

**МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ ХАРЧОВИХ ТЕХНОЛОГІЙ**

**Інститут (факультет) Навчально-науковий інститут харчових технологій
Кафедра технології жирів, хімічних технологій харчових добавок
та косметичних засобів**

«До захисту в ЕК»
Директор інституту ННІХТ
Оксана КОЧУБЕЙ-ЛИТВИНЕНКО
(підпис) (Ім'я, ПРІЗВИЩЕ)

«__» червня 2025 р.

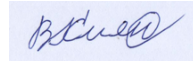
«До захисту допущено»
Завідувач кафедри ТЖХТ
Тамара НОСЕНКО
(підпис) (ім'я, ПРІЗВИЩЕ)

«__» червня 2025 р.

**КВАЛІФІКАЦІЙНА РОБОТА
НА ЗДОБУТТЯ ОСВІТНЬОГО СТУПЕНЯ БАКАЛАВРА**
зі спеціальності 161 Хімічні технології та інженерія
(код та назва спеціальності)
освітньо-професійної програми Хімічна технологія
на тему: Удосконалення технології виробництва пірофосфату натрію

Виконав: здобувач 4 курсу, групи ХТ-4-14

КИЯНИЦЯ Віталій Анатолійович
(прізвище, ім'я та по батькові повністю)


(підпис)

Керівник БОЙЧУК Тетяна Михайлівна, к.х.н., доцент
(прізвище, ім'я та по батькові повністю)

(підпис)

Консультанти Ігор ЖИТНЕЦЬКИЙ, к.т.н., доцент
(Ім'я ПРІЗВИЩЕ)

(підпис)

(Ім'я ПРІЗВИЩЕ)

(підпис)

(Ім'я ПРІЗВИЩЕ)

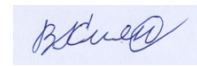
(підпис)

Рецензент Ольга КОЗАРЕНКО, к.х.н.
(Ім'я ПРІЗВИЩЕ)

(підпис)

Я як здобувач Національного університету харчових технологій розумію і підтримую політику університету з академічної доброчесності. Я не надавав і не одержував недозволеної допомоги під час підготовки цієї роботи. Використання ідей, результатів і текстів інших авторів мають посилання на відповідне джерело.

Здобувач


(підпис)

Київ – 2025 р.

НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ ХАРЧОВИХ ТЕХНОЛОГІЙ

Інститут Навчально-науковий інститут харчових технологій

Кафедра технології жирів, хімічних технологій харчових добавок та косметичних засобів

Освітній ступінь бакалавр

Спеціальність 161 Хімічні технології та інженерія

(код і назва)

Освітньо-професійна програма Хімічна технологія

(назва)

ЗАТВЕРДЖУЮ

Завідувач кафедри ТЖХТ

Тамара НОСЕНКО

“ ” _____ 2025 року

ЗАВДАННЯ

НА КВАЛІФІКАЦІЙНУ РОБОТУ ЗДОБУВАЧА

Кияниці Віталія Анатолійовича

(прізвище, ім'я, по батькові)

1. Тема роботи Удосконалення технології виробництва пірофосфату натрію

керівник роботи БОЙЧУК Тетяна Михайлівна, к.х.н., доцент

(прізвище, ім'я, по батькові, науковий ступінь, вчене звання)

затвержені наказом закладу вищої освіти від “15”квітня 2025 року № 296-КС

2. Строк подання здобувачем роботи 01.06.2025 р.

3. Вихідні дані до роботи: продуктивність виробництва пірофосфату натрію становить 1000 кг/добу

4. Зміст пояснювальної записки (перелік питань, які потрібно розробити) Вступ, аналітичний огляд науково-технічної літератури, технологічна частина, техніко-економічне обґрунтування, організація контролю якості продукції, екологічна безпека, охорона праці, висновки, список використаної літератури

5. Перелік графічного матеріалу

Лист 1. Принципова-технологічна схема, формат аркушу А1

Лист 2. Апаратурно-технологічна схема, формат аркушу А1

Лист 3. Креслення апарату (загальний вигляд), формат аркушу А1

6. Консультанти розділів роботи

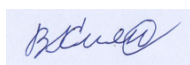
| Розділ | Прізвище, ініціали та посада консультанта | Підпис, дата | |
|----------------------|--|----------------|------------------|
| | | завдання видав | завдання прийняв |
| Технологічна частина | Житнецький І.В. к.т.н., доцент кафедри МАХтаФВ | 15.04.2025 | 30.05.2025 |
| | | | |
| | | | |

7. Дата видачі завдання 15 квітня 2025 р.

КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

| № | Назва етапів виконання кваліфікаційної роботи | Строк виконання етапів роботи | Примітка |
|----|--|-------------------------------|----------|
| 1 | ВСТУП | 15.04.2025 | |
| 2 | РОЗДІЛ 1 АНАЛІТИЧНИЙ ОГЛЯД НАУКОВО-ТЕХНІЧНОЇ ЛІТЕРАТУРИ | 16.04.2025-20.04.2025 | |
| 3 | РОЗДІЛ 2 ТЕХНОЛОГІЧНА ЧАСТИНА | 21.04.2025-28.04.2025 | |
| 4 | РОЗДІЛ 3 ТЕХНІКО-ЕКОНОМІЧНЕ ОБГРУНТУВАННЯ | 21.04.2025-23.04.2025 | |
| 5 | РОЗДІЛ 4 ОРГАНІЗАЦІЯ КОНТРОЛЮ ЯКОСТІ ПРОДУКЦІЇ | 24.04.2025-30.04.2025 | |
| 6 | РОЗДІЛ 5 ЕКОЛОГІЧНА ЧАСТИНА | 01.05.2025-07.05.2025 | |
| 7 | РОЗДІЛ 6 ОХОРОНА ПРАЦІ | 08.05.2025-16.05.2025 | |
| 8 | ВИСНОВКИ | 09.05.2025-19.05.2025 | |
| 9 | СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ | 20.05.2025-26.05.2025 | |
| 10 | ГРАФІЧНИЙ МАТЕРІАЛ. ПРИНЦИПОВА-ТЕХНОЛОГІЧНА СХЕМА | 21.05.2025-27.05.2025 | |
| 11 | ГРАФІЧНИЙ МАТЕРІАЛ. АПАРАТУРНО-ТЕХНОЛОГІЧНА СХЕМА | 21.05.2025-27.05.2025 | |
| 12 | ПЕРЕДЗАХИСТ, ПЕРЕВІРКА НА АКАДЕМПЛАГІАТ, РЕЦЕНЗУВАННЯ КР | 03.06.2025-07.06.2025 | |
| | | | |

Здобувач



(підпис)

Віталій КИЯНИЦЯ

(Ім'я ПРІЗВИЩЕ)

Керівник роботи

(підпис)

Тетяна БОЙЧУК

(Ім'я ПРІЗВИЩЕ)

РЕФЕРАТ

Кияниця В.А. Удосконалення технології виробництва пірофосфату натрію продуктивністю 1000 кг/добу.

ПОЯСНЮВАЛЬНА ЗАПИСКА: 80 С., 8 РИС., 23 ТАБЛ., 3 АРКУШІ ГРАФІЧНОГО МАТЕРІАЛУ, 32 ЛІТЕРАТУРНІ ДЖЕРЕЛА.

У кваліфікаційній роботі проведено літературний аналіз та узагальнено інформацію про технологію отримання пірофосфату натрію E450(iii).

Описано основні та додаткові сировинні матеріали для виробництва пірофосфату натрію $\text{Na}_4\text{P}_2\text{O}_7$.

Вивчено технологію виробництва пірофосфату натрію та на базі отриманих даних розроблено принципову і апаратурно-технологічну схему одержання пірофосфату натрію.

Проведений детальний опис розроблених схем.

Підібрано основне технологічне обладнання відповідно до виробничої лінії.

Проведено розрахунок матеріального балансу хіміко-технологічного процесу, а також надано техніко-економічне обґрунтування запропонованого способу виробництва.

Запропоновано метод удосконалення технології виробництва цільового продукту E450.

КЛЮЧОВІ СЛОВА: E450, УДОСКОНАЛЕННЯ, ВУГЛЕКИСЛИЙ ГАЗ, ТЕХНОЛОГІЯ, ВИРОБНИЦТВО, ХАРЧОВА ДОБАВКА, ПІРОФОСФАТ НАТРІЮ, ХАРЧОВІ ПРОДУКТИ, ЕМУЛЬГАТОР.

ABSTRACT

Kyyanytsia V.A. Improvement of the production technology of sodium pyrophosphate with a capacity of 1000 kg/day.

EXPLANATORY NOTE: 80 P., 8 FIGURES, 23 TABLES, 3 SHEETS OF GRAPHIC MATERIAL, 32 LITERARY SOURCES.

The qualification work conducted a literature analysis and summarized information on the technology for producing sodium pyrophosphate E450(iii).

The main and additional raw materials for the production of sodium pyrophosphate $\text{Na}_4\text{P}_2\text{O}_7$ are described.

The technology of sodium pyrophosphate production was studied and, based on the data obtained, a principle and equipment - technological scheme for obtaining sodium pyrophosphate was developed.

A detailed description of the developed schemes was provided.

The main technological equipment has been selected according to the production line.

The material balance of the chemical-technological process was calculated, and a feasibility study of the proposed production method was provided.

A method for improving the production technology of the target product E450 is proposed.

KEYWORDS: E450, IMPROVEMENT, CARBON DIOXIDE, TECHNOLOGY, PRODUCTION, FOOD ADDITIVE, SODIUM PYROPHOSPHATE, FOOD PRODUCTS, EMULSIFIER.

ЗМІСТ

| | |
|---|----|
| ВСТУП | 7 |
| РОЗДІЛ 1 АНАЛІТИЧНИЙ ОГЛЯД НАУКОВО-ТЕХНІЧНОЇ ЛІТЕРАТУРИ | 10 |
| 1.1 Характеристика сировини | 10 |
| 1.2 Галузі використання..... | 12 |
| 1.3. Стан сировинної бази..... | 15 |
| 1.4 Аналіз існуючих технологій виробництва | 17 |
| 1.5 Допоміжні речовини у виробництві (вода, повітря)..... | 19 |
| 1.6 Вуглекислий газ як об’єкт удосконалення технології | 22 |
| 1.7 Обґрунтування вибору технології | 26 |
| РОЗДІЛ 2 ТЕХНОЛОГІЧНА ЧАСТИНА..... | 27 |
| 2.1 Характеристика вихідної сировини..... | 27 |
| 2.2 Опис принципової технологічної схеми | 28 |
| 2.3 Розрахунок матеріального балансу відділення (цеху)..... | 32 |
| 2.4 Підбір основного технологічного обладнання | 44 |
| 2.5 Опис апаратурно-технологічної схеми | 51 |
| 2.6 Розрахунок реактора із рамною мішалкою..... | 53 |
| 2.7 Розрахунок теплового балансу термічної дегідратації..... | 59 |
| РОЗДІЛ 3 ТЕХНІКО-ЕКОНОМІЧНЕ ОБґРУНТУВАННЯ | 61 |
| РОЗДІЛ 4 ОРГАНІЗАЦІЯ КОНТРОЛЮ ЯКОСТІ ПРОДУКЦІЇ | 65 |
| РОЗДІЛ 5 ЕКОЛОГІЧНА ЧАСТИНА | 69 |
| РОЗДІЛ 6 ОХОРОНА ПРАЦІ | 72 |
| ВИСНОВКИ..... | 76 |
| СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ..... | 77 |

| | | | | | | |
|---|---|--|--|-----------------------------------|-------------------|----------------------|
| <i>Відповідальна організація</i> НУХТ, каф. ТЖХТ | <i>Технічне узгодження</i> Бойчук Т.М. | <i>Вид документа</i> Пояснювальна записка | <i>Статус документа</i> | | | |
| НУХТ | <i>Розробник документа</i> Кияниця В.А. | ЗМІСТ | <i>ННІХТ.ХТ-4-14.025.161.006.КР.ПЗ</i> | | | |
| | <i>Документ затверджено</i> Носенко Т.Т. | | <i>Інд. змін.</i> | <i>Дата видання</i> 20.02.2025 | <i>Мова</i> ua | <i>Аркуш</i> 6/80 |

ВСТУП

Харчові добавки широко використовуються у сучасному світі. Наразі неможливо уявити виробництво сучасних продуктів харчування без застосування харчових добавок. Кожен продукт на ринку містить принаймні декілька харчових добавок [1].

Існує багато добавок, які належать до різних функціональних класів. Кожна добавка виконує свою певну функцію у рецептурі харчового продукту.

Сьогодні використання біологічних і харчових добавок у харчовій промисловості стало невід'ємною складовою технології. Для підвищення якості багатьох продуктів і для вдосконалення процесу в молочній промисловості використовуються фосфати [1].

Фосфорвмісні харчові добавки також використовуються у виробництві безалкогольних напоїв, хлібобулочних, кондитерських і м'ясних виробів як стабілізатори, регулятори кислотності, розпушувачі і барвники.

Але більшість із фосфатів використовується у виробництві твердих і плавлених сирів. Харчові добавки E338 (фосфатна кислота H_3PO_4), E339 (фосфат натрію NaH_2PO_4 ; Na_2HPO_4 ; Na_3PO_4), E340 (фосфат калію KH_2PO_4 ; K_2HPO_4 ; K_3PO_4), E341 (фосфат кальцію $Ca(H_2PO_4)_2$; $CaHPO_4$; $Ca_3(PO_4)_2$), E450 (пірофосфати) $Na_2H_2P_2O_7$; $Na_4P_2O_7$; $CaH_2P_2O_7$) [1].

