природне середовище, потрібно впроваджувати нові технології технологічної схеми знешкодження РРВ.</p>
            <a href="javascript:PopUpHide()">Закрити</a>
        </div>
    </div>
    <div class="b-popup" id="popup2">
        <div class="b-popup-content">
            <p>Метою дослідження є: із використанням комп’ютерних експериментів дослідити процес очищення рідких радіоактивних відходів на основі іонно-селективного методу.</p>
            <p>Для вирішення поставленої задачі  потрібно обрати найбільш ефективний варіант технологічної схеми, що забезпечить найкраще очищення. Виконати розрахунки складових апаратів схеми та обрати найкращі їх параметри.</p>
            <a href="javascript:PopUpHide1()">Закрити</a>
        </div>
    </div>
    <div class="b-popup" id="popup3">
        <div class="b-popup-content">
            <p>Об'єктом дослідження є знешкодження рідких радіоактивних відходів на атомних електростанція іонно-селективним методом.</p>
            <a href="javascript:PopUpHide2()">Закрити</a>
        </div>
    </div>
    <div class="b-popup" id="popup4">
```

```
        <div class="b-popup-content">
            <p>Для реалізації поставленої мети були сформульовані наступні завдання дослідження, що визначили логіку дослідження та його структуру:</p>
            <ul>
                <li type="A">Проаналізувати експериментальні дані;</li>
                <li type="I">Розробити технологічну схему знешкодження РРВ;</li>
                <li type="i">Розрахувати апарати отриманої технологічної схеми.</li>
                <li type="1">Створити багатоваріантний продукт.</li>
            </ul>
            <a href="javascript:PopUpHide3()">Закрити</a>
        </div>
    </div>
  <h1>Комп’ютерно - інтегрована система для моделювання процесу знешкодження рідких радіоактивних відходів
</h1>
   <h2><a href ="http://www.igmof.org.ua/uk">Інститут геохімії навколишнього середовища</a></h2>
  <div class="author-name">
     <h3>Виконав: студент гр.ХА-51м</h3>
     <h3>Мацібура О.П.</h3>
     <h3>Науковий керівник:</h3>
     <h3>Бугаєва Л.М.</h3>
   </div>
                    <script src="http://code.jquery.com/jquery-2.0.2.min.js"></script>
   <script src="js/js.js"></script>
   <script src="https://ajax.googleapis.com/ajax/libs/jquery/3.1.1/jquery.min.js" integrity="sha384-3ceskX3iaEnIogmQchP8opvBy3Mi7Ce34nWjpBIwVTHfGYWQS9jwHDVRnpKKHJg7" crossorigin="anonymous"></script>
   <script  src="https://cdnjs.cloudflare.com/ajax/libs/tether/1.3.7/js/tether.min.js" integrity="sha384-XTs3FgkjiBgo8qjEjBk0tGmf3wPrWtA6coPfQDfFEY8AnYJwjalXCiosYRBIBZX8" crossorigin="anonymous">
   </script>
   <script src="https://maxcdn.bootstrapcdn.com/bootstrap/4.0.0-alpha.5/js/bootstrap.min.js" integrity="sha384-BLiI7JTZm+JWlgKa0M0kGRpJbF2J8q+qreVrKBC47e3K6BW78kGLrCkeRX6I9RoK" crossorigin="anonymous"></script>
</body>
</html>
```

Rozrahunok.html

```
<!DOCTYPE html>
<html>
<head>
   <meta charset="UTF-8">
```

```
    <title>Rozrahunok</title>

    <link rel="stylesheet" href="https://maxcdn.bootstrapcdn.com/bootstrap/4.0.0-alpha.5/css/bootstrap.min.css"
integrity="sha384-AysaV+vQoT3kOAXZkl02PThvDr8HYKPZhNT5h/CXfBThSRXQ6jW5DO2ekP5ViFdi"
crossorigin="anonymous">

    <link rel="stylesheet" href="css/style.css">

    <link rel="stylesheet" href="css/font-awesome.min.css">

</head>

<body>

   <header>

       <nav class="navbar navbar-light bg-faded">

         <ul class="nav navbar-nav">

           <li class="nav-item active">

               <a class="nav-link" href="index.html">Головна<span class="sr-only">(current)</span></a>

           </li>

           <li class="nav-item dropdown">

               <a class="nav-link dropdown-toggle" href="http://example.com" id="navbarDropdownMenuLink" data-
toggle="dropdown" aria-haspopup="true" aria-expanded="false">

               Зміст роботи

               </a>

             <div class="dropdown-menu " aria-labelledby="navbarDropdownMenuLink">

               <a class="dropdown-item" href="javascript:PopUpShow()">Актуальність теми</a>

               <a class="dropdown-item" href="javascript:PopUpShow1()">Мета дослідження</a>

               <a class="dropdown-item" href="javascript:PopUpShow2()">Об'єкт дослідження</a>

                <a class="dropdown-item" href="javascript:PopUpShow3()">Завдання дослідження</a>

             </div>

           </li>

           <li class="nav-item active">

               <a class="nav-link" href="scheme.html">Технологічна схема<span class="sr-only">(current)</span></a>

           </li>

           <li class="nav-item active">

               <a class="nav-link" href="rozrahunok-scheme.html">Розрахунок технологічної схеми</a>

           </li>

           <li class="nav-item active">

               <a class="nav-link" href="rozrahunok.html">Розрахунок ежектора</a>

           </li>

         </ul>

         <a href="https://vk.com/matsibura_oleksandr"><i class="fa fa-vk fa-2x"></i></a>

         <a href="https://vk.com/matsibura_oleksandr"><i class="fa fa-facebook fa-2x"></i></a>
```