Фосфати володіють різноманітними технологічними властивостями: розчинні лужні фосфати мають виражений буферний потенціал для регуляції кислотності; поліфосфати пригнічують ріст грампозитивних бактерій, що може значно збільшити термін зберігання продуктів; трикальцій фосфат - використовується у виробництві хлібобулочних виробів, спеціальних напоїв, сухого та згущеного молока, морозива, риби та м'ясного фаршу, алкогольних напоїв, напівфабрикатів, сухих сніданків, продуктів швидкого приготування, кондитерських виробів, розпушувачів, сирних спредів [1].

| | | | | | | |
|---|---|--|--|-----------------------------------|-------------------|----------------------|
| <i>Відповідальна організація</i> НУХТ, каф. ТЖХТ | <i>Технічне узгодження</i> Бойчук Т.М. | <i>Вид документа</i> Пояснювальна записка | <i>Статус документа</i> | | | |
| <i>Власник документа</i> НУХТ | <i>Розробник документа</i> Кияниця В.А. | <i>Назва, додаткова назва</i> ВСТУП | <i>ННІХТ.ХТ-4-14.025.161.007.КР.ПЗ</i> | | | |
| | <i>Документ затверджено</i> Носенко Т.Т. | | <i>Інд. змін.</i> | <i>Дата видання</i> 20.02.2025 | <i>Мова</i> ua | <i>Аркуш</i> 7/80 |

Проте фосфати містяться в багатьох харчових продуктах і можуть викликати побічні реакції (алергію), особливо у дітей. Наслідком алергії є зміна психічної реакції, імпульсивність, рухове занепокоєння, порушення концентрації уваги, іноді підвищена агресивність [1].

Часте вживання в їжу харчових добавок E338, E339, E340, E341 призводить до розладів шлунково-кишкового тракту, блювання, діареї, нудоти та відрази до їжі, втрати ваги. Якщо здорова людина з їжею отримує багато фосфатів, то в її організмі порушується кальцієвий обмін, починається остеопороз (кістки стають крихкими і відносно легко ламаються). Продукти із додаванням фосфатів є дуже небезпечними для вагітних, оскільки є ймовірність народження дитини із різними порушеннями в роботі головного мозку та дихальної системи [1].

Було проведено дослідження продуктів харчування, що продаються в продуктових магазинах S Group (46% частки ринку Фінляндії у 2019 році), на вміст фосфоровмісних добавок. Дані отримано із веб-сайту foodie.fi. [2].

Серед харчових категорій поширеність варіювалася від 4% у снеках на основі молочних продуктів, до 67% у м'ясних продуктах. Загалом спостерігалось 17 різних добавок Фосфору.

Найбільш часто використовуваними добавками Фосфору були лецитин (E322), пірофосфат (E450) і трифосфат (E451) [2].

Поширеність добавок Фосфору становила 36% у кінцевій вибірці (серед 5149 харчових продуктів) [2].

Фосфати є дозволеними харчовими добавками в ЄС відповідно до Додатків II і III до Регламенту (ЄС) № 1333/2008. Фосфат необхідний для всіх живих організмів, засвоюється на 80-90% у вигляді вільного ортофосфату, який виділяється через нирки. Група експертів вважає, що фосфати мають низьку гостру токсичність при пероральному прийомі, і немає занепокоєння щодо їх генотоксичності та канцерогенності. Комісія встановила групову допустиму добову норму споживання (ДДН) для фосфатів, виражену через Фосфор, у 40 мг/кг маси тіла людини на добу [3].

Предметом дослідження є пірофосфат натрію.

Об'єктом дослідження є технологія виробництва пірофосфату натрію.

Метою роботи було: провести аналіз літературних джерел, розробити принципову і апаратурно-технологічну схему виробництва пірофосфату натрію, розрахувати матеріальний баланс.

Актуальність теми полягає у тому, що добавки емульгатори, які впливають на консистенцію харчових продуктів, необхідні при виробництві багатьох продуктів харчової промисловості.

Завдання роботи:

1. Проаналізувати літературні джерела щодо виробництва пірофосфату натрію $\text{Na}_4\text{P}_2\text{O}_7$.
2. Аналіз можливих методів отримання пірофосфату натрію, складання принципово-технологічної схеми.
3. Запропонувати метод удосконалення технології виробництва харчової добавки пірофосфату натрію.
4. Розрахувати матеріальний баланс кожної стадії виробництва.
5. Розрахувати техніко-економічні показники.
6. Зробити підбір обладнання та розробити апаратурно-технологічну схему виробництва.

РОЗДІЛ 1 АНАЛІТИЧНИЙ ОГЛЯД НАУКОВО-ТЕХНІЧНОЇ ЛІТЕРАТУРИ

1.1 Характеристика сировини

Na_2CO_3 - натрій карбонат, кальцинована сода.

NaH_2PO_4 - натрій дигідрофосфат.

1) Карбонат натрію: молярна маса 106 г/моль; густина 2,53 г/см³; T(плавлення) 852 °C. Безбарвна кристалічна речовина, добре розчинна у воді [4].

Таблиця 1.1 – Характеристика кальцинованої соди

| Карбонат натрію, кальцинована сода | |
|------------------------------------|--------------------------|
| Формула | Na_2CO_3 |
| молярна маса | 106 г/моль |
| густина | 2,53 г/см ³ |
| T(плавлення) | 852 °C |

Карбонат натрію (Na_2CO_3), також відомий як кальцинована сода, є неорганічною сіллю, яка широко використовується у виробництві скла, миючих засобів, мила та хімічних речовин. Він використовується безпосередньо для очищення води та як важлива сировина для виробництва інших хімікатів для очищення води. Найбільше використання карбонату натрію в США – це виробництво скла [4].

Карбонат натрію використовується безпосередньо у водопідготовці для регулювання рН і пом'якшення води.

Карбонат натрію використовується для виробництва моно- і динатрій ортофосфату і силікату натрію [4].

Карбонат натрію має широкий спектр застосування. Основне використання карбонату натрію як флюсу для зниження температури плавлення кремнезему SiO_2 в процесах виробництва скла. Він також широко використовується в хімічному виробництві для мила, миючих засобів та інших хімікатів, а також для

| | | | | | | |
|--|--------------------------------------|---|---------------------------------|----------------------------|------------|----------------|
| Відповідальна організація НУХТ, каф. ТЖХТ | Технічне узгодження Бойчук Т.М. | Вид документа Пояснювальна записка | Статус документа | | | |
| Власник документа НУХТ | Розробник документа Кияниця В.А. | Назва, додаткова назва РОЗДІЛ 1 АНАЛІТИЧНИЙ ОГЛЯД НАУКОВО-ТЕХНІЧНОЇ ЛІТЕРАТУРИ | ННІХТ.ХТ-4-14.025.161.010.КР.ПЗ | | | |
| | Документ затверджено Носенко Т.Т. | | Інд. змін. | Дата видання 20.02.2025 | Мова ua | Аркуш 10/80 |

десульфурації димових газів електростанцій, що працюють на викопному паливі.

У 2019 році на виробництво скла припадало приблизно 47% загального споживання карбонату натрію. На хімічну промисловість припадало приблизно 30% від загального обсягу продажів карбонату натрію [4].

Хоча значна частина світового виробництва карбонату натрію виробляється синтетичним шляхом шляхом взаємодії аміаку, розчиненого в хлориді натрію, з вуглекислим газом, внутрішній комерційний ринок США майже виключно покладається на природні джерела з 2000 року [4].



Трона, суміш карбонату натрію, гідрокарбонату натрію, і води, знайдено в багатих родовищах у Вайомінгу. Басейн Грін-Рівер у Вайомінгу є домом для найбільших у світі природних покладів трони. Існує два основних способи видобутку трони: забійний і кімнатно-стовповий. Після того, як трона була видобута, вона транспортується на поверхню для переробки в природний карбонат натрію Na_2CO_3 . Трону подрібнюють і кальцинують з подальшим випарюванням за допомогою випарних кристалізаторів для отримання кристалів моногідрату карбонату натрію. Кристали концентруються, зневоднюються і сушать, щоб отримати безводний карбонат натрію [4].

Карбонат натрію стабільний і не реагує в широкому діапазоні температур, тому його слід зберігати в прохолодному, сухому середовищі. Вплив високої вологості може спричинити розкладання продукту та перетворення на натрій бікарбонат. При належному зберіганні карбонат натрію може мати термін придатності приблизно 6 місяців [4].

Загальне внутрішнє виробництво карбонату натрію в США становило приблизно 11 700 мільйонів кілограмів (млн кг) у 2019 році. Є п'ять внутрішніх виробничих центрів: чотири у Вайомінгу та одне в Каліфорнії. Найбільше у світі родовище трони розташоване в басейні Грін-Рівер у штаті Вайомінг [4].

У 2021 році США посіли перше місце у світі за загальним обсягом експорту та 22 місце за загальним імпортом карбонату натрію. У 2021 році Мексика посіла перше місце у світі за загальним імпортом карбонату натрію [4].

Дигідрофосфат натрію NaH_2PO_4 .

2) На зовнішній вигляд це білий дрібний кристалічний порошок. Молярна маса: 120 г/моль [5].

Таблиця 1.2 – Характеристика дигідрофосфату натрію

| Дигідрофосфат натрію, біфосфат натрію | |
|---------------------------------------|------------------------------------|
| Формула | NaH_2PO_4 |
| Молярна маса | 120 г/моль. |
| Як харчова добавка | E339i |
| Зовнішній вигляд | Білий дрібний кристалічний порошок |

Безводний дигідрофосфат натрію (NaH_2PO_4) сполука із широким спектром застосування в таких галузях, як фармацевтика, очищення води, харчова промисловість і хімічне виробництво. Безводний дигідрофосфат натрію володіє гарною розчинністю, і є важливою речовиною для різноманітних промислових процесів. Негігроскопічний – безводна форма стабільна в сухому середовищі та стійка до поглинання вологи [5].

Харчова промисловість. Ортофосфат натрію 1-заміщений із хімічною формулою NaH_2PO_4 є харчовою добавкою E339i.

Дигідрофосфат натрію NaH_2PO_4 використовується як харчова добавка, функціонуючи як фосфатний буфер для регулювання кислотності та покращення якості оброблених харчових продуктів [5].

Дигідрофосфат натрію (E339i, NaH_2PO_4) зазвичай використовують у розпушувачах, плавлених сирах та в процесах переробки м'яса.

Хімічна промисловість. Безводний дигідрофосфат натрію NaH_2PO_4 служить важливою сировиною для виробництва різних хімічних речовин, включаючи інші фосфати, миючі засоби та реагенти для водопідготовки [5].

1.2 Галузі використання

Пірофосфат натрію – це неорганічна сполука, сіль Натрію і дифосфорної кислоти. Ззовні – це твердий кристалічний порошок білого кольору. Має специфічний запах, смак - злегка кислий або відсутній. Добре розчиняється у воді [6].

У водних розчинах утворює кристалогідрати.

Молярна маса – 266 г/моль, густина – 2,45 г/см³, Т плавлення 890 °С. Формула: Na₄P₂O₇. Його розчинність у воді становить 5 г Na₄P₂O₇/100 г H₂O при 20 °С і 35 г/100 г H₂O при 80 °С [6].

Таблиця 1.3 – Характеристика пірофосфату натрію

| Формула | Na ₄ P ₂ O ₇ |
|--------------|---|
| Молярна маса | 266 г/моль |
| Густина | 2,45 г/см ³ |
| Т(плавлення) | 890 °С |
| Розчинність | 5 г/100 г води (20 °С); 35 г/100 г води (80 °С). |

Отримання відбувається хімічним методом у процесі дегідратації динатрійфосфату, а також деякими іншими шляхами [6].

Пірофосфат натрію – це один із восьми представників пірофосфатів, що активно використовуються в харчовій промисловості, перш за все, в переробці м'ясної продукції. Покращують органолептичні показники, консистенцію, виступають стабілізаторами кольору і гальмують окиснення.

Добавка під загальним кодом E450 об'єднує пірофосфати ди-, три- і тетра-натрію з індексами I, II і III відповідно (E450i - Na₂H₂P₂O₇; E450ii - Na₃HP₂O₇; E450iii - Na₄P₂O₇) [6].

Таблиця 1.4 – харчові добавки пірофосфати [31]

| Код харчової добавки | Формула | Назва українською |
|----------------------|--|----------------------------|
| 1 | 2 | 3 |
| E450(i) | Na ₂ H ₂ P ₂ O ₇ | Дигідропірофосфат натрію |
| E450(ii) | Na ₃ HP ₂ O ₇ | Моногідропірофосфат натрію |
| E450(iii) | Na ₄ P ₂ O ₇ | Пірофосфат натрію |

| 1 | 2 | 3 |
|------------|----------------|---------------------------|
| E450(v) | $K_4P_2O_7$ | Пірофосфат калію |
| E450(vi) | $Ca_2P_2O_7$ | Пірофосфат кальцію |
| E450(vii) | $CaH_2P_2O_7$ | Дигідропірофосфат кальцію |
| E450(viii) | $Mg_2P_2O_7$ | Пірофосфат магнію |
| E450(iv) | $K_2H_2P_2O_7$ | Дигідропірофосфат калію |

Таблиця 1.4 – харчові добавки пірофосфати [31]

| Код харчової добавки | Формула | Назва англійською |
|----------------------|-----------------|--------------------------------|
| E450(i) | $Na_2H_2P_2O_7$ | Disodium diphosphate |
| E450(ii) | $Na_3HP_2O_7$ | Trisodium diphosphate |
| E450(iii) | $Na_4P_2O_7$ | Tetrasodium diphosphate |
| E450(iv) | $K_2H_2P_2O_7$ | Dipotassium diphosphate |
| E450(v) | $K_4P_2O_7$ | Tetrapotassium diphosphate |
| E450(vi) | $Ca_2P_2O_7$ | Dicalcium diphosphate |
| E450(vii) | $CaH_2P_2O_7$ | Calcium dihydrogen diphosphate |
| E450(viii) | $Mg_2P_2O_7$ | Dimagnesium diphosphate |

Пірофосфати це багатofункціональні добавки до їжі, що мають значний перелік цінних технологічних властивостей: харчові стабілізатори, емульгатори, розпушувачі, регулятори кислотності, синергісти антиоксидантів, комплексоутворювачі, закріплювачі кольору, утримувачі вологи і солі-плавники. Також у спектрі їх дії подовження терміну придатності харчових продуктів (виступають антиоксидантами) [6].

Цю харчову добавку використовують при обробці риби, м'яса та консервуванні м'ясопродуктів, виготовленні молодого і плавленого сиру із метою запобігання розшаруванню і зморщуванню (9 г/кг), хлібобулочної, макаронної та іноді

молочної продукції. З її участю покращують структуру фаршу (до 0,3% від загальної маси) і підвищують стійкість емульсії при розбуханні білків і формуванні бульйонних/жирових потьоків у процесі варіння м'ясної сировини. Так, ковбаса не має жирових підтікань, сир стає пружним, а кондитерська помадка – м'якою і естетичною [6].

Часто без E450 не обійтися, якщо потрібно розпушити тісто, отримати потрібну консистенцію, уповільнити окислювальні процеси, досягти вологозв'язування і емульгування. При заморожуванні картоплі захищає її від потемніння, а потім, при приготуванні, сприяє збереженню структури. Регулятором рН служить у безалкогольних напоях, чаї, їжі з фруктів і морозиві з ягід [6].

У кондитерській галузі, допустимо вводити цю речовину по 3 г/кг продукту. У м'ясо-, рибопродукти, сири, бульйони, заморожені овочі – 1-9 г/кг. У вершки, спреди для бутербродів, десерти з молока і соуси – до 5 г/кг. У сухі суміші та концентрати, а також пекарський і яєчний порошок – до 10 г/кг. У протеїнові коктейлі – до 20 г/кг.

E450 допустимо вживати до 70 мг/кг маси тіла на добу [6].

Пірофосфат натрію $\text{Na}_4\text{P}_2\text{O}_7$ є важливим різновидом конденсованого фосфату. Незалежно від того, чи це промисловий чи харчовий продукт, його використання поступається лише триполіфосфату натрію $\text{Na}_5\text{P}_3\text{O}_{10}$ [9].

У промисловості його в основному використовують як хелатний агент, знежирювач; засіб для очищення води, друку та фарбування; відбілювач, диспергатор тощо.

У харчовій промисловості його використовують для утримання вологи в харчових продуктах (вологоутримуючий агент) та в якості антиоксиданта, що разом призводить до покращення якості продуктів [9].

1.3. Стан сировинної бази

У США знаходиться найбільше в світі родовище природного джерела карбонату натрію [4].

Мононатрій фосфат (NaH_2PO_4) є широко використовуваним похідним продуктом фосфорної кислоти. Мононатрій фосфат використовується безпосередньо для очищення води, або в суміші з поліфосфатами для контролю корозії

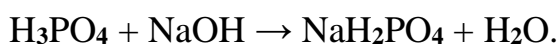
та інгібування накипу, а також як вихідний матеріал у виробництві поліфосфатів натрію [7].

Найбільш поширеним внутрішнім використанням мононатрійфосфату є виробництво кормів для тварин і добрив.

Мононатрійфосфат NaH_2PO_4 широко використовується в добривах і кормах для тварин як гранульований фосфатний компонент. Інші значні сфери використання включають використання як буферного агента в промислових процесах, як харчова добавка (E339i), емульгатор, стабілізатор рН, затверджувач; у рецептурах миючих засобів; і в обробці води [7].

Більшість мононатрійфосфату, виробленого в США, починається з фосфорної кислоти H_3PO_4 та гідроксиду натрію NaOH , або карбонату натрію Na_2CO_3 . Використовується фосфорна кислота мокрого способу, яка була додатково сконцентрована та оброблена для отримання продукту високої чистоти, або термічна фосфорна кислота [7].

Метод 1:



Метод 2:



В обох методах фосфорну кислоту нейтралізують або гідроксидом натрію, або карбонатом натрію [7].

Утворюються кристали фосфату, які виділяються з розчину. На основі мольного співвідношення фосфорної кислоти та карбонату натрію або гідроксиду натрію отримують суспензію мононатрійфосфату, динатрійфосфату або суміші мононатрійфосфату та динатрійфосфату. Гідратовані кристали можуть бути зневоднені в обертовій печі для отримання безводного мононатрійфосфату [7].

Мононатрійфосфат переважно поставляється у вигляді розчину, але також доступний у вигляді твердої речовини (порошку), транспортується в контейнерах і навалом вантажівками, залізницею, баржами та кораблями.

Мононатрійфосфат хімічно стабільний і, як правило, не реагує з іншими речовинами при зберіганні. При належному зберіганні фосфат натрію може мати термін придатності приблизно 24 місяці [7].

Загальний зареєстрований обсяг внутрішнього виробництва мононатрійфосфату для комерційного продажу в США становив приблизно 11,5 мільйонів кілограмів (млн кг) у 2019 році. Найбільші звітні вітчизняні виробники мононатрійфосфату у 2019 році були Hawkins Chemical Company, Mosaic Company та Carus Corporation [7].

При цьому внутрішнє виробництво мононатрійфосфату (11,5 млн кг) становило 96% усього виробництва.

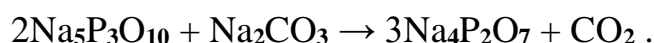
У 2021 році США посіли п'яте місце у світі за загальним експортом і перше місце за загальним імпортом мононатрію та динатрію фосфатів. У 2021 році Китай посів перше місце у світі за загальним експортом [7].

1.4 Аналіз існуючих технологій виробництва

1) Спосіб виробництва тетранатрій пірофосфату (TSPP) з триполіфосфату натрію $\text{Na}_5\text{P}_3\text{O}_{10}$ (STPP) та карбонату натрію Na_2CO_3 . (або натрієвої солі, здатної утворювати карбонат натрію при кальцинуванні) [8].

$\text{Na}_5\text{P}_3\text{O}_{10}$ має такі назви: пентанатрій трифосфат, натрій трифосфат, триполіфосфат натрію.

Мольне співвідношення натрію до фосфору приблизно до 2, суміш подрібнюють і нагрівають до температури від 300 °C до 700 °C [8].



Триполіфосфат натрію (STPP) і, меншою мірою, тетранатрій пірофосфат (TSPP) добре відомі конденсовані фосфати, що використовуються в промисловості миючих засобів. Обидва зазвичай готуються шляхом зневоднення і прожарювання ортофосфатів натрію [8].

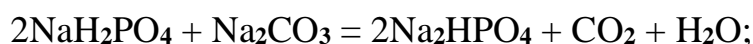
Поліфосфати лужних металів отримують за допомогою різноманітних процесів, таких як прожарювання в обертових печах, розпилювальних сушарках тощо. Ці процеси виробляють тонко подрібнені частинки.

Триполіфосфат натрію плавиться при 622 °C з утворенням кристалічного пірофосфату натрію $\text{Na}_4\text{P}_2\text{O}_7$ та рідкого метафосфату [8].

2) Спосіб виробництва із дигідрофосфату натрію NaH_2PO_4 і кальцинованої соди Na_2CO_3 [9].

Технологія приготування пірофосфату натрію $\text{Na}_4\text{P}_2\text{O}_7$ включає наступні етапи:

1. Побічний продукт виробництва мурашиної кислоти (дигідрофосфат натрію NaH_2PO_4) і кальциновану соду Na_2CO_3 поміщають у реакційну ємність для нейтралізації та піддають взаємодії у водному середовищі для отримання суспензії динатрію гідрофосфату Na_2HPO_4 . Хімізм процесу наступний [9]:



2. Отримана суспензія динатрію гідрофосфату Na_2HPO_4 подається в обертову піч за допомогою насоса високого тиску, де відбувається реакція дегідратації за високих температур 500-550 °C [9]:

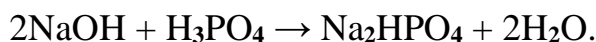


3. Продукти реакції відокремлюють і охолоджують з утворенням продукційного пірофосфату натрію $\text{Na}_4\text{P}_2\text{O}_7$ [9].

Продукт пірофосфат натрію має високу чистоту та майже немає домішок, досягає рівня якості продукту першого класу, має високий вихід і низьку вартість, є екологічно чистим [9].

3) Спосіб виробництва із фосфорної кислоти і каустичної соди [10].

В іншому процесі фосфору кислоту H_3PO_4 та каустичну соду NaOH окремо дозують у розпилювальну сушильну башту, щоб використати тепло нейтралізації [10]:

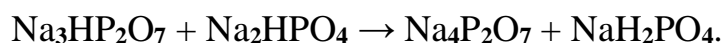


Тетранатрій дифосфат (пірофосфат натрію) $\text{Na}_4\text{P}_2\text{O}_7$ отримують прожарюванням динатрію гідрофосфату Na_2HPO_4 при 300-900 °C :



4) Спосіб одержання із пентанатрій трифосфату $\text{Na}_5\text{P}_3\text{O}_{10}$ [10].

При нагріванні до 100-120 °C гексагідрат гідролізується з утворенням моно- (NaH_2PO_4) і дифосфату натрію ($\text{Na}_4\text{P}_2\text{O}_7$):



При подальшому нагріванні до 140 – 220 °С продукти гідролізу повторно конденсуються з утворенням безводного $\text{Na}_5\text{P}_3\text{O}_{10}$ [10].

1.5 Допоміжні речовини у виробництві (вода, повітря).

При виробництві пірофосфату натрію $\text{Na}_4\text{P}_2\text{O}_7$ використовується дистильована вода як дисперсійне середовище (для утворення суспензії гідрофосфату натрію), а також очищене повітря і вода як теплоносії.

Теплоносії у виробництві:

- гаряча вода для обігріву реактора (подається в сорочку реактора для синтезу гідрофосфату натрію Na_2HPO_4);
- очищене повітря для охолодження порошку пірофосфату натрію (подається в охолоджувач порошоків);
- холодна вода для охолодження вуглекислого газу (подається в кожухотрубний теплообмінник)
- водяна пара для нагріву вуглекислого газу (подається в калорифер).

Існують різні методи знесолення води. Серед них виділяють мембранні та іонообмінні методи [24].

Знесолювання (демінералізація) води. Знесолювання полягає, у вилученні з води розчинених речовин перш за все, неорганічних солей. Знесолювання може бути повним, якщо вилучаються всі розчинені солі, або частковим: із води виводяться лише деякі розчинені сполуки чи йони.

До часткового знесолювання належить, наприклад, пом'якшення води, яке застосовується також для вилучення із стічних вод іонів важких металів та інших токсичних домішок [24].

Фізичні методи знесолення діляться на криогенні та мембранні.

Криогенні методи здійснюються виморожуванням і кристалізацією газогідратів. Виморожування ґрунтується на різній температурі замерзання водних

розчинів і води як розчинника. За температури, нижчої від температури замерзання, вода утворює кристалики льоду. Під час росту кристалика іношродні речовини виштовхуються до межі розділу фаз рідина-кристал. Внаслідок цього утворені кристали практично позбавлені домішок. Між кристалами льоду залишається рідина – водний розчин солі (розсіл), температура замерзання якого є, як відомо, нижчою. Густина розсолу переважає густину льоду, внаслідок чого ці фази розшаровуються. Після видалення і промивання лід розтоплюють, отримуючи чисту знесолену воду [24].

Мембранні методи знесолення води за сутністю процесів є аналогічними до мембранного розділення рідкофазової сировини – вони ґрунтуються на різній проникності розчинених речовин через напівпроникну мембрану. На перший погляд ці методи є простими, але насправді вони відбуваються за доволі складними механізмами внаслідок дії різних за природою рушійних сил (різниць парціальних тисків, концентрацій, хімічної спорідненості тощо) [24].

Найважливішими **мембранними** процесами, що застосовуються для повного або часткового знесолення, є зворотний осмос, ультра-, нано- та мікрофільтрування, діаліз, первапорація, мембранна дистиляція [24].

1) *Зворотний осмос* – це процес фільтрування розчинів під тиском крізь мембрани, які повністю пропускають молекули води і повністю або частково затримують молекули чи йони розчинених речовин. Якщо до розчину, що знаходиться з одного боку мембрани, прикласти тиск, який перевищує осмотичний тиск розчину певної концентрації, то розчинник буде переноситись у напрямку, протилежному, як у явищі осмосу – відбувається зворотний осмос (гіперфільтрація). Рушійною силою такого процесу є різниця тисків по обидва боки мембрани [24].

2) *Ультрафільтрування* – це процес баромембранного вилучення, а також концентрування і фракціонування розчинів високомолекулярних сполук. Він відбувається під дією різниці тисків з обох боків мембрани, що становить 0,05...0,5 МПа. Ультрафільтрування, на відміну від зворотного осмосу, застосовують для вилучення сполук, молекулярна маса яких є набагато більшою від молекулярної маси води. Схожим є метод нанофільтрування, але він відбувається

за робочих тисків 1...2 МПа і призначений для очищення води від речовин з великими молекулярними масами (до 300...500) [24].