```
    </nav>
  </header>
    <div class="b-popup" id="popup1">
      <div class="b-popup-content">
        <p>Основними джерелами утворення радіоактивних відходів (РАВ) є діючі АЕС. Радіоактивні речовини утворюються під час роботи АЕС на потужності при ділені ядер U235, U233, Pi239 в активній зоні реактора, а також в результаті активації нейтронами різних матеріалів, які знаходяться в активній зоні, тобто як продукти ядерних реакцій. В середньому, в залежності від потужності і типу реакторної установки, за рік утворюється від 0,15 до 0,35 м3 рідких і від 0,1 до 0,3 м<sup>3</sup> - твердих РАВ на 1 МВт.</p>
        <p>В процесі експлуатації енергоблоків АЕС утворюється три основних види РАВ: газо аерозольні, рідкі та тверді, і головною умовою безпеки є їх знешкодження. З огляду на негативний вплив РАВ на людей і навколишнє природне середовище, потрібно впроваджувати нові технології технологічної схеми знешкодження РРВ.</p>
        <a href="javascript:PopUpHide()">Закрити</a>
      </div>
    </div>
    <div class="b-popup" id="popup2">
      <div class="b-popup-content">
        <p>Метою дослідження є: із використанням комп’ютерних експериментів дослідити процес очищення рідких радіоактивних відходів на основі іонно-селективного методу.</p>
        <p>Для вирішення поставленої задачі  потрібно обрати найбільш ефективний варіант технологічної схеми, що забезпечить найкраще очищення. Виконати розрахунки складових апаратів схеми та обрати найкращі їх параметри.</p>
        <a href="javascript:PopUpHide1()">Закрити</a>
      </div>
    </div>
    <div class="b-popup" id="popup3">
      <div class="b-popup-content">
        <p>Об'єктом дослідження є знешкодження рідких радіоактивних відходів на атомних електростанція іонно-селективним методом.</p>
        <a href="javascript:PopUpHide2()">Закрити</a>
      </div>
    </div>
    <div class="b-popup" id="popup4">
      <div class="b-popup-content">
        <p>Для реалізації поставленої мети були сформульовані наступні завдання дослідження, що визначили логіку дослідження та його структуру:</p>
        <ul>
          <li>Проаналізувати експериментальні дані;</li>
          <li>Розробити технологічну схему знешкодження РРВ;</li>
          <li>Розрахувати апарати отриманої технологічної схеми.</li>
          <li>Створити багатоваріантний продукт.</li>
```

```
            </ul>
            <a href="javascript:PopUpHide3()">Закрити</a>
          </div>
        </div>
      <div>
      <form role="form" class="my-form">
        <div class="input-group">
          <span class="input-group-addon width_first" id="sizing-addon6">Показник адіабати</span>
          <input type="number" class="form-control " placeholder="k" aria-describedby="sizing-addon2" value = "1.4">
        </div>
        <div class="input-group my-input_ej">
          <span class="input-group-addon" id="sizing-addon7">Газова стала</span>
          <input type="number" class="form-control" placeholder="R" aria-describedby="sizing-addon2" value = "287">
        </div>
        <div class="input-group my-input_ej">
          <span class="input-group-addon" id="sizing-addon8">Тиск газу</span>
          <input type="number" class="form-control" placeholder="Па" aria-describedby="sizing-addon2" value =
"400000">
        </div>
        <div class="input-group my-input_ej">
          <span class="input-group-addon" id="sizing-addon9">Тиск рідини</span>
          <input type="number" class="form-control" placeholder="Па" aria-describedby="sizing-addon2" value =
"101970">
        </div>
        <div class="input-group my-input_ej">
          <span class="input-group-addon" id="sizing-addon10">Температура газу</span>
          <input type="number" class="form-control" placeholder="К" aria-describedby="sizing-addon2" value = "278">
        </div>
        <div class="input-group my-input_ej">
          <span class="input-group-addon" id="sizing-addon11">Температура рідини</span>
          <input type="number" class="form-control" placeholder="К" aria-describedby="sizing-addon2" value = "283">
        </div>
        <div class="input-group my-input_ej">
          <span class="input-group-addon" id="sizing-addon12">Витрати рідини</span>
          <input type="number" class="form-control" placeholder="кг/с" aria-describedby="sizing-addon2" value = "0.24">
        </div>
        <div class="input-group my-input_ej">
          <span class="input-group-addon" id="sizing-addon13">Витрати газу</span>
```

```
        <input type="number" class="form-control" placeholder="кг/с" aria-describedby="sizing-addon2" value = "0.05">
    </div>
    <div>
        <button type="button" class="btn btn-default navbar-btn">Розрахувати</button>
    </div>
</form>

<form class="results">
    <h6>Відносний тиск</h6>
    <div class="P0 my-results">
    </div>
    <h6>Відносна температура</h6>
    <div class="T0 my-results">
    </div>
    <h6>Коефіцієнт ежекції</h6>
    <div class="n my-results">
    </div>
</form>

<table id="table">
    <caption id = "caption"></caption>
    <tbody id="tbody"></tbody>
</table>

<form class="results">
    <h5>Температури тормозіння в характерних перерізах ежектора</h5>
    <div>
            <h6>T<sup>'</sup><sub>1</sub></h6>
            <div class="T1s my-results">
            </div>
            <h6>T<sub>2</sub></h6>
            <div class="T2 my-results">
            </div>
            <h6>T<sup>'</sup><sub>3</sub></h6>
            <div class="T3s my-results">
            </div>
            <h6>T<sup>'</sup><sub>4</sub></h6>
```

```
        <div class="T4s my-results">
        </div>
        <h6>T<sub>H</sub></h6>
        <div class="Th my-results">
        </div>
    </div>
</form>

<form class="results">
    <h5>Значення тисків тормозіння в характерних перерізах ежектора</h5>
    <div>
        <h6>P<sub>H</sub></h6>
        <div class="Ph my-results">
        </div>
        <h6>P<sub>2</sub></h6>
        <div class="P2 my-results">
        </div>
        <h6>P<sub>3</sub></h6>
        <div class="P3 my-results">
        </div>
        <h6>P<sub>4</sub></h6>
        <div class="P4 my-results">
        </div>
        <h6>P<sub>0</sub></h6>
        <div class="P0 my-results">
        </div>
    </div>
</form>

<form class="results">
    <h5>Значення тисків тормозіння в характерних перерізах ежектора</h5>
    <div>
        <h6>Швидкість потоку на виході із сопла м/с</h6>
        <div class="W1 my-results">
        </div>
        <h6>Площа перерізу рідини м</h6>
        <div class="F1 my-results">
```

```
            </div>
            <h6>Критичний діаметр сопла м</h6>
            <div class="dkp my-results">
            </div>
            <h6>Діаметр камери змішування м</h6>
            <div class="Dk my-results">
            </div>
        </div>
    </form>
    <form class="results">
        <h6>Довжина камери змішування м</h6>
            <div class="lk my-results">
            </div>
            <h6>Довжина дифузора м</h6>
            <div class="lc my-results">
            </div>
            <h6>Площа перерізу м<sup>2</sup></h6>
            <div class="F3 my-results">
            </div>
        <h5>Статичний тиск в перерізах</h5>
        <div>
            <h6>P<sup>'</sup><sub>1</sub></h6>
            <div class="P1s my-results">
            </div>
            <h6>P<sup>'</sup><sub>2</sub></h6>
            <div class="P2s my-results">
            </div>
            <h6>P<sup>'</sup><sub>3</sub></h6>
            <div class="P3s my-results">
            </div>
            <h6>P<sup>'</sup><sub>4</sub></h6>
            <div class="P4s my-results">
            </div>
        </div>
    </form>
    <div  class="canvas">
        <canvas id="line-chart" width="800" height="450"></canvas>
```