3) Рушійною силою *діалізу* є градієнт концентрацій з обох боків мембран. Процес відбувається з використанням непористих (дифузійних) мембран і застосовується для вилучення речовин з порівняно високою молекулярною масою [24].

4) *Первапорація* – це мембранний процес, рушійною силою якого є різниця парціальних тисків пари або градієнт концентрацій розчиненої речовини по обидва боки мембрани, які створюються внаслідок різниці температур або тисків.

Застосовується цей метод переважно для очищення води від летких органічних речовин [24].

До фізико-хімічних методів знесолення належить електродіаліз, який полягає у перенесенні йонів електроліту через селективні іонообмінні мембрани під дією постійного електричного струму [24].

Іонообмінний метод очищення води застосовують для знесолення та очистки води від йонів металів та інших домішок. Сутність іонного обміну полягає в здатності іонообмінних матеріалів забирати з розчинів електроліту йони в обмін на еквівалентну кількість йонів іонообмінної смоли [24].

Очищення води здійснюють іонітами – синтетичними іонообмінними смолами, виготовленими у вигляді гранул розміром 0,2 ... 2 мм. Іоніти виготовляють з нерозчинних у воді полімерних речовин, що мають на своїй поверхні рухливий іон (катіон або аніон), який за певних умов вступає в реакцію обміну з іонами того ж знаку, що містяться у воді. Розрізняють сильно і слабокислотні катіоніти (в H^+ або Na^+ формі); та сильно і слабо-основні аніоніти (в OH^- або сольовій формі), а також іоніти змішаної дії [24].

Іонообмінні смоли (іоніти) мають можливість здійснення регенерації. Після виснаження робочої обмінної ємності (РОЄ) іоніту він втрачає здатність обмінюватися іонами і його необхідно регенерувати.

Регенерація проводиться насиченими розчинами, вибір яких залежить від типу іонообмінної смоли. Наприклад, розчин натрій хлориду $NaCl$ для регенерації Na^+ - катіонітів, а соляна кислота HCl – для регенерації H^+ - катіонітів [24].

(Процеси відновлення, як правило, протікають в автоматичному режимі. На регенерацію зазвичай витрачають близько 2 годин, з них на розпушування 10-15 хв, на фільтрування регенеруючого розчину 25-40 хв, на відмивання 30-60 хв).

Іонообмінну очистку води здійснюють послідовним фільтруванням води через катіоніти і аніоніти [24].

Повітря в промисловості

Головними складовими частинами повітря (біля земної поверхні) є азот N_2 - 78,08 % об'єму, кисень O_2 - 20,96 % об'єму та інертні гази - 0,94 % об'єму, у тому числі аргон (Ar) - близько 0,9 % об'єму. Кількість цих газів у повітрі не змінюється, тому їх називають *постійними* складовими частинами повітря [24].

Повітря в технологічних цілях використовується як:

- 1) теплоносій та холодоагент у технологічних процесах;
- 2) робоче тіло для здійснення транспортування (пневмотранспортування) твердих подрібнених матеріалів (порошків) і перемішування рідин (пневматичне перемішування), а також диспергування рідини та твердих частинок за допомогою форсунок чи інших механічних пристроїв;
- 3) реагент у хіміко-технологічних процесах (ХТП) окиснення [24].

1.6 Вуглекислий газ як об'єкт удосконалення технології

Удосконалення технології полягає у вловлюванні вуглекислого газу, його подальшому осушуванні від водяної пари, і стиснення вуглекислого газу із наповненням балонів.

1) CO_2 як парниковий газ

Спостереження за парниковим ефектом спонукає до розгляду всіх можливостей скорочення антропогенних викидів вуглекислого газу CO_2 . Одним з ключових методів, який був предметом численних досліджень, є уловлювання та зберігання вуглекислого газу [19].

В останні роки спостерігаються прогресуючі зміни клімату, що спричиняють небажані атмосферні явища та негативно впливають на навколишнє середовище та умови життя на землі. Безперервний розвиток економіки та індустріалізація спричиняють підвищення температури, яке різко прискорилося в останні

роки [19].

Вуглекислий газ CO_2 - це парниковий газ, якому приділяється особлива увага. Найбільші викиди CO_2 відбуваються під час спалювання бурого та кам'яного вугілля.

Концентрація парникових газів в атмосфері зростає, що спричиняє підвищення температури, а отже, збільшення випаровування та збільшення вмісту водяної пари в атмосфері. Прогресуючий парниковий ефект змушує розглядати кожну можливість скорочення викидів парникових газів в атмосферу [19].

Сьогодні багато дослідників погоджуються, що антропогенні парникові гази провокують зміну клімату. З 1750 року глобальна концентрація вуглекислого газу CO_2 , метану CH_4 та закису азоту N_2O в атмосфері різко зросла через діяльність людини [20].

Глобальне збільшення CO_2 вважається головним чином спричинене через використання викопного палива та землекористування. Згідно із прогнозом Міжнародного енергетичного агентства (МЕА), викопне паливо все ще відіграватиме важливу роль у наступні десятиліття у задоволенні світового попиту на енергію [20].

Серед викопного палива вугілля має найбільші запаси, проте вугілля також має найвищі питомі викиди вуглекислого газу CO_2 серед викопного палива [20].

2) Утилізація CO_2

Для класифікації різних форм утилізації CO_2 використовуються дві категорії: пряма утилізація CO_2 ; та перетворення CO_2 на хімічні речовини та енергетичні продукти [21].

Щодо прямого використання CO_2 , окрім його застосування в безалкогольних напоях, зварюванні, піноутворенні та пропелентах, також CO_2 використовується як надкритичний розчинник.

Перетворення CO_2 на хімічні речовини та енергетичні продукти є перспективним способом не лише зменшення викидів CO_2 , але й отримання більшої економічної цінності. На сьогоднішній день можливо перетворити CO_2 за допомогою водню H_2 на інші хімічні речовини та енергію [21].

Використання діоксиду карбону CO_2 для виробництва хімічних речовин, таких як сечовина та циклічні карбонати, є перспективним і може бути рішенням для зменшення викидів CO_2 .

Перетворення CO_2 на енергетичні продукти, наприклад, метанол, диметилкарбонат (DMC) та диметиловий ефір (DME), вважається альтернативним споживанням більшої кількості CO_2 через потенційно великий масштаб ринку [21].

Більше того, виробництво енергетичних продуктів може зменшити залежність від викопного палива, тим самим стимулюючи зростання ринку утилізації CO_2 .

Оскільки CO_2 є лише джерелом вуглецю без водню, для його використання в хімічних або енергетичних продуктах слід розробляти чисті, стійкі та дешеві джерела водню [21].

3) Можливі домішки та зневоднення CO_2

Газу із формулою CO_2 відповідає ряд назв: вуглекислий газ, карбон(IV) оксид, діоксид карбону, діоксид вуглецю [19].

Прогресуючий парниковий ефект змушує розглядати кожен можливість скорочення викидів парникових газів в атмосферу.

Вуглекислий газ, що уловлюється, може містити воду та потребує зневоднення. Вміст води вище допустимих значень у транспортованому середовищі може призвести до утворення вугільної кислоти H_2CO_3 , яка може блокувати потік. Процес зневоднення газу запобігає утворенню гідратів під впливом високого тиску та запобігає корозії установки [19].

Зневоднений CO_2 необхідно стискати до потрібного тиску для транспортування (наприклад трубопроводом) до місця зберігання (установки закачування). Вміст H_2O в газовому потоці має бути достатньо низьким, щоб запобігти корозії компонентів установки.

Якщо газ стискається, а потім охолоджується до постійної температури між етапами стиснення, вода конденсується і її необхідно зливати після кожного етапу стиснення [19].

Етап зневоднення є відносно невеликою частиною повного ланцюга уловлювання та зберігання вуглекислого газу (CCS), проте цей блок відіграє важливу роль у підтримці цілісності системи [22].

Перед транспортуванням по трубопроводах з вуглецевої сталі необхідно зневоднювати потік CO₂ у більшості процесів уловлювання CO₂.

Низький вміст вологи має вирішальне значення для запобігання або мінімізації як корозії в трубопроводах із вуглецевої сталі, так і утворення кристало-гідратів (тобто твердих кристалічних сполук) [22].

Тому процес зневоднення вуглекислого газу має бути надійним, мінімізуючи кількісний вміст домішок в осушеному CO₂.

Загалом, існують такі різні типи методів **зневоднення** для сушіння газів, які підходять і для потоків діоксиду вуглецю CO₂ [22]:

1. Охолодження (наприклад, компресорне ступінчасте охолодження);
2. Охолодження Джоуля Томсона (адіабатичне охолодження шляхом розширення газу);
3. Холодильний метод (охолодження газу холодоагентом);
4. Турборозширення (ізотропне охолодження з розширенням газу).
5. За допомогою хімічних осушувачів:

- Тверді осушувачі - силікагель SiO₂, активований оксид алюмінію Al₂O₃. Молекулярні сита (синтетичні цеолітні алюмосилікати, особливо типи 3A та 4A, підходять для дегідратації CO₂) [22];

- Рідкі осушувачі - метанол, гліцерин, триетиленгліколь (ТЕГ), та інші гліколи (етиленгліколь, діетиленгліколь та тетраетиленгліколь).

6. Мембрани (на сьогодні не використовуються ні для розділення CO₂, ні для зневоднення CO₂, але дослідження та розробки в цій галузі тривають) [22].

Деякі із цих методів не дозволяють досягти низького рівня вологості. Однак, це прості, недорогі процеси, які часто потрібні в будь-якому процесі уловлювання CO₂ (наприклад, компресорне міжступеневе охолодження) [22].

4) Вуглекислий газ як холодоагент

Хлорфторвуглеці (ХФВ) виведені із використання, а гідрохлорфторвуглеці (ГХФВ) перебувають у процесі поступового виведення (з використання в якості холодоагентів) через їх потенціал руйнувати озоновий шар земної атмосфери [26].

Вуглекислий газ CO_2 всебічно розглядається як альтернативний холодоагент, що замінює гідрохлорфторвуглеці (ГХФВ) та хлорфторвуглеці (ХФВ) через його нульовий потенціал руйнування озонового шару O_3 атмосфери.

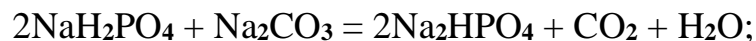
Речовини, які не мають потенціалу руйнування озонового шару та не мають (або мають незначний потенціал глобального потепління), наприклад, рідини, такі як вуглекислий газ (CO_2), аміак (NH_3), вуглеводні (C_xH_y) та вода (H_2O), розглядаються як альтернативні холодоагенти [26].

Вуглекислий газ (CO_2) нетоксичний, негорючий, має нульовий потенціал руйнування озонового шару та незначний потенціал парникового ефекту як холодоагент. Таким чином, він близький до ідеального холодоагенту.

Холодильні системи із елементом CO_2 отримують серйозну увагу для автомобільного застосування завдяки своїй високій об'ємній теплоємності [26].

1.7 Обґрунтування вибору технології

Для виробництва цільового продукту – пірофосфату натрію $\text{Na}_4\text{P}_2\text{O}_7$ було обрано технологію виробництва із кальцинованої соди Na_2CO_3 та дигідрофосфату натрію NaH_2PO_4 . Тобто сировиною є дві неорганічні солі Натрію. Синтез пірофосфату натрію проходить у 2 стадії [9]:



Перевага даного способу виробництва полягає в тому, що чистота цільового продукту досягає 97,5%. За іншими способами виробництва досягається менша чистота пірофосфату натрію [9].

Під час виробництва пірофосфату натрію за обраною технологією утворюється вуглекислий газ CO_2 як побічний продукт [9]. Удосконалення обраної технології полягає у вловлюванні вуглекислого газу, його подальшому осушенні та стисненні із наповненням балонів [19].

РОЗДІЛ 2 ТЕХНОЛОГІЧНА ЧАСТИНА

2.1 Характеристика вихідної сировини

Na_2CO_3 - натрій карбонат, кальцинована сода.

NaH_2PO_4 - натрій дигідрофосфат.

1) Використовуємо кальциновану соду 98% чистоти. Карбонат натрію, також відомо як кальцинована сода, є неорганічною хімічною сполукою. Ця сполука одержується із подвійної солі під назвою трона, яка містить карбонат натрію Na_2CO_3 та гідрокарбонат натрію NaHCO_3 [11].

У чистому вигляді це білий порошок без запаху. Одним із основних застосувань Na_2CO_3 є пом'якшення води.

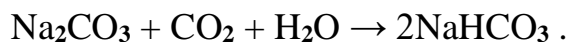
Таблиця 2.1 – Характеристика натрій карбонату

| | |
|-----------------------|--------------------------|
| Кальцинована сода | Na_2CO_3 |
| Молярна маса | 105,98 г/моль. |
| Густина | 2,54 г/см ³ |
| Температура плавлення | 851 °С |
| Точка кипіння | 1600 °С |

Хімічні властивості Na_2CO_3 . Безводний карбонат натрію стійкий до нагрівання. Може плавитися, не розкладаючись, до 852 °С [11].

Водні розчини натрій карбонату є слабколужними внаслідок гідролізу, під час якого вивільняються іони OH^- [11].

Водні розчини натрій карбонату Na_2CO_3 поглинають вуглекислий газ з повітря, утворюючи натрій гідрокарбонат NaHCO_3 :



Використовується як пом'якшувач води - осаджує жорстку воду, що містить іони магнію та кальцію [11].

2) Біфосфат натрію, натрій дигідрофосфат безводний NaH_2PO_4

| | | | | | | |
|--|--------------------------------------|---|---------------------------------|----------------------------|------------|----------------|
| Відповідальна організація НУХТ, каф. ТЖХТ | Технічне узгодження Бойчук Т.М. | Вид документа Пояснювальна записка | Статус документа | | | |
| Власник документа НУХТ | Розробник документа Кияниця В.А. | Назва, додаткова назва РОЗДІЛ 2 ТЕХНОЛОГІЧНА ЧАСТИНА | ННІХТ.ХТ-4-14.025.161.027.КР.ПЗ | | | |
| | Документ затверджено Носенко Т.Т. | | Інд. змін. | Дата видання 20.02.2025 | Мова ua | Аркуш 27/80 |

На вигляд – тверда речовина без запаху, біла кристалічна маса, сформована безбарвними кристалами. Сполука неорганічної природи, кисла сіль лужного металу Na і ортофосфорної кислоти H_3PO_4 [12].

Таблиця 2.2 – Характеристика натрій дигідрофосфату

| | |
|--------------------------------|--------------------------|
| Натрій дигідрофосфат | NaH_2PO_4 |
| Молярна маса | 119,98 г/моль |
| Густина | 0,9996 г/см ³ |
| Насипна щільність | 940 кг/м ³ |
| Температура плавлення | 650 °С |
| рН (1% водний розчин) при 25°С | 4,4 - 4,7 |

Здатний утворювати кристалогідрати, наприклад: натрію дигідрофосфат моногідрат $NaH_2PO_4 \cdot H_2O$; натрію дигідрофосфат дигідрат $NaH_2PO_4 \cdot 2H_2O$.

Однозаміщений фосфорнокислий натрій NaH_2PO_4 випускається хімічною промисловістю із вмістом основного компонента не менше 98 % [12].

2.2 Опис принципової технологічної схеми

Ця технологія виробництва натрій пірофосфату ($Na_4P_2O_7$) передбачає використання як сировини побічного продукту виробництва мурашиної кислоти - NaH_2PO_4 , який реагує з кальцинованою содою (Na_2CO_3).

Реагентом, який подається не у надлишку, є кальцинована сода (Na_2CO_3). Дигідрофосфат натрію (NaH_2PO_4) подається в надлишку, оскільки він є вторинним продуктом і його склад неможливо точно спрогнозувати - що робить складним точне дозування, тому його додають із запасом. Кальцинована сода (Na_2CO_3) визначає повне протікання реакції, що робить її лімітуючим агентом у процесі.

Технологія виробництва

Підготовка повітря

Фільтр забезпечує очищення до заданого рівня, після чого повітря подається на подальшу обробку або безпосередньо в технологічний процес. Повітря вентилятором надходить до газового фільтра, де відбувається видалення пилу, механічних домішок і небажаних газових компонентів. Після проходження

через фільтр очищене повітря спрямовується на стадію охолодження пірофосфату натрію після печі.

1. Синтез гідрофосфату натрію

Процес забезпечує утворення суспензії гідрофосфату динатрію (Na_2HPO_4) через реакцію між натрій дигідрофосфатом та кальцинованою содою. Для забезпечення ефективного змішування компонентів у реакторі встановлено рамну мішалку, яка працює на 50 обертів на хвилину. Час змішування складає 2 години, а для створення належної консистенції суспензії використовується співвідношення води до твердих агентів 3:1, що сприяє ефективному протіканню реакції.



2. Термічна дегідратація

Процес полягає в отриманні натрій пірофосфату ($\text{Na}_4\text{P}_2\text{O}_7$) шляхом дегідратації (зневоднення) гідрофосфату натрію Na_2HPO_4 при високих температурах.

Після нейтралізації, суспензію подають шестеренним насосом в обертову піч для подальшої обробки при температурі 500–550 °С. У печі відбувається дегідратація (зневоднення), в результаті чого дві молекули Na_2HPO_4 утворюють одну молекулу натрій пірофосфату ($\text{Na}_4\text{P}_2\text{O}_7$) за наступною реакцією [9]:



Процес триває протягом 300 хвилин, під час яких вода, що міститься в реакційній суміші випаровується. Залишився порошок який містить цільовий продукт [9].

3. Охолодження порошку пірофосфату натрію

Процес охолодження має на меті зниження температури отриманого порошку до безпечного рівня для подальших операцій і збереження його фізико-хімічних властивостей. Порошок пірофосфату натрію транспортером надходить до охолоджувача порошоків. Очищене повітря надходить в охолоджувач і рівномірно розподіляється всередині охолоджувальної камери [9].

На **рисунку 2.1** наведено принципову технологічну схему виробництва.

Гарячий порошок (550°C) поступає в зону охолодження через ролики апарату. В процесі переміщення – він проходить через потік повітря та поступово віддає тепло. Температура порошку знижується до 30°C завдяки інтенсивному теплообміну. Процес триває 60 хв [9].

4. Подрібнення цільового продукту

Після охолодження, необхідно подрібнити цільовий продукт. Пірофосфат натрію транспортером надходить до дезінтегратора, де подрібнюється до $0,35\text{ мм}$ (350 мкм). Подрібнення відбувається протягом однієї години. Процес триває 60 хв [9].

5. Фракціонування продукту

На цій стадії подрібнений пірофосфат натрію подається на сита, де потрібна фракція – порошок $0,30\dots 0,35\text{ мм}$ відділяється від пилу. Пил пірофосфату натрію – це фракція із меншим розміром частинок, ніж потрібно.

6. Фасування продукту

Цільовий продукт транспортером надходить до пакувальної машини, де він пакується в мішки по 25 кг . Після цього упакований продукт направляється на склад [9].

7. Уловлювання та стиснення CO_2

Удосконалення технології полягає у вловлюванні вуглекислого газу, його подальшому осушуванні від водяної пари (нагрів і охолодження), і стиснення вуглекислого газу із наповненням балонів:

1. Нагрівання газової суміші ($T_{\text{поч}} = 80^{\circ}\text{C}$, $T_{\text{кін}} = 100^{\circ}\text{C}$);
2. Охолодження (осушення) газової суміші ($T_{\text{поч}} = 100^{\circ}\text{C}$, $T_{\text{кін}} = 20^{\circ}\text{C}$);
3. Стиснення вуглекислого газу CO_2 . ($P_{\text{поч}} = 0,1\text{ МПа}$, $P_{\text{кін}} = 5\text{ МПа}$) [19].

2.3 Розрахунок матеріального балансу відділення (цеху)

Підготовка повітря

На стадію підготовки повітря надходить 3338,25 кг очищеного повітря.
Втрати при підготовці складають 0,25%.

Визначаємо масу втрат за формулою:

$$m(\text{втрат}) = 3338,25 * 0,25\% = 8,25 \text{ кг}$$

Тоді визначаємо масу очищеного повітря, яке надійде на стадію охолодження порошку пірофосфату натрію.

$$m(\text{очищеного повітря}) = 3338,25 - 8,25 = 3330 \text{ кг}$$

Отримані дані розрахунків було внесено до таблиці 2.3.

Таблиця 2.3 - Матеріальний баланс підготовки повітря

| Прихід | | Витрати | |
|---------------|----------------|-----------------|----------------|
| Речовина | Маса, кг | Речовина | Маса, кг |
| Повітря | 3338,25 | Очищене повітря | 3330 |
| | | Втрати | 8,25 |
| Всього | 3338,25 | Всього | 3338,25 |

1. Синтез пірофосфату натрію (термічна дегідратація)

За заданою виробничою продуктивністю 1т/добу потрібно виготовити із врахуванням втрат 5% 1050 кг пірофосфату натрію. При 100% конверсії розрахунок буде наступний:

Конверсія реагентів становить 100%.



1. Розраховуємо молярні маси учасників реакції за формулами

$$aM_{\text{Na}_2\text{HPO}_4} = 2 * 142 \text{ кг/кмоль} = 284 \text{ кг/кмоль}.$$

$$bM_{\text{Na}_4\text{P}_2\text{O}_7} = 1 * 266 \text{ кг/кмоль} = 266 \text{ кг/кмоль}.$$

$$rM_{\text{H}_2\text{O}} = 1 * 18 \text{ кг/кмоль} = 18 \text{ кг/кмоль}.$$

Проводимо перевірку результатів: $284 = 266 + 18$

2. Розраховуємо стехіометричну кількість Na_2HPO_4 необхідну для отримання 1050 кг цільового продукту.

$$m_{\text{Na}_2\text{HPO}_4} = \frac{aM_{\text{Na}_2\text{HPO}_4} \cdot m_{\text{Na}_4\text{P}_2\text{O}_7}}{bM_{\text{Na}_4\text{P}_2\text{O}_7}}$$

$$m_{\text{Na}_2\text{HPO}_4} = \frac{1050 * 284}{266} = 1121 \text{ кг}$$

3. Розраховуємо стехіометричну кількість води що утворилася.

$$m_{\text{H}_2\text{O}} = \frac{rM_{\text{H}_2\text{O}} \cdot m_{\text{Na}_4\text{P}_2\text{O}_7}}{bM_{\text{Na}_4\text{P}_2\text{O}_7}}$$

$$m_{\text{H}_2\text{O}} = \frac{1050 * 18}{266} = 71 \text{ кг}.$$

4. Розраховуємо технологічні втрати продукту що складають 1%.

$$1050 - 100\%, 1\% - x. x = 10.5 \text{ кг}.$$

Отримані дані зводимо в таблицю 2.4.

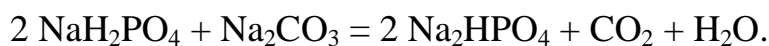
Таблиця 2.4 - Матеріальний баланс стадії термічної дегідратації (утворення пірофосфату натрію)

| Прихід | | Витрата | |
|--|--------------|---|-------------|
| Речовина | Маса, кг | Речовина | Маса, кг |
| Суспензія гідрофосфату натрію, в тому числі: - гідрофосфат натрію - вода як дисперсійне середовище | 1121 4227 | Порошок $\text{Na}_4\text{P}_2\text{O}_7$ | 1050 |
| | | Випарена вода, В тому числі реакційна | 71 |
| | | Як дисперсійне середовище | 4216,5 |
| | | Втрати | 10,5 |
| Всього | 5348 | Всього | 5348 |

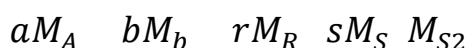
2. Синтез гідрофосфату натрію

Конверсія реагентів становить 100%.

Реакція для розрахунків:



1. Розраховуємо молярні маси учасників реакції за формулами



$$aM_{\text{NaH}_2\text{PO}_4} = 2 * 120 \text{ кг/кмоль} = 240 \text{ кг/кмоль.}$$

$$bM_{\text{Na}_2\text{CO}_3} = 1 * 106 \text{ кг/кмоль} = 106 \text{ кг/кмоль.}$$

$$rM_{\text{Na}_2\text{HPO}_4} = 2 * 142 \text{ кг/кмоль} = 284 \text{ кг/кмоль.}$$

$$sM_{\text{CO}_2} = 1 * 44 \text{ кг/кмоль} = 44 \text{ кг/кмоль.}$$

$$sM_{\text{H}_2\text{O}} = 1 * 18 \text{ кг/кмоль} = 18 \text{ кг/кмоль.}$$

Проводимо перевірку результатів за формулою:

$$240 \text{ кг/кмоль} + 106 \text{ кг/кмоль} = 284 \text{ кг/кмоль} + 44 \text{ кг/кмоль} + 18 \text{ кг/кмоль}$$
$$346 \text{ кг/кмоль} = 346 \text{ кг/кмоль}$$

Задані втрати становлять 1%.

Розрахунки кальцинованої соди

2. Знайдемо масу кальцинованої соди, яку необхідно додати для отримання Na_2HPO_4 в сумі 1121 кг.

$$m_{\text{Na}_2\text{CO}_3} = \frac{bM_{\text{Na}_2\text{CO}_3} \cdot m_{\text{Na}_2\text{HPO}_4}}{rM_{\text{Na}_2\text{HPO}_4}}$$
$$m_{\text{Na}_2\text{CO}_3} = \frac{1121 * 106}{284} = 418 \text{ кг}$$

Розрахунки дигідрофосфату натрію NaH_2PO_4

3. Знайдемо масу чистого дигідрофосфату натрію яку необхідно додати для отримання моно-гідрофосфату натрію Na_2HPO_4 в сумі 1121 кг.

$$m_{\text{NaH}_2\text{PO}_4} = \frac{aM_{\text{NaH}_2\text{PO}_4} \cdot m_{\text{Na}_2\text{HPO}_4}}{rM_{\text{Na}_2\text{HPO}_4}}$$
$$m_{\text{NaH}_2\text{PO}_4} = \frac{1121 * 240}{284} = 947 \text{ кг}$$

Розрахунки стосовно продукту CO_2

4. Знайдемо стехіометричну кількість продукту CO_2 :

$$m_{CO_2} = \frac{sM_{CO_2} \cdot m_{Na_2HPO_4}}{rM_{Na_2HPO_4}}$$

$$m_{CO_2} = \frac{1 * 44\text{кг/кмоль} \cdot 1121}{2 * 142\text{кг/кмоль}} = 174 \text{ кг.}$$

Розрахунки стосовно продукту H₂O

5. Знайдемо стехіометричну кількість продукту H₂O:

$$m_{H_2O} = \frac{sM_{H_2O} \cdot m_{Na_2HPO_4}}{rM_{Na_2HPO_4}}$$

$$m_{H_2O} = \frac{1 * 18\text{кг/кмоль} \cdot 1121 \text{ кг}}{2 * 142 \text{ кг/кмоль}} = 71 \text{ кг.}$$

Врахуємо, що додатково як середовище було додано води в співвідношенні сировина : вода 1:3. Кількість сировини що завантажується в реактор 947+418 кг. Кількість води 4095 кг.