```
    </div>


<script src="http://code.jquery.com/jquery-2.0.2.min.js"></script>

    <script src="https://ajax.googleapis.com/ajax/libs/jquery/3.1.1/jquery.min.js" integrity="sha384-
3ceskX3iaEnIogmQchP8opvBy3Mi7Ce34nWjpBIwVTHfGYWQS9jwHDVRnpKKHJg7"
crossorigin="anonymous"></script>

    <script src="https://cdnjs.cloudflare.com/ajax/libs/tether/1.3.7/js/tether.min.js" integrity="sha384-
XTs3FgkjiBgo8qjEjBk0tGmf3wPrWtA6coPfQDfFEY8AnYJwjalXCiosYRBIBZX8" crossorigin="anonymous"></script>

    <script src="https://maxcdn.bootstrapcdn.com/bootstrap/4.0.0-alpha.5/js/bootstrap.min.js" integrity="sha384-
BLiI7JTZm+JWlgKa0M0kGRpJbF2J8q+qreVrKBC47e3K6BW78kGLrCkeRX6I9RoK"
crossorigin="anonymous"></script>

    <script src="js/js.js"></script>

    <script src="js/Chart.min.js"></script>

    <script src="js/rozrah_ejector.js"></script>

</body>

</html>
```

Rozrahunok-scheme.html

```
<!DOCTYPE html>

<html>

<head>

    <meta charset="UTF-8">

    <title>Rozrahunok</title>

    <link rel="stylesheet" href="https://maxcdn.bootstrapcdn.com/bootstrap/4.0.0-alpha.5/css/bootstrap.min.css"
integrity="sha384-AysaV+vQoT3kOAXZkl02PThvDr8HYKPZhNT5h/CXfBThSRXQ6jW5DO2ekP5ViFdi"
crossorigin="anonymous">

    <link rel="stylesheet" href="css/style.css">

    <link rel="stylesheet" href="css/font-awesome.min.css">

</head>

<body>

   <header>

       <nav class="navbar navbar-light bg-faded">

         <ul class="nav navbar-nav">

           <li class="nav-item active">

               <a class="nav-link" href="index.html">Головна<span class="sr-only">(current)</span></a>

           </li>

           <li class="nav-item dropdown">

               <a class="nav-link dropdown-toggle" href="http://example.com" id="navbarDropdownMenuLink" data-
toggle="dropdown" aria-haspopup="true" aria-expanded="false">

               Зміст роботи

               </a>
```

```
          <div class="dropdown-menu " aria-labelledby="navbarDropdownMenuLink">
            <a class="dropdown-item" href="javascript:PopUpShow()">Актуальність теми</a>
            <a class="dropdown-item" href="javascript:PopUpShow1()">Мета дослідження</a>
            <a class="dropdown-item" href="javascript:PopUpShow2()">Об'єкт дослідження</a>
             <a class="dropdown-item" href="javascript:PopUpShow3()">Завдання дослідження</a>
          </div>
        </li>
        <li class="nav-item active">
            <a class="nav-link" href="scheme.html">Технологічна схема<span class="sr-only">(current)</span></a>
        </li>
        <li class="nav-item active">
            <a class="nav-link" href="rozrahunok-scheme.html">Розрахунок технологічної схеми</a>
        </li>
        <li class="nav-item active">
            <a class="nav-link" href="rozrahunok.html">Розрахунок ежектора</a>
        </li>
      </ul>
      <a href="https://vk.com/matsibura_oleksandr"><i class="fa fa-vk fa-2x"></i></a>
      <a href="https://vk.com/matsibura_oleksandr"><i class="fa fa-facebook fa-2x"></i></a>
    </nav>
  </header>
    <div class="b-popup" id="popup1">
        <div class="b-popup-content">
            <p>Основними джерелами утворення радіоактивних відходів (РАВ) є діючі АЕС. Радіоактивні речовини утворюються під час роботи АЕС на потужності при ділені ядер U235, U233, Pi239 в активній зоні реактора, а також в результаті активації нейтронами різних матеріалів, які знаходяться в активній зоні, тобто як продукти ядерних реакцій. В середньому, в залежності від потужності і типу реакторної установки, за рік утворюється від 0,15 до 0,35 м3 рідких і від 0,1 до 0,3 м<sup>3</sup> - твердих РАВ на 1 МВт.</p>
            <p>В процесі експлуатації енергоблоків АЕС утворюється три основних види РАВ: газо аерозольні, рідкі та тверді, і головною умовою безпеки є їх знешкодження. З огляду на негативний вплив РАВ на людей і навколишнє природне середовище, потрібно впроваджувати нові технології технологічної схеми знешкодження РРВ.</p>
            <a href="javascript:PopUpHide()">Закрити</a>
        </div>
    </div>
    <div class="b-popup" id="popup2">
        <div class="b-popup-content">
            <p>Метою дослідження є: із використанням комп’ютерних експериментів дослідити процес очищення рідких радіоактивних відходів на основі іонно-селективного методу.</p>
```

```
            <p>Для вирішення поставленої задачі  потрібно обрати найбільш ефективний варіант технологічної
схеми, що забезпечить найкраще очищення. Виконати розрахунки складових апаратів схеми та обрати найкращі їх
параметри.</p>

            <a href="javascript:PopUpHide1()">Закрити</a>

          </div>

        </div>

        <div class="b-popup" id="popup3">

          <div class="b-popup-content">

            <p>Об'єктом дослідження є знешкодження рідких радіоактивних відходів на атомних електростанція
іонно-селективним методом.</p>

            <a href="javascript:PopUpHide2()">Закрити</a>

          </div>

        </div>

        <div class="b-popup" id="popup4">

          <div class="b-popup-content">

            <p>Для реалізації поставленої мети були сформульовані наступні завдання дослідження, що визначили
логіку дослідження та його структуру:</p>

            <ul>

              <li>Проаналізувати експериментальні дані;</li>

              <li>Розробити технологічну схему знешкодження РРВ;</li>

              <li>Розрахувати апарати отриманої технологічної схеми.</li>

              <li>Створити багатоваріантний продукт.</li>

            </ul>

            <a href="javascript:PopUpHide3()">Закрити</a>

          </div>

        </div>

      <div>

      <form role="form" class="my-form">

        <h4>Вхідні дані</h4>

        <div class="input-group">

          <span class="input-group-addon" id="sizing-addon1">Масові витрати <sup>54</sup>Co</span>

          <input type="number" class="form-control" placeholder="м3/год" aria-describedby="sizing-addon2" value =
"100">

        </div>

        <div class="input-group my-input">

          <span class="input-group-addon" id="sizing-addon2">Масові витрати <sup>60</sup>Mn </span>

          <input type="number" class="form-control" placeholder="м3/год" aria-describedby="sizing-addon2" value =
"100">

        </div>
```

```
    <div class="input-group my-input">
        <span class="input-group-addon" id="sizing-addon3">Масові витрати H<sub>2</sub>O</span>
        <input type="number" class="form-control" placeholder="м3/год" aria-describedby="sizing-addon2" value =
"45000">
    </div>
    <div class="input-group my-input">
        <span class="input-group-addon" id="sizing-addon4">Масові витрати Кисню (O<sub>2</sub>)</span>
        <input type="number" class="form-control" placeholder="м3/год" aria-describedby="sizing-addon2" value =
"1000">
    </div>
    <div class="input-group my-input">
        <span class="input-group-addon" id="sizing-addon4">Сорбент</span>
        <select>
            <option>ПБА-20</option>
        </select>
    </div>
    <div>
        <button type="button" class="btn btn-default navbar-btn">Розрахувати</button>
    </div>
</form>

<form class="results">
        <h4>Озонатор</h4>
        <h6>Кисень на рецикл</h6>
        <div class="oxygen my-results">
        </div>
        <h6>Озон</h6>
        <div class="ozone my-results">
        </div>
</form>

<form class="results">
        <h4>Ежектор</h4>
        <h6>Вміст <sup>54</sup>Co</h6>
        <div class="co_eject my-results">
        </div>
        <h6>Вміст <sup>60</sup>Mn</h6>
        <div class="mn_eject my-results">
```

```
        </div>
        <h6>Вміст H<sub>2</sub>O</h6>
        <div class="water_eject my-results">
        </div>
    </form>

    <form class="results">
        <h4>Цементування</h4>
        <h6>Вміст <sup>54</sup>Co</h6>
        <div class="co_filtr my-results">
        </div>
        <h6>Вміст <sup>60</sup>Mn</h6>
        <div class="mn_filtr my-results">
        </div>
        <h6>Вміст H<sub>2</sub>O</h6>
        <div class="water_filtr my-results">
        </div>
    </form>

    <form class="results">
        <h4>Кристалізація</h4>
        <h6>Вміст <sup>54</sup>Co</h6>
        <div class="co_dodfiltr my-results">
        </div>
        <h6>Вміст <sup>60</sup>Mn</h6>
        <div class="mn_dodfiltr my-results">
        </div>
        <h6>Вміст H<sub>2</sub>O</h6>
        <div class="water_dodfiltr my-results">
        </div>
    </form>
    <div  class="canvas_1">
      <canvas id="line-chart" width="800" height="450"></canvas>
    </div>

</div>
    <script src="http://code.jquery.com/jquery-2.0.2.min.js"></script>
```

```
    <script src="https://ajax.googleapis.com/ajax/libs/jquery/3.1.1/jquery.min.js" integrity="sha384-
3ceskX3iaEnIogmQchP8opvBy3Mi7Ce34nWjpBIwVTHfGYWQS9jwHDVRnpKKHJg7"
crossorigin="anonymous"></script>

    <script src="https://cdnjs.cloudflare.com/ajax/libs/tether/1.3.7/js/tether.min.js" integrity="sha384-
XTs3FgkjiBgo8qjEjBk0tGmf3wPrWtA6coPfQDfFEY8AnYJwjalXCiosYRBIBZX8" crossorigin="anonymous"></script>

    <script src="https://maxcdn.bootstrapcdn.com/bootstrap/4.0.0-alpha.5/js/bootstrap.min.js" integrity="sha384-
BLiI7JTZm+JWlgKa0M0kGRpJbF2J8q+qreVrKBC47e3K6BW78kGLrCkeRX6I9RoK"
crossorigin="anonymous"></script>

    <script src="js/js.js"></script>

    <script src="js/Chart.min.js"></script>

    <script src="js/rozrah_js.js"></script>

</body>

</html>
```

Scheme.html

```
<!DOCTYPE html>

<html>

<head>

    <meta charset="UTF-8">

    <title>Scheme</title>

    <link rel="stylesheet" href="https://maxcdn.bootstrapcdn.com/bootstrap/4.0.0-alpha.5/css/bootstrap.min.css"
integrity="sha384-AysaV+vQoT3kOAXZkl02PThvDr8HYKPZhNT5h/CXfBThSRXQ6jW5DO2ekP5ViFdi"
crossorigin="anonymous">

    <link rel="stylesheet" href="css/style.css">

    <link rel="stylesheet" href="css/font-awesome.min.css">

    <script src="http://code.jquery.com/jquery-2.0.2.min.js"></script>

    <script src="js/js.js"></script>

</head>

<body>

   <header>

       <nav class="navbar navbar-light bg-faded">

         <ul class="nav navbar-nav">

           <li class="nav-item active">

               <a class="nav-link" href="index.html">Головна<span class="sr-only">(current)</span></a>

           </li>

           <li class="nav-item dropdown">

               <a class="nav-link dropdown-toggle" href="http://example.com" id="navbarDropdownMenuLink" data-
toggle="dropdown" aria-haspopup="true" aria-expanded="false">

               Зміст роботи

               </a>
```

```
          <div class="dropdown-menu " aria-labelledby="navbarDropdownMenuLink">
            <a class="dropdown-item" href="javascript:PopUpShow()">Актуальність теми</a>
            <a class="dropdown-item" href="javascript:PopUpShow1()">Мета дослідження</a>
            <a class="dropdown-item" href="javascript:PopUpShow2()">Об'єкт дослідження</a>
             <a class="dropdown-item" href="javascript:PopUpShow3()">Завдання дослідження</a>
          </div>
        </li>
        <li class="nav-item active">
            <a class="nav-link" href="scheme.html">Технологічна схема<span class="sr-only">(current)</span></a>
        </li>
        <li class="nav-item active">
            <a class="nav-link" href="rozrahunok-scheme.html">Розрахунок технологічної схеми</a>
        </li>
        <li class="nav-item active">
            <a class="nav-link" href="rozrahunok.html">Розрахунок ежектора</a>
        </li>
      </ul>
      <a href="https://vk.com/matsibura_oleksandr"><i class="fa fa-vk fa-2x"></i></a>
      <a href="https://vk.com/matsibura_oleksandr"><i class="fa fa-facebook fa-2x"></i></a>
    </nav>
  </header>
    <div class="b-popup" id="popup1">
        <div class="b-popup-content">
            <p>Основними джерелами утворення радіоактивних відходів (РАВ) є діючі АЕС. Радіоактивні речовини утворюються під час роботи АЕС на потужності при ділені ядер U235, U233, Pi239 в активній зоні реактора, а також в результаті активації нейтронами різних матеріалів, які знаходяться в активній зоні, тобто як продукти ядерних реакцій. В середньому, в залежності від потужності і типу реакторної установки, за рік утворюється від 0,15 до 0,35 м3 рідких і від 0,1 до 0,3 м<sup>3</sup> - твердих РАВ на 1 МВт.</p>
            <p>В процесі експлуатації енергоблоків АЕС утворюється три основних види РАВ: газо аерозольні, рідкі та тверді, і головною умовою безпеки є їх знешкодження. З огляду на негативний вплив РАВ на людей і навколишнє природне середовище, потрібно впроваджувати нові технології технологічної схеми знешкодження РРВ.</p>
            <a href="javascript:PopUpHide()">Закрити</a>
        </div>
    </div>
    <div class="b-popup" id="popup2">
        <div class="b-popup-content">
            <p>Метою дослідження є: із використанням комп’ютерних експериментів дослідити процес очищення рідких радіоактивних відходів на основі іонно-селективного методу.</p>
```