Тоді визначаємо загальну масу води за формулою:

$$m(H_2O) = 71 + 4095 = 4166 \text{ кг.}$$

Отримані дані розрахунків було внесено до таблиці 2.5

Таблиця 2.5 - Матеріальний баланс синтезу гідрофосфату натрію

| Прихід | | Витрати | |
|----------------------|-------------|---|--------------------|
| Речовина | Маса, кг | Речовина | Маса, кг |
| Дигідрофосфат натрію | 948 | Суспензія гідрофосфату натрію, в тому числі: - гідрофосфат натрію - вода реакційна - вода в середовищі | 1121 71 4156 |
| Кальцинована сода | 418 | Вуглекислий газ | 174 |
| Вода | 4166 | Втрати | 10 |
| Всього | 5532 | Всього | 5532 |

3. Охолодження порошку пірофосфату натрію

На стадію охолодження надходить порошок пірофосфату натрію, що складається з 1050 кг $\text{Na}_4\text{P}_2\text{O}_7$. Як холодильний агент використовується очищене повітря у співвідношенні 1:3.

Втрати при охолодженні складають 1%. Визначаємо масу втрат порошку при охолодженні:

$$m(\text{втрат}) = (1050 * 1)/100 = 10,5 \text{ кг.}$$

Маса цільового продукту натрій пірофосфату, яка надійде на подрібнення складає 1039,5 кг

Отримані дані розрахунків було внесено до таблиці 2.6.

Таблиця 2.6 - Матеріальний баланс охолодження порошку пірофосфату натрію

| Прихід | | Витрати | |
|----------------------------|-------------|--------------------------------|-------------|
| Речовина | Маса, кг | Речовина | Маса, кг |
| Порошок пірофосфату натрію | 1050 | Охолоджений пірофосфат натрію | 1039,5 |
| Очищене повітря | 3330 | Використаний холодильний агент | 3330 |
| | | Втрати | 10,5 |
| Всього | 4380 | Всього | 4380 |

4. Подрібнення цільового продукту

На стадію надходить пірофосфат натрію. Втрати при подрібненні у дезінтеграторі становлять 1,5%.

Визначаємо втрати та масу подрібненого пірофосфату натрію, який буде отримано на стадії подрібнення цільового продукту:

$$m(\text{втрат}) = (1039,5 * 1,5)/100 = 15,6 \text{ кг.}$$

$$m(\text{Na}_4\text{P}_2\text{O}_7) = 1039,5 - 15,6 = 1024 \text{ кг.}$$

Отримані дані розрахунків було внесено до таблиці 2.7.

Таблиця 2.7 - Матеріальний баланс подрібнення цільового продукту

| Прихід | | Витрати | |
|---------------------------|----------|-------------------------------|----------|
| Речовина | Маса, кг | Речовина | Маса, кг |
| Порошок пірофосфат натрію | 1039,5 | Подрібнений пірофосфат натрію | 1024 |
| | | в тому числі: | 13,9 |
| | | пил кристали пірофосфату | 1010 |
| | | Втрати | 15,6 |
| Всього | 1039,5 | Всього | 1039,5 |

5. Стадія фракціонування

Вихідні дані: подрібнений пірофосфат натрію в тому числі: пил, кристали пірофосфату. Пил виокремлюємо на віброситі. Втрати складають 0,5%.

$$m(\text{втрат}) = (1024 * 0,5)/100 = 5,1 \text{ кг.}$$

Таблиця 2.8 - Матеріальний баланс стадії фракціонування

| Прихід | | Витрати | |
|--|----------|--|----------|
| Речовина | Маса, кг | Речовина | Маса, кг |
| Подрібнений пірофосфат натрію в тому числі: пил кристали пірофосфату | 1024 | Кристали пірофосфату потрібної фракції | 1005 |
| | 13,9 | Виокремлений пил | 13,9 |
| | 1010 | Втрати | 5,1 |
| Всього | 1024 | Всього | 1024 |

6. Фасування продукту

На стадію фасування надходить 1005 кг подрібненого пірофосфату натрію. Втрати при пакуванні становлять 0,5% і обумовлені пиловими викидами, залишками на обладнанні та втратами при транспортуванні всередині фасувальної лінії.

Визначаємо втрати та масу упакованого продукту:

$$m(\text{врат}) = (1005 * 0,5)/100 = 5 \text{ кг.}$$

$$m(\text{Na}_4\text{P}_2\text{O}_7) = 1005 - 5 = 1000 \text{ кг.}$$

Отримані дані розрахунків було внесено до таблиці 2.9.

Таблиця 2.9 - Матеріальний баланс стадії фасування продукту

| Прихід | | Витрати | |
|---|-----------------|--------------------|-----------------|
| Речовина | Маса, кг | Речовина | Маса, кг |
| Кристали пірофосфату потрібної фракції | 1005 | Упакований продукт | 1000 |
| | | Втрати | 5 |
| Всього | 1005 | Всього | 1005 |

Матеріальний баланс удосконаленої технології

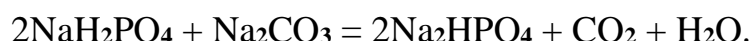
7. Уловлювання та стиснення CO₂

На стадії синтезу гідрофосфату натрію (у реакторі поз. 3) як побічний продукт виділяється вуглекислий газ [9].

Удосконалення технології полягає у вловлюванні вуглекислого газу, його подальшому осушуванні від водяної пари, і стиснення вуглекислого газу із наповненням балонів.

1. Нагрівання газової суміші;
2. Охолодження (осушення) газової суміші;
3. Стиснення вуглекислого газу CO₂ [19].

Під час виробництва пірофосфату натрію, як побічний продукт виділяється вуглекислий газ CO₂ за реакцією:



За матеріальним балансом (таблиця 2.3) утворюється 174 кг вуглекислого газу:

Таблиця 2.5 - Матеріальний баланс синтезу гідрофосфату натрію

| Прихід | | Витрати | |
|----------------------|-------------|--|-------------|
| Речовина | Маса, кг | Речовина | Маса, кг |
| Дигідрофосфат натрію | 948 | Суспензія гідрофосфату натрію, в тому числі: | |
| | | - гідрофосфат натрію | 1121 |
| | | - вода реакційна | 71 |
| | | - вода в середовищі | 4156 |
| Кальцинована сода | 418 | Вуглекислий газ | 174 |
| Вода | 4166 | Втрати | 10 |
| Всього | 5532 | Всього | 5532 |

1. Нагрівання газової суміші

Вуглекислий газ який містить вологу, надходить із реактора (поз. 3) за допомогою газодувки (поз. 13) в калорифер (поз. 14) і має початкову температуру 80 °С (Тпоч= 80 °С). В калорифері відбувається нагрівання газової суміші (СО₂ і водяної пари) до температури 100 °С (Ткін= 100 °С). Втрати приймаємо на рівні 0,1%. Калорифер обігрівается водяною парою.

$$m(\text{втрат}) = (174 \cdot 0,1) / 100 = 0,174 \text{ кг.}$$

$$m(\text{газу}) = 174 - 0,174 = 173,826 \text{ кг.}$$

Таблиця 2.10 - Матеріальний баланс стадії нагрівання газової суміші

| Прихід | | Витрати | |
|-----------------|------------|-----------------|------------|
| Речовина | Маса, кг | Речовина | Маса, кг |
| Вуглекислий газ | 174 | Вуглекислий газ | 173,826 |
| | | Втрати | 0,174 |
| Всього | 174 | Всього | 174 |

2. Охолодження (осушення) газової суміші

Нагрітий вуглекислий газ із калорифера (поз. **14**) надходить в кожухотрубний теплообмінник (поз. **15**) для охолодження і осушення. Внаслідок охолодження газу від температури 100 °С (Тпоч= 100 °С) до температури 20 °С (Ткін= 20 °С) відбувається конденсація водяної пари.

Приймаємо втрати суміші 0,1 %. Вуглекислий газ містить 2% вологи.

$$m(\text{втрат}) = (173,826 * 0,1) / 100 = 0,174 \text{ кг.}$$

$$m(\text{газової суміші}) = 173,826 - 0,174 = 173,652 \text{ кг.}$$

$$m(\text{конденсату}) = (2 * 173,652) / 100 = 3,47 \text{ кг.}$$

$$m(\text{вуглекислого газу}) = 173,652 - 3,47 = 170,182.$$

Таблиця 2.11 - Матеріальний баланс стадії охолодження (осушення) газової суміші

| Прихід | | Витрати | |
|-----------------|----------------|-----------------|----------------|
| Речовина | Маса, кг | Речовина | Маса, кг |
| Вуглекислий газ | 173,826 | Вуглекислий газ | 170,182 |
| | | Конденсат | 3,47 |
| | | Втрати | 0,174 |
| Всього | 173,826 | Всього | 173,826 |

3. Стиснення вуглекислого газу CO₂

Після осушення газової суміші (CO₂ і H₂O) в кожухотрубному теплообміннику (поз. **15**), вуглекислий газ надходить в компресор (поз. **16**), де відбувається його стиснення. Початковий тиск вуглекислого газу становить 0,1 МПа (P_{поч} = 0,1 МПа), кінцевий тиск становить 5 МПа (P_{кін} = 5 МПа). Стисненим вуглекислим газом заповнюють балони. Балони із вуглекислим газом (мають чорний колір) відправляються на склад. Втрати приймаємо на рівні 0,1%.

$$m(\text{втрат}) = (170,182 * 0,1) / 100 = 0,17 \text{ кг.}$$

$$m(\text{вуглекислого газу}) = 170,182 - 0,17 = 170,012 \text{ кг.}$$

Таблиця 2.12 - Матеріальний баланс стадії стиснення вуглекислого газу CO₂



| Прихід | | Витрати | |
|-----------------|----------------|-----------------|----------------|
| Речовина | Маса, кг | Речовина | Маса, кг |
| Вуглекислий газ | 170,182 | Вуглекислий газ | 170,012 |
| | | Втрати | 0,17 |
| Всього | 170,182 | Всього | 170,182 |

Розраховано за допомогою відповідної літератури [25].

2.4 Підбір основного технологічного обладнання

Лінія працюватиме 7 годин. Більшість підприємств, працюють в обмеженому режимі, забезпечуючи 7-годинний робочий цикл. Цей робочий час є стандартом для багатьох виробничих ліній у поточних умовах.

Таблиця 2.13 - Підбір основного обладнання

| 1 | 2 | 3 |
|--|--|---|
| Реактор з нержавіючої сталі 2 м.куб. (2 м ³), з рамною мішалкою та із сорочкою (Кількість: 3 шт.) | Об'єм: 2 м ³ Робочий тиск: до 6 бар. Мінімальна швидкість обертання мішалки: 50 об/хв. Форма ємності: барабан. Перемішуючий пристрій: рамний. Потужність: 3 кВт. Сорочка: так. Матеріал: нержавіюча сталь. Робоче положення: вертикальне. Виробник: Червоний Жовтень, Україна. |  |
| Ротаційна (обертова) піч HW003 | Потужність апарату, кВт: 4. Продуктивність, кг/год: 200. Розміри, мм: 426 * 6000. Швидкість обертання, об/хв: 5,62 Вага, кг: 1210. Максимальна температура до, °С: 1250. |  |

| 1 | 2 | 3 |
|--|--|---|
| <p>Охолоджувач для порошків YPR-200</p> | <p>Продуктивність, кг/год: від 200 до 250.</p> <p>Діаметр великого ролика, мм: 600.</p> <p>Малий діаметр ролика, мм: 215.</p> <p>Розміри, мм: 1600 * 1720 * 1420.</p> |  |
| <p>Дезінтегратор ДІ1-06</p> | <p>Продуктивність: від 350 до 450 кг/год.</p> <p>Діаметр рухомого диска 448 мм.</p> <p>Частота обертання 900 об/хв.</p> <p>Потужність двигуна 15 кВт.</p> <p>Розміри, мм: 2003*1009 *2043.</p> |  |
| <p>Автоматичний пакувальний апа- рат SXP25PB</p> | <p>Потужність, кВт: 4.</p> <p>Швидкість упаковки: 100-180 мішків/годину (розраховується на мішки по 25 кг).</p> |  |

| 1 | 2 | 3 |
|---|--|--|
| <p>Вібраційний про- сіювач 48 дюймів (48" Vibro Shifter Machine)</p> | <p>Виробнича потужність: 250-350 кг на годину. Потужність двигуна 1,5 кВт. Розмір: 1220 мм. Автоматизація: напівавтоматич- ний. Матеріал: нержавіюча сталь SS304.</p> |  |
| <p>Паровий Калорифер КПСК 2-6</p> | <p>Продуктивність по газу, м³/год: 2500. Продуктивність по теплу, кВт: 37,1. Площа поверхні теплообміну, м²: 9,0. Площа фронтального перерізу, м²: 0,267. Маса, кг: 25.</p> |  |

Ротаційна піч HW003

Характеристика

- Потужність двигуна 4 кВт.
- Продуктивність 200 кг/год.
- Габаритні розміри 426*6000 мм.
- Можливе застосування за температур до: 900-1250 °С.
- Монтажний ухил: 3,5%.
- Швидкість обертання: 5,62 об/хв.
- Редуктор: XWD5-43.
- Загальна вага: 1210 кг.
- Країна виробник: Китай.