```
            <p>Для вирішення поставленої задачі  потрібно обрати найбільш ефективний варіант технологічної схеми, що забезпечить найкраще очищення. Виконати розрахунки складових апаратів схеми та обрати найкращі їх параметри.</p>

            <a href="javascript:PopUpHide1()">Закрити</a>

          </div>

        </div>

        <div class="b-popup" id="popup3">

          <div class="b-popup-content">

            <p>Об'єктом дослідження є знешкодження рідких радіоактивних відходів на атомних електростанція іонно-селективним методом.</p>

            <a href="javascript:PopUpHide2()">Закрити</a>

          </div>

        </div>

        <div class="b-popup" id="popup4">

          <div class="b-popup-content">

            <p>Для реалізації поставленої мети були сформульовані наступні завдання дослідження, що визначили логіку дослідження та його структуру:</p>

            <ul>

              <li>Проаналізувати експериментальні дані;</li>

              <li>Розробити технологічну схему знешкодження РРВ;</li>

              <li>Розрахувати апарати отриманої технологічної схеми.</li>

              <li>Створити багатоваріантний продукт.</li>

            </ul>

            <a href="javascript:PopUpHide3()">Закрити</a>

          </div>

        </div>

    <div>

    <img src="images/scheme.jpg" class="my-scheme" alt="Навігація по сайту"

    usemap="#Navigation"></div>

    <p>

      <map id="Navigation" name="Navigation">

        <area shape="rect" coords="120,10,85,40" href="http://findpatent.com.ua/patent/244/2442537.html" alt="Ємність реагентів">

        <area shape="rect" coords="215,10,185,40" href="http://findpatent.com.ua/patent/244/2442537.html" alt="Ємність реагентів">

        <area shape="rect" coords="65,115,105,80" href="https://ru.wikipedia.org/wiki/%D0%81%D0%BC%D0%BA%D0%BE%D1%81%D1%82%D1%8C" alt="Приймаюча ємність">

        <area shape="rect" coords="240,115,200,80" href="https://ru.wikipedia.org/wiki/%D0%81%D0%BC%D0%BA%D0%BE%D1%81%D1%82%D1%8C" alt="Приймаюча ємність">
```

```
        <area shape="rect" coords="370,200,310,175"
href="https://uk.wikipedia.org/wiki/%D0%95%D0%B6%D0%B5%D0%BA%D1%82%D0%BE%D1%80"
alt="Ежектор">

        <area shape="rect" coords="370,170,300,135"
href="https://ru.wikipedia.org/wiki/%D0%9E%D0%B7%D0%BE%D0%BD%D0%B0%D1%82%D0%BE%D1%80"
alt="Озонатор">

       </map>

    </p>

    <script src="https://ajax.googleapis.com/ajax/libs/jquery/3.1.1/jquery.min.js" integrity="sha384-
3ceskX3iaEnIogmQchP8opvBy3Mi7Ce34nWjpBIwVTHfGYWQS9jwHDVRnpKKHJg7"
crossorigin="anonymous"></script>

    <script    src="https://cdnjs.cloudflare.com/ajax/libs/tether/1.3.7/js/tether.min.js" integrity="sha384-
XTs3FgkjiBgo8qjEjBk0tGmf3wPrWtA6coPfQDfFEY8AnYJwjalXCiosYRBIBZX8" crossorigin="anonymous">

    </script>

    <script src="https://maxcdn.bootstrapcdn.com/bootstrap/4.0.0-alpha.5/js/bootstrap.min.js" integrity="sha384-
BLiI7JTZm+JWlgKa0M0kGRpJbF2J8q+qreVrKBC47e3K6BW78kGLrCkeRX6I9RoK"
crossorigin="anonymous"></script>

</body>

</html>
```

CSS

```
h1 {

    text-align: center;

}


h2 {

    text-align: center;

    margin-top: 50px;

}

.author-name {

    padding-top: 100px;

    text-align: right;

    padding-right: 100px;

}

.b-popup{

    z-index: 3;

    width:100%;

    min-height:100%;

    background-color: rgba(0,0,0,0.5);

    overflow:hidden;

    position:fixed;
```

```
    top:0px;
}
.b-popup .b-popup-content{
    margin:40px auto 0px auto;
    width:500px;
    height: 100%;
    padding:10px;
    background-color: #c5c5c5;
    border-radius:5px;
    box-shadow: 0px 0px 10px #000;
}
.b-popup a {
    display: inline-block;
    margin: 0 40%;
    width: 100px;
    height: 30px;
    line-height: 30px;
    text-align: center;
    background-color: #AFAFAF;
    border: none;
    border-radius: 5px;
    color: #373A3C;
    text-decoration: none;
}
.b-popup a:hover {
    background-color: #6B6B6B;
    color: #FFFFFF;
}
h2 a {
    text-decoration: none;
    color: inherit;
}
h2 a:hover {
    text-decoration: none;
}
.fa-vk {
    color: #507299;
```

```
    float:right;
    margin-right: 15%;
}
.fa-facebook {
    color: #507299;
    float:right;
    margin-right: 2%;
}
.fa-vk:hover {
    color: #373A3C;
}
.fa-facebook:hover {
    color: #373A3C;
}
.my-scheme {
    display: block;
    margin: 0 auto;
}
.my-form {
    z-index: 1;
    margin: 30px 0px 0px 50px;
    width: 500px;
    display: inline-block;
}
.my-input {
    margin-top: 20px;
}
.my-input_ej {
    margin-top: 10px;
}
.btn-default {
    display: block;
    margin: 0 auto;
}
.my-form button{
    margin-top: 20px;
}
```

```
.results {
    width: 178px;
    margin-top: 20px;
    display: inline-block;
    vertical-align: top;
}
.results h4 {
    margin-top: 13px;
    text-align: center;
}
.results h6 {
    text-align: center;
}
.my-results {
    display: block;
    margin: 10px auto;
    width: 100px;
    height: 30px;
    border: #DDDDDD solid 1px;
    border-radius: 3px;
    text-align: center;
    line-height: 30px;
}
.input-group-addon:not(:last-child) {
    border-right: 0;
    width: 230px;
}
.my-form h4{
    text-align: center;
}
.canvas_1 {
    display: block;
    margin: auto;
    width: 600px;
    height: 500px;
}
.canvas {
```

```
    display: inline-block;
    margin: auto;
    width: 600px;
    height: 500px;
}
th,td,tr {
    border: solid 1px;
    text-align: center;
    padding: 6px;
}
.h5, h5 {
    text-align: center;
}
select {
    width: 270px;
    height: 37px;
    color: rgb(169, 169, 169);
    padding-left: 9px;
    border: 1px solid rgba(0,0,0,.15);
    border-radius: .25rem;
}
```

JAVA SCRIPT

Js.js

```
    $(document).ready(function(){
        //Скрыть PopUp при загрузке страницы
        PopUpHide();
    });
    //Функция отображения PopUp
    function PopUpShow(){
        $("#popup1").show();
    }
    //Функция скрытия PopUp
    function PopUpHide(){
        $("#popup1").hide();
    }
    $(document).ready(function(){
```

```
    //Скрыть PopUp при загрузке страницы
    PopUpHide1();
});
//Функция отображения PopUp
function PopUpShow1(){
    $("#popup2").show();
}
//Функция скрытия PopUp
function PopUpHide1(){
    $("#popup2").hide();
}

$(document).ready(function(){
    //Скрыть PopUp при загрузке страницы
    PopUpHide2();
});
//Функция отображения PopUp
function PopUpShow2(){
    $("#popup3").show();
}
//Функция скрытия PopUp
function PopUpHide2(){
    $("#popup3").hide();
}
$(document).ready(function(){
    //Скрыть PopUp при загрузке страницы
    PopUpHide3();
});
//Функция отображения PopUp
function PopUpShow3(){
    $("#popup4").show();
}
//Функция скрытия PopUp
function PopUpHide3(){
    $("#popup4").hide();
}
```

Rozrah_js.js

```
$(document).ready(function() {
  $('.my-form .btn').click(function(){
    var Co = parseInt($('#sizing-addon1 + input').val());
    var Mn = parseInt($('#sizing-addon2 + input').val());
    var H2O = parseInt($('#sizing-addon3 + input').val());
    var Oxygen = parseInt($('#sizing-addon4 + input').val());
    var Ozone;

    function ozonator(Oxygen) {
      Oxygen_recycle = Oxygen * 0.713;
      Ozone = Oxygen * 0.197;
      return {
        Oxygen_recycle,
        Ozone
      };
    }

    function ejector(Co, Mn, H2O) {
      Co_eject = Co;
      Mn_eject = Mn;
      H2O_eject = Ozone + H2O;
      return {
        Co_eject,
        Mn_eject,
        H2O_eject
      };
    }
    var Co_membrana1to2, Co_membrana2to3, Co_membrana3to4, Co_membrana4to5,
      Co_membrana5toDodFiltr, Mn_membrana1to2, Mn_membrana2to3, Mn_membrana3to4,
      Mn_membrana4to5, Mn_membrana5toDodFiltr, H2O_membrana1to2, H2o_membrana2to3,
      H2O_membrana3to4, H2O_membrana4to5, H2O_membrana5toDodFiltr,bottoms1to2,bottoms2to3,bottoms3to4,
      bottoms4to5,bottoms5toDodFiltr;

    function microfiltr() {
      //Membrana 1//
      Co_membrana1to2 = 0.85 * Co;
      Co_membrana1end = 0.15 * Co;
```

```
Mn_membrana1to2 = 0.85 * Mn;
Mn_membrana1end = 0.15 * Mn;
H2O_membrana1to2 = 0.85 * H2O;
H2O_membrana1end = 0.15 * H2O;
//Membrana 2//
Co_membrana2to3 = 0.85 * Co_membrana1to2;
Co_membrana2end = 0.15 * Co_membrana1to2;
Mn_membrana2to3 = 0.85 * Mn_membrana1to2;
Mn_membrana2end = 0.15 * Mn_membrana1to2;
H2O_membrana2to3 = 0.85 * H2O_membrana1to2;
H2O_membrana2end = 0.15 * H2O_membrana1to2;
//Membrana 3//
Co_membrana3to4 = 0.85 * Co_membrana2to3;
Co_membrana3end = 0.15 * Co_membrana2to3;
Mn_membrana3to4 = 0.85 * Mn_membrana2to3;
Mn_membrana3end = 0.15 * Mn_membrana2to3;
H2O_membrana3to4 = 0.85 * H2O_membrana2to3;
H2O_membrana3end = 0.15 * H2O_membrana2to3;
//Membrana 4//
Co_membrana4to5 = 0.85 * Co_membrana3to4;
Co_membrana4end = 0.15 * Co_membrana3to4;
Mn_membrana4to5 = 0.85 * Mn_membrana3to4;
Mn_membrana4end = 0.15 * Mn_membrana3to4;
H2O_membrana4to5 = 0.85 * H2O_membrana3to4;
H2O_membrana4end = 0.15 * H2O_membrana3to4;
//Membrana 5//
Co_membrana5toDodFiltr = 0.85 * Co_membrana4to5;
Co_membrana5end = 0.15 * Co_membrana4to5;
Mn_membrana5toDodFiltr = 0.85 * Mn_membrana4to5;
Mn_membrana5end = 0.15 * Mn_membrana4to5;
H2O_membrana5toDodFiltr = 0.85 * H2O_membrana4to5;
H2O_membrana5end = 0.15 * H2O_membrana4to5;
//Na cementyvanya//
Co_membranaEnd = Co_membrana1end + Co_membrana2end + Co_membrana3end + Co_membrana4end +
Co_membrana5end;
Mn_membranaEnd = Mn_membrana1end + Mn_membrana2end + Mn_membrana3end + Mn_membrana4end +
Mn_membrana5end;
```