- Сертифікація: ISO9001.
- Номер моделі: HW003.
- Назва: міні-ротаційна піч.
- Ціна 7000-13500 доларів США/шт [27].

Компанія Zhengzhou Hengyang Industry спеціалізується на виробництві та встановленні проектів обертових печей.

Обертova піч - це піротехнологічний пристрій, який використовується для нагрівання матеріалів до високої температури (кальцинації) у безперервному процесі [27].

Матеріали, що виробляються за допомогою обертових печей, включають: цемент, вапно, вогнетриви, метакаолін, діоксид титану, глинозем, вермикуліт, залізорудні окатиші, активоване вугілля, деревне вугілля, керамічний пісок та інші.

Ці печі також використовуються для випалу широкого спектру сульфідних руд перед видобутком металу [27].



Рисунок. 2.2 - Зображення обертової (ротаційної) печі HW003 [27]

Компактний охолоджувач порошків

Характеристика

- Продуктивність: 200-250 кг/год.
- Тип: EP400.
- Матеріал: Нержавіюча сталь.
- Модель: № YPR-200.

- Функція: терmostійкий.
- Діаметр великого ролика 600 мм, ширина ремня 1000 мм, діаметр малого ролика 215 мм.
- Габаритні розміри: 1600*1720*1420 мм.
- Потужність двигуна 1,5-2,2 кВт.
- Внутрішній матеріал: поліуретан.
- Очищення: легке.
- Барабанний охолоджувач серії YPR.
- Виробник: Lingyu Powder Machinery Co., Ltd. Китай.
- Ціна 12000 доларів США/шт [28].



Рисунок. 2.3 – Зображення охолоджувача порошків YPR-200 [28]

Дезінтегратор ДІ1-06

Дезінтегратори «НВП Крамтехцентр» це високопродуктивні пристрої для надтонкого подрібнення найширшого спектру матеріалів природного та штучного походження твердістю до 4 одиниць за шкалою Моосу та з початковою фракцією до 10 міліметрів [29].

Дезінтегратор ДІ1-06 призначений для тонкого подрібнення матеріалів, не схильних до злипання.

- Висока подрібнювальна здатність.
- Значна продуктивність.
- Надійна конструкція призначена для промислових масштабів [29].

Характеристика

- Ступінь подрібнення: від 60 до 300 мкм.

- Продуктивність: від 350 до 450 кг/год.
- Максимальна продуктивність – до 500 кг/год
- Ресурс подрібнювальних елементів (пальців) складає: від 400 до 600 т. (залежно від матеріалів подрібнення).
- Діаметр рухомого диска: 448 мм.
- Частота обертання диску 900 об/хв.
- Потужність двигуна: 15кВт.
- Габаритні розміри: довжина – 2003 мм, ширина – 1009 мм, висота – 2043 мм.
- Маса: 480 кг (без периферійних пристроїв).
- Термін служби при однозмінній роботі: 8 років.
- Вироблено відповідно до ГОСТ 15150-69.
- Дезінтегратори призначені для експлуатації у закритих приміщеннях з умовами УХЛ категорії 4.2 [29].

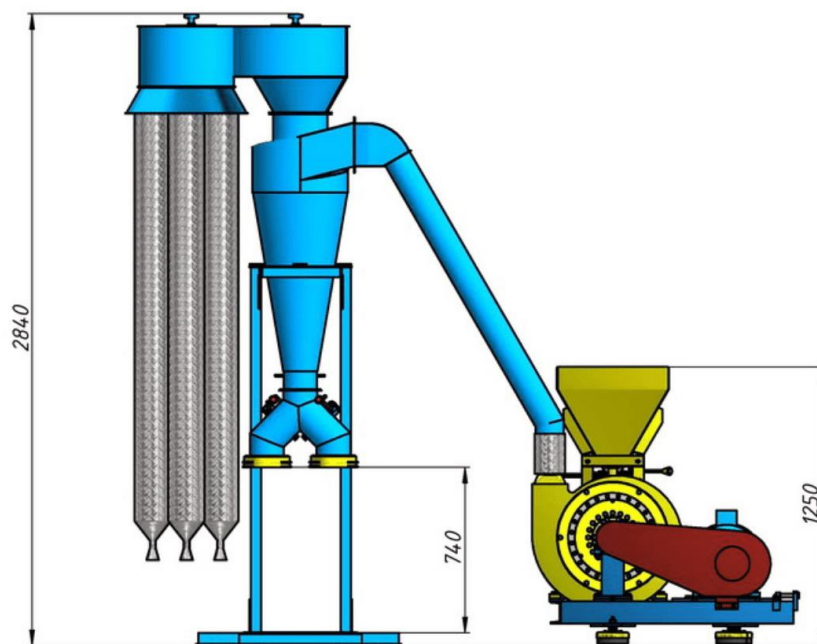


Рисунок. 2.4 - Схематичне зображення установки із дезінтегратором ДІ1-06 [29]

Високоточна пакувальна машина SXP50PW

Основні характеристики: машина для автоматичного зважування порошку та пакування у мішки по 25 кг [30].

Характеристика

- Країна виробник: Китай.
- Назва бренду: EAGLE.
- Сертифікація: CE.
- Номер моделі: SXP50PW.
- Робоча напруга: 380 В.
- Частота: 50-60 Гц.
- Потужність: 4 кВт.
- Тиск повітря: 0,4-0,6 МПа.
- Автоматичний клас: напівавтоматичний.
- Функція: зважування, наповнення, герметизація.
- Тип герметизації мішка: мішок зшитий або запечатаний термообробкою.
- Тип упаковки: звичайний відкритий або М-подібний пакет
- Швидкість пакування: 100-180 мішків на годину (розрахунок на 25 кг борошна) [30].



Рисунок. 2.5 - Зображення пакувальної машини для хімічного порошку [30]

2.5 Опис апаратурно-технологічної схеми

Повітря за допомогою вентилятора (1) надходить до газового фільтра (2), де відбувається його очищення. Очищене повітря подається до охолоджувача порошків (7).

Дигідрофосфат натрію, кальцинована сода та дистильована вода надходять у реактор (3), де відбувається реакція з утворенням натрій гідрофосфату та вуглекислого газу, останній відводиться через верхній патрубок. Суспензія натрій гідрофосфату за допомогою шестеренного насоса (4) подається до ротаційної печі (5), в якій відбувається зневоднення, видалення випареної води та утворення порошку натрій пірофосфату.

Порошок натрій пірофосфату транспортером (6) надходить до охолоджувача порошків (7), де контактує з повітрям і охолоджується до 30 °С. Охолоджений порошок пірофосфату натрію транспортером (8) надходить на подрібнення до дезінтегратора (9).

Подрібнений пірофосфат натрію транспортером (10) надходить до вібратора (11) де фракція 0,35 мм відокремлюється від пилу і більш крупних агломератів і подається до пакувальної машини (12), після чого упакований продукт транспортується на склад.

Удосконалення технології

Вуглекислий газ із реактора (3) надходить за допомогою газодувки (13) до калорифера (14), де відбувається нагрів до температури 100 °С. Далі підігріта газова суміш надходить до кожухотрубного теплообмінника (15), де відбувається охолодження газової суміші до температури 20 °С та конденсація водяної пари. Осушений вуглекислий газ надходить до компресора (16), де він стискається до тиску 5МПа. Стисненим вуглекислим газом наповнюють балони.

На **рисунку 2.6** наведено апаратурно-технологічну схему виробництва.

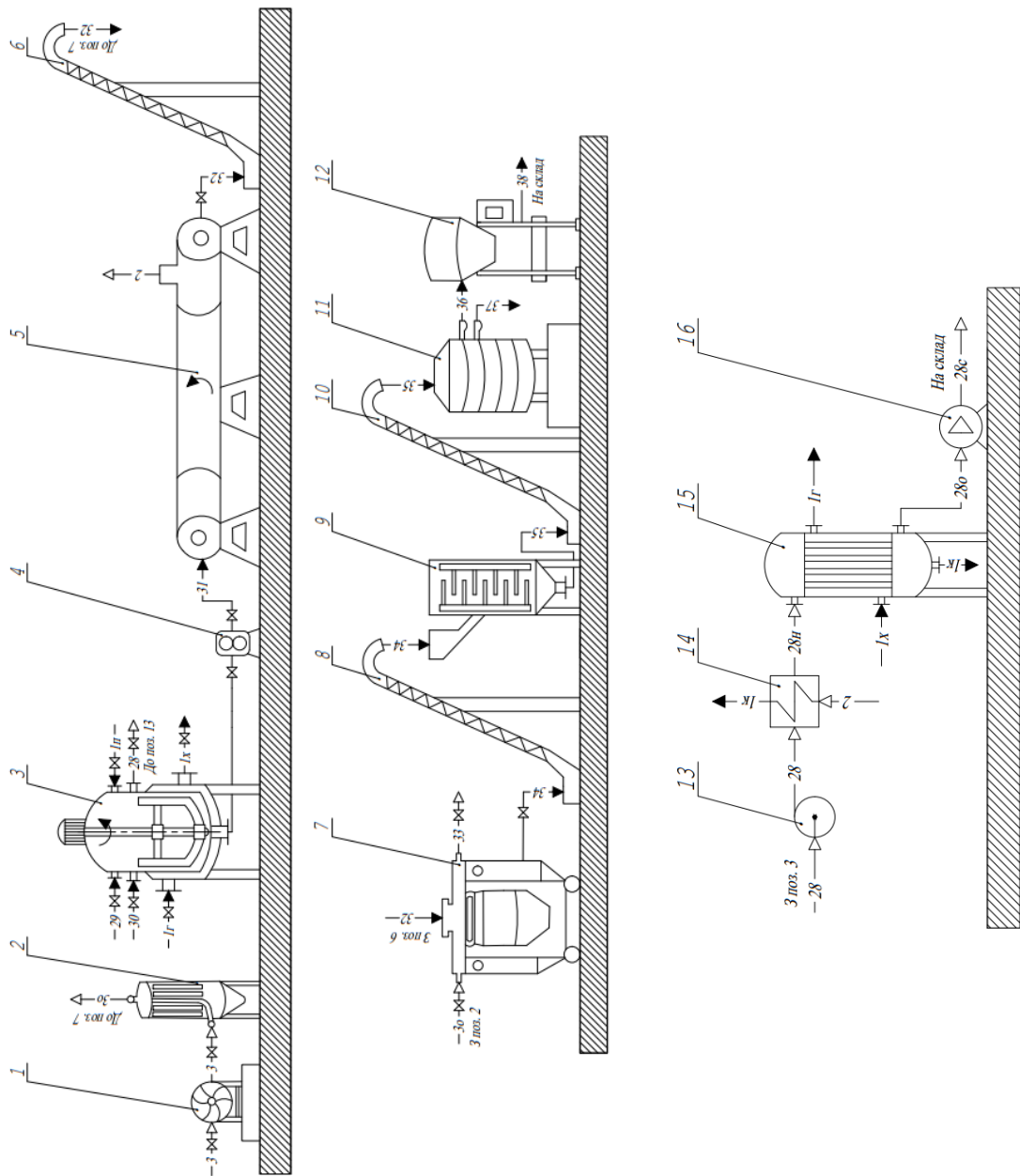


Рисунок. 2.6 – Апаратурно-технологічна схема отримання пірофосфату натрію

2.6 Розрахунок реактора із рамною мішалкою

Ємнісний змішувач являє собою ємність із перемішувальним і іншими пристроями, необхідними для проведення фізико-хімічних і теплових процесів. У тому разі, коли такий змішувач застосовують для проведення хімічної реакції, його називають ємнісним реактором [23].

Облаштування типового ємнісного змішувача (реактора) для рідких середовищ подане на **рисунку 2.7**.

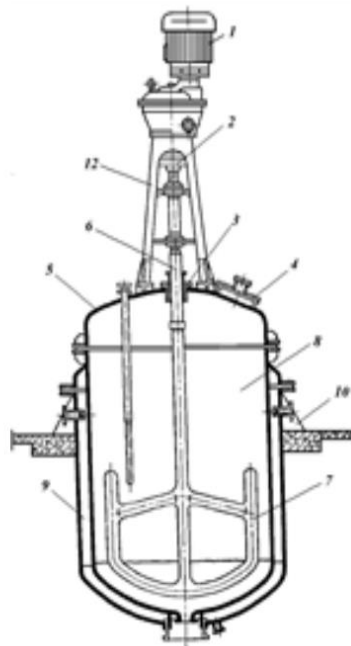


Рисунок. 2.7 – Схема ємнісного змішувача: **1** – привід мішалки; **2** – муфта; **3** – вузол ущільнення; **4** – люк; **5** – кришка; **6** – вал мішалки; **7** – мішалка; **8** – корпус; **9** – сорочка; **10** – опори [23].

Конструктивно такий апарат є ємністю, що складається з корпусу **8** і кришки **5**, забезпеченою мішалкою **7**. Обертання мішалки через вал **6** передається від привода **1**, встановленого на кришці **5**. Для герметизації отвору в кришці, через який проходить вал, змішувач має вузол ущільнення **3**. Апарат забезпечений теплообмінним пристроєм у вигляді сороки **9**, а також може мати додаткові пристрої (трубу перетискування, відбивні перегородки та інші) [23].