```
        H2O_membranaEnd = H2O_membrana1end + H2O_membrana2end + H2O_membrana3end +
H2O_membrana4end + H2O_membrana5end;
        bottoms1to2 = Co_membrana1to2 + Mn_membrana1to2 + H2O_membrana1to2;
        bottoms2to3 = Co_membrana2to3 + Mn_membrana2to3 + H2O_membrana2to3;
        bottoms3to4 = Co_membrana3to4 + Mn_membrana3to4 + H2O_membrana3to4;
        bottoms4to5 = Co_membrana4to5 + Mn_membrana4to5 + H2O_membrana4to5;
        bottoms5toDodFiltr = Co_membrana5toDodFiltr + Mn_membrana5toDodFiltr + H2O_membrana5toDodFiltr;
        return {
            Co_membranaEnd: Co_membranaEnd.toFixed(5),
            Mn_membranaEnd: Mn_membranaEnd.toFixed(5),
            H2O_membranaEnd: H2O_membranaEnd.toFixed(5),
            Co_membrana5toDodFiltr: Co_membrana5toDodFiltr.toFixed(5),
            Mn_membrana5toDodFiltr: Mn_membrana5toDodFiltr.toFixed(5),
            H2O_membrana5toDodFiltr: H2O_membrana5toDodFiltr.toFixed(5),
            Co_membrana1to2,
            Co_membrana2to3,
            Co_membrana3to4,
            Co_membrana4to5,
            Co_membrana5toDodFiltr,
            bottoms5toDodFiltr,
            bottoms4to5,
            bottoms3to4,
            bottoms2to3,
            bottoms1to2
        };
    }
    var ozon = ozonator(Oxygen);
    $('.oxygen').html(ozon.Oxygen_recycle);
    $('.ozone').html(ozon.Ozone);
    var ejec = ejector(Co, Mn, H2O);
    $('.co_eject').html(ejec.Co_eject);
    $('.mn_eject').html(ejec.Mn_eject);
    $('.water_eject').html(ejec.H2O_eject);
    var filtr = microfiltr(Co_eject, Mn_eject, H2O_eject);
    $('.co_filtr').html(filtr.Co_membranaEnd);
    $('.mn_filtr').html(filtr.Mn_membranaEnd);
    $('.water_filtr').html(filtr.H2O_membranaEnd);
```

```
$('.co_dodfiltr').html(filtr.Co_membrana5toDodFiltr);
$('.mn_dodfiltr').html(filtr.Mn_membrana5toDodFiltr);
$('.water_dodfiltr').html(filtr.H2O_membrana5toDodFiltr);
new Chart(document.getElementById("line-chart"), {
  type: 'line',
  data: {
    labels: [0,400,600,800,1000],
    datasets: [{
        data: [Co_membrana1to2, Co_membrana2to3, Co_membrana3to4, Co_membrana4to5,
Co_membrana5toDodFiltr],
        label: "Co",
        borderColor: "#3e95cd",
        fill: false
      }, {
        data: [Mn_membrana1to2, Mn_membrana2to3, Mn_membrana3to4, Mn_membrana4to5,
Mn_membrana5toDodFiltr],
        label: "Mn",
        borderColor: "#8e5ea2",
        fill: false
      }, {
        data: [H2O_membrana1to2, H2O_membrana2to3, H2O_membrana3to4, H2O_membrana4to5,
H2O_membrana5toDodFiltr],
        label: "H2O",
        borderColor: "#3cba9f",
        fill: false
      }, {
        data: [bottoms5toDodFiltr, bottoms4to5,bottoms3to4, bottoms2to3, bottoms1to2],
        label: "Bottoms",
        borderColor: "black",
        fill: false
      }
    ]
  },
options: {
    title: {
        display: true,
        text: 'Зміна витрат після фільтрації за часом',
        responsive: false
```

```
        }
    }
    });

    });
});
```

Rozrah_ejector.js

```
$(document).ready(function() {
  $('.my-form .btn').click(function(){
    var k =  parseFloat($('#sizing-addon6 + input').val());
    var R =  parseFloat($('#sizing-addon7 + input').val());
    var P1 =  parseFloat($('#sizing-addon8 + input').val());
    var P2 =  parseFloat($('#sizing-addon9 + input').val());
    var T1 =  parseFloat($('#sizing-addon10 + input').val());
    var T2 =  parseFloat($('#sizing-addon11 + input').val());
    var G1 =  parseFloat($('#sizing-addon12 + input').val());
    var G2 = parseFloat($('#sizing-addon13 + input').val());

    var P0 = P1 / P2;
    var T0 = T2 / T1;
    var n = G2 / G1;

    $('.P0').html(P0.toFixed(5));
        $('.T0').html(T0 .toFixed(5));
        $('.n').html(n.toFixed(5));
    var q2l2,z2l2,alfa,q1lamb1,z1lamb1,lamb1,q2lamb1,mistake;
    //Критичний режим//
    var result = [];
    for (var i = 9; i > 0; i--) {
            var lambda = i / 10;
            var obj = {};
            obj.q2l2 = (Math.pow(((k+1)/2),1/(k-1))*lambda*Math.pow((1-(k-1)/(k+1)*Math.pow(lambda,2)),1/(k-
1))).toFixed(3);
            obj.z2l2 = ((lambda + 1) / lambda).toFixed(3);
            obj.alfa = (obj.q2l2 / (n * P0 * Math.sqrt(T0))).toFixed(3);
            obj.q1lamb1 = (obj.alfa/(1 + obj.alfa - obj.q2l2)).toFixed(3);
```

```
obj.z1lamb1 = (obj.q2l2 * (obj.z2l2 - 2)/(obj.alfa * P0)+2).toFixed(3);
obj.lamb1 = (obj.z1lamb1 / 2 + Math.sqrt(Math.pow(obj.z1lamb1/2,2)-1)).toFixed(3);
obj.q2lamb1 = (Math.pow(((k+1)/2),1/(k-1))*obj.lamb1*Math.pow((1-(k-1)/(k+1)*Math.pow(obj.lamb1,2)),1/(k-1))).toFixed(3);
obj.mistake = (obj.q2lamb1 - obj.q1lamb1).toFixed(3);
result.push(obj);
if (obj.mistake < 0) {
break;
}
}
var globalCounter = 0;
var tbody = document.getElementById('tbody');
var caption = document.getElementById('caption');
var name = "<caption>" + "Розрахунок критичного режиму" +        "</caption>";
var tr = '<tr>';
for (key in result[0]){
tr += "<th>" + key + "</th>";
}
for (var i = 0; i < result.length; i++) {
tr += "<tr>";
for (key in result[i]){
tr += "<td>" + result[i][key] + "</td>";
}
tr += "</tr>";
}
$('#caption').css({
'padding-top': '.75rem',
'padding-bottom':'.75rem',
'color': '#818a91',
'text-align': 'center',
'caption-side': 'top',
'border': 'solid 1px'
});
$('#table').css({
'display': 'inline-block',
'border': 'solid 1px',
'margin-left': '20px',
```

```
                                        'vertical-align': 'top',
                                        'margin-top':' 30px'
                                        });
                                caption.innerHTML += name;
                tbody.innerHTML += tr;
                // Температури тормозіння в характерних перерізах
                //Знаходимо газодинамічні функції
                var lamb2 = 0.364;
        q2l2 = 0.543;
        alfa = 0.631;
        z2l2 = 3.112;
        var zlamb1 = (q2l2 * (z2l2 - 2))/(alfa * P0) + 2;
        var lamb1s = (zlamb1 / 2) + Math.sqrt(Math.pow(zlamb1 / 2, 2) - 1);
        var ql1s = alfa/(1 + alfa - q2l2);
        var zlamb2 = 2;
        var zl3 = (zlamb2 + n * Math.sqrt(T0) * z2l2) / Math.sqrt((n+1)*(n*T0+1));
        var lamb3 = zl3 / 2 - Math.sqrt(Math.pow(zl3/2,2)-1);
        var ql3 = Math.pow((k+1)/2,1/(k-1))*lamb3*Math.pow(1-((k-1)/(k+1))*Math.pow(lamb3,2),1/(k-1));
```

Для визначення значень температур тормозіння в характерних перерызах ежектора скористуємось наступними рівняннями:

```
        var T1s = T1;
        var T3s = T1s * ((n*T0+1)/(n+1));
        var T4s = T3s;
        var Th = T2;
        $('.T1s').html(T1s);
        $('.T2').html(T2);
        $('.T3s').html(T3s.toFixed(5));
        $('.T4s').html(T4s.toFixed(5));
        $('.Th').html(Th);
```

//Для визначення значень температур тормозіння в характерних перерызах ежектора скористуємось наступними рівняннями:

```
        var sigma_d = 0.98;
        var sigma_c = 0.985;
        var sigma_vh = 0.99;
        var Ph = P2 / sigma_vh;
        var P3 = (alfa * P1 + P2)/ (1 + alfa);
        var P4 = P3 * sigma_d;
        P0 = P1 / sigma_c;
```

```
$('.Ph').html(Ph.toFixed(3));
$('.P2').html(P2.toFixed(3));
$('.P3').html(P3.toFixed(3));
$('.P4').html(P4.toFixed(3));
$('.P0').html(P0.toFixed(3));
// Определение расхода газа и размеров сечений сопла и камеры
// Швидкість потоку на вихооді із сопла (переріз 1)
var W1 = Math.sqrt((2 * k)/(k + 1) * R * T1);
var m = Math.sqrt(k/R*Math.pow(2/(k+1),(k+1)/(k-1)));
var ql1 = 1;
var F1 = (G1*Math.sqrt(T1)) / (m * ql1 * P1);
var dkp = Math.sqrt(4 / Math.PI * F1);
var Dk = Math.sqrt((4 * F1 * (1 + 1 / alfa))/ Math.PI);
var lk = 4 * Dk;
var lc = lk / 4;
var F3 = Math.PI * Math.pow(Dk, 2) / 4;
$('.W1').html(W1.toFixed(3));
$('.F1').html(F1.toFixed(5));
$('.dkp').html(dkp.toFixed(3));
$('.Dk').html(Dk.toFixed(3));
$('.lk').html(lk.toFixed(3));
$('.lc').html(lc.toFixed(3));
$('.F3').html(F3.toFixed(5));
//Знаходимо геометричні параметри перерізу 0 і Н
var l_vh = lc;
var beta_vh = 35;
beta_vh = beta_vh * Math.PI / 180;
var beta_d = 15;
beta_d = beta_d * Math.PI / 180;
var D0 = dkp + 2 * l_vh * Math.tan(beta_vh);
var F0 = (Math.PI * Math.pow(D0, 2)) / 4;
var Dh = Dk + 2 * l_vh * Math.tan(beta_vh);
var Fh = (Math.PI * Math.pow(Dh, 2))/4;
//Визначаємо статичні тиски в характерних перерізах
//Витрата газу через переріз 3
var G3 = m * F3 * ql3 * P3/Math.sqrt(T1);
var G4 = G3;
```

```
//Для знаходження F4 задаємо ГДФ
var lamb4 = 0.5;
var ql4 = Math.pow((k+1)/2,1/(k-1))*lamb4*Math.pow(1-(k-1)/(k+1)*Math.pow(lamb4,2),1/(k-1))
//Звідси знаходимо F4
var F4 = F3 * (ql3/ql4);
var D4 = Math.sqrt(4 * F4 / Math.PI);
//Знаходимо довжину дифузора
var l_d = (D4 - Dk)/ (2 * Math.tan(beta_d));
//По рівнянням нерозривності знаходимо ГДФ в перерізах 0 і Н
var Gh = G2;
var G0 = G1;
var ql0 = G2 / (m * F0 * (P0 / Math.sqrt(T1)));
var qlh = G2 / (m * Fh * (Ph / Math.sqrt(T1)));
//В результаты розрахунків методом ітерацій потрібно отримати   і
//По знайденим   знайдемо статичний тиск перерізу
lamb1 = 1;
var Pl1 = Math.pow(1-(k-1)/(k+1)*Math.pow(lamb1,2),1/(k-1))
var P1s = P1 * Pl1;
var Pl2 = Math.pow(1-(k-1)/(k+1)*Math.pow(lamb2,2),1/(k-1))
var P2s = P2 * Pl1;
var Pl3 = Math.pow(1-(k-1)/(k+1)*Math.pow(lamb3,2),1/(k-1))
var P3s = P3 * Pl1;
var Pl4 = Math.pow(1-(k-1)/(k+1)*Math.pow(lamb4,2),1/(k-1))
var P4s = P4 * Pl1;
$('.P1s').html(P1s.toFixed(3));
$('.P2s').html(P2s.toFixed(3));
$('.P3s').html(P3s.toFixed(3));
$('.P4s').html(P4s.toFixed(3));
var l12 = l_vh;
var l_rav = l_vh + 1.5 * Dk;
var l3 = l_vh + lk;
var l4 = l_vh + lk + l_d;
new Chart(document.getElementById("line-chart"), {
    type: 'line',
    data: {
      labels: [l12.toFixed(3),l3.toFixed(3),l4.toFixed(3)],
      datasets: [{
```

```
            data: [P1, P3, P4],
            label: "y2",
            borderColor: "yellow",
            fill: false
          }, {
            data: [P2, P3, P4],
            label: "y",
            borderColor: "green",
            fill: false
          }, {
            data: [P1s, P3s, P4s],
            label: "YY",
            borderColor: "brown",
            fill: false
          }, {
            data: [P2s, P3s, P4s],
            label: "YY2",
            borderColor: "blue",
            fill: false
          }
        ]
      },
    options: {
        title: {
            display: true,
            text: 'Залежність тисків від положення перерізу',
            responsive: false
        }
    }
    });
          $('.test1').html(l_rav.toFixed(5));
          $('.test2').html(l3.toFixed(5));
          $('.test3').html(l4.toFixed(5));
          });
});
```