Привід мішалки. Приводом називають пристрій, що забезпечує обертання мішалки. Він складається з двигуна і механічної передачі. Зазвичай як двигун

використовують електродвигуни, які перетворюють електричну енергію на механічну роботу у вигляді обертового руху.

За допомогою *механічної передачі* потужність із двигуна передається на вал мішалки за одночасного зниження частоти обертання. Для перемішувальних пристроїв використовують такі типи передач: ремінна, зубчаста циліндрична, зубчаста конічна, черв'ячна, планетарна [23].

Умови роботи для мішалки

| Тип мішалки | Умови роботи |
|----------------|--|
| Якірна (рамна) | Перемішування в'язких і важких рідин, інтенсифікація процесу теплообміну, запобігання випадіння осаду на стінках і днищі, суспензування у в'язких середовищах. |

Теплообмінні пристрої. Основними типами теплообмінних пристроїв, які застосовуються у реакторах, є сорочка, змієвикові і трубчасті пристрої, використовують також виносні теплообмінники [23].

Сорочка являє собою ємність, що повторює за формою корпус реактора, одягнену на нього із зазором. Верхня частина сорочки кріпиться до корпусу за допомогою зварювання або фланцевого з'єднання. У зазорі між корпусом реактора і сорочкою подається теплоносії за тисків до 0,9 МПа [23].

Реактор періодичної дії. Для такого реактора характерне послідовне виконання операцій: завантаження компонентів, перемішування їх протягом заданого часу, вивантаження отриманого продукту. Після вивантаження продукту з реактора технологічний цикл повторюється знову. Цикл – це сукупність явищ та процесів, що складає колооборот протягом визначеного проміжку часу [23].

Розрахунок реактора-змішувача

Вихідні дані:

Реактор

Внутрішній діаметр D: **1200** мм.

Номінальний об'єм: 2,0 м³.

Тип апарата (реактора): 0 (1).

Висота корпусу H: **1900** мм; [32].

Рамна мішалка (тип 10)

Діаметр рамної мішалки d_M : **1120** мм.

$b = 80$ мм.

$H = 1060$ мм.

$H_1 = 400$ мм.

$d_b = 45$ мм (діаметр валу).

$s = 10$ мм.

$R = 0,82 \cdot d = 0,82 \cdot 1120 = 918,4$ мм. (Великий радіус мішалки).

$r = 0,152 \cdot d = 0,152 \cdot 1120 = 170,24$ мм. (Радіус скруглення мішалки).

$s_1 = 1,2 \cdot s = 1,2 \cdot 10 = 12$ мм.

$b_1 = 1,5 \cdot b_M = 1,5 \cdot 80 = 120$ мм.

$l = 0,7 \cdot d_M = 0,7 \cdot 1120 = 784$ мм.

Еліптичне днище

При D апарата = 1200 мм:

Висота еліптичної частини днища $h = 300$ мм.

Об'єм днища, m^3 :

(Таблиця 17.2. Основні розміри еліптичних днищ [18, 478 с.]

| Об'єм, m^3 | Висота циліндричного борта, мм |
|--------------|--------------------------------|
| 0,255 m^3 | $b_1 = 25$ мм |
| 0,272 m^3 | $b = 40$ мм |

Радіус еліптичного днища $R = D_{\text{апарата}} = 1200$ мм.

Продуктивність за одне завантаження в реактор становить:

$V_{\text{завант}} = 0,948 + 0,17 + 4,166 = 5,284$ m^3 .

Робочий об'єм реактора становить:

$V_{\text{роб}} = V_H \cdot \varphi = 2,0 \cdot 0,9 = 1,8$ m^3 .

Необхідна кількість реакторів:

$n = \frac{V_{\text{завант}}}{V_{\text{роб}}} = \frac{5,284}{1,8} = 2,94$ шт (3 штуки).

Об'єм рідини в циліндричній частині реактора $V_{рц}$:

$$V_{рц} = V_{роб} - V_{дн} = 1,8 - 0,255 = 1,545 \text{ м}^3.$$

Тоді, висота рідини у циліндричній частині реактора:

$$H_{ц} = \frac{V_{рц}}{\pi \cdot R^2 \cdot H_{н.}} = \frac{1,545}{3,14 \cdot 0,6^2} = 1,366 \text{ м.}$$

Загальну висоту рідини визначаємо:

$$H_p = H_{ц} + h_1 + H_{ел} = 1,366 + 0,025 + 0,3 = 1,691 \text{ м.}$$

Швидкість рамних мішалок $w=1-3$ м/с. Приймаємо $w=3$ м/с. Тоді частота обертання вала мішалки буде:

$$d_m = 1120 \text{ мм, } d_m = 1,12 \text{ м.}$$

$$n = \frac{w}{\pi \cdot d_m} = \frac{3}{3,14 \cdot 1,12} = 0,85 \text{ с}^{-1} \text{ (51 об/хв).}$$

Значення критерію Рейнольдса Re обчислюємо:

$$Re = \frac{n \cdot d^2 \cdot \rho}{\mu} = \frac{0,85 \cdot 1,12^2 \cdot 1047}{0,00054} = 2067320.$$

$$\rho_{маси} = 1047 \text{ кг/м}^3.$$

$$\mu_{маси} = 0,00054 \text{ Н*с/м}^2.$$

Для рамної мішалки з двома горизонтальними лопатями критерій потужності розраховується:

$$K_N = 12 \cdot Re^{0,77} \cdot \frac{h}{d} = 12 \cdot 2067320^{0,77} \cdot \frac{1060}{1120} = 828196 \text{ Вт.}$$

Потужність, що витрачається на перемішування :

$$N = K_N \cdot \mu \cdot n^2 \cdot d^3 = 828196 \cdot 0,00054 \cdot 0,85^2 \cdot 1,12^3 = 454 \text{ Вт.}$$

Потужність, що втрачається на тертя в сальнику:

$$N_c = 9,84 \cdot (p + 0,98 \cdot 10^5) \cdot f_m \cdot l_c \cdot n \cdot d_b^2,$$

$$\text{де } p = 108241 \text{ Па;}$$

$$f - \text{ коефіцієнт тертя, } f = 0,2;$$

$$l = 4 \cdot d_b = 4 \cdot 0,045 = 0,18 \text{ м} - \text{ довжина набивки сальника.}$$

$$N_c = 9,84 \cdot (108241 + 0,98 \cdot 10^5) \cdot 0,2 \cdot 0,18 \cdot 0,85 \cdot 0,045^2 = 126 \text{ Вт.}$$

Потужність електродвигуна приводу буде:

$$N_{ел} = \frac{k_1 \cdot k_2 \cdot N + N_c}{\eta}$$

$$\text{де } \eta - \text{ к.к.д. приводу, } \eta = 0,9;$$

$k_1 = \frac{H_p}{D} = \frac{1,691}{1,2} = 1,4$ – коефіцієнт, що враховує заповнення ємності перемішувальною рідиною.

k_2 – коефіцієнт, що враховує збільшення потужності при пуску, або підвищенні опору середовища в процесі перемішування, здебільшого приймається $k_2 = 1$.

$$N_{ед} = \frac{1,4 \cdot 1 \cdot 454 + 126}{0,9} = 846 \text{ Вт.}$$

Отже, потужність електродвигуна повинна бути більша $N_{min} = 846 \text{ Вт}$.

Приймаємо по каталогу електродвигун для мотор-редуктора потужністю 1,5 кВт.

Враховуючи прийняту потужність та частоту обертання вала мішалки, було обрано мотор-редуктор (4МП-50), висота приводу якого складає 682 мм.

Тому, загальна висота реактора з приводом становить:

$$H_{заг} = 1900 + 682 = 2582 \text{ мм.}$$

Діаметр сорочки зазвичай приймають на 100-200 мм більше за діаметр реактора. Тому, прийmemo:

$$D_{сорочки} = 1200 + 100 = 1300 \text{ мм.}$$

Вихідні дані із книги: І.Ф. Малезик. Процеси і апарати харчових виробництв. Курсове проектування. Київ НУХТ 2012. 543 с [18, 32].

Таблиця 2.14 - Техічна характеристика розрахованого реактора

| Технічна характеристика | Значення |
|--|-----------|
| Загальний об'єм, м ³ | 2 |
| Робочий об'єм, м ³ | 1,8 |
| Тип мішалки | Рамна |
| Частота обертання мішалки, об/хв | 50 |
| Внутрішній діаметр корпусу, мм | 1200 |
| Діаметр мішалки, мм | 1120 |
| Потужність електродвигуна мішалки, кВт | 1,5 |
| Габаритні розміри, мм | 1590*2582 |

На **рисунку 2.8** зображено загальний вигляд реактора-змішувача із рамним перемішуючим пристроєм. Всі патрубки А,Б,В,Г із умовним проходом Ø100 мм.

2.7 Розрахунок теплового балансу термічної дегідратації

Прихід теплоти

1. Теплота, що надходить з суспензією.

Спочатку розрахуємо середню теплоємність суспензії, використаємо відсотковий склад кожного компонента і його теплоємність. Розрахунок проводимо таким чином:

$\text{Na}_4\text{P}_2\text{O}_7$ (пірофосфат натрію) має теплоємність 1,3 кДж/(кг·°C).

H_2O (вода) має теплоємність 4,18 кДж/(кг·°C).

NaH_2PO_4 (дигідрофосфат натрію) має теплоємність 1,8 кДж/(кг·°C).

Домішки мають середню теплоємність 1,2 кДж/(кг·°C).

Відсотковий склад суспензії складається з 81,1% $\text{Na}_4\text{P}_2\text{O}_7$, 15,4% води (H_2O), 3,1% NaH_2PO_4 та 0,4% домішок.

$$c(\text{суспензії}) = 0,811 * 1,3 + 0,154 * 4,18 + 0,03 * 1,8 + 0,004 * 1,2 = 1,76$$

$$Q_1 = 1\,396,34 * 1,76 * 75 = 184\,316,88 \text{ кДж.}$$

2. Теплота затрачена для нагрівання сировини

Використовуємо формулу $Q = m * c * \Delta T$ для кожного компонента крім води. Теплоту, витрачену на видалення води, розрахуємо окремо.

$$Q_{\text{Na}_4\text{P}_2\text{O}_7} = 1\,132,8 * 1,3 * (550 - 75) = 699\,504 \text{ кДж.}$$

$$Q_{\text{NaH}_2\text{PO}_4} = 42,83 * 1,8 * (550 - 75) = 36\,619,55 \text{ кДж.}$$

$$Q_{\text{домішки}} = 5,21 * 1,2 * (550 - 75) = 2\,969,7 \text{ кДж.}$$

Визначаємо затрати на нагрівання за формулою:

$$Q_2 = 699\,504 + 36\,619,55 + 2\,969,7 = 739\,093,25 \text{ кДж.}$$

3. Теплота затрачена для видалення води

Маса води, що випаровується: 287,3 кг

Теплота випаровування води: 2260 кДж/(кг * °C)

$$Q_{\text{випар}} = 287,3 * 2260 = 649\,298 \text{ кДж.}$$

Визначаємо загальний прихід тепла на стадію термічної дегідратації:

$$Q_{\text{прих}} = 184\,316,88 + 739\,093,25 + 649\,298 = 1\,572\,708,13 \text{ кДж.}$$

Витрати теплоти

- Тепло витрачене на перетворення гідрофосфату натрію в натрій пірофосфат.

Для точного перерахунку ентальпії реакції, враховуючи, що в реакцію вступає 1 132,80 кг Na_2HPO_4 , потрібно знову врахувати ентальпії утворення для кожної з речовин, що входять у реакцію:

Стандартні ентальпії утворення для речовин (ΔH):

Na_2HPO_4 (гідрофосфат натрію): $\Delta H \approx -1213,1$ кДж/моль.

$\text{Na}_4\text{P}_2\text{O}_7$ (натрій пірофосфат): $\Delta H \approx -1981,3$ кДж/моль.

H_2O (вода): $\Delta H \approx -241,8$ кДж/моль.

Розрахунок зміни ентальпії реакції (ΔH):

$$\Delta H = (\Delta H \text{ Na}_4\text{P}_2\text{O}_7 + \Delta H \text{ H}_2\text{O}) - 2 * \Delta H \text{ Na}_2\text{HPO}_4$$

$$\Delta H = (-1981,3 + (-241,8)) - 2 * (-1213,1) = -2223,1 + 2426,2 = 203,1 \text{ кДж/моль.}$$

$$1\,132,80 \text{ кг} = 1\,132\,800 \text{ г.}$$

Молекулярна маса $\text{Na}_4\text{P}_2\text{O}_7 \approx 266$ г/моль.

$$\nu(\text{Na}_4\text{P}_2\text{O}_7) = \frac{1\,132\,800 \text{ г}}{266 \text{ г/моль}} = 4\,258,65 \text{ моль}$$

$$Q_4 = \nu(\text{Na}_4\text{P}_2\text{O}_7) * \Delta H = 4\,258,65 * 203,1 = 864\,931,81 \text{ кДж.}$$

- Визначаємо кількість теплоти, яка вийде з порошковою сумішшю:

$$Q_{\text{Na}_4\text{P}_2\text{O}_7} = 1040,52 * 1,3 * 450 = 608\,704,2 \text{ кДж.}$$

$$Q_{\text{NaH}_2\text{PO}_4} = 41,13 * 1,8 * 450 = 33\,315,3 \text{ кДж.}$$

$$Q_5 = 608\,704,2 + 33\,315,3 = 642\,019,5 \text{ кДж.}$$

- Визначаємо кількість теплоти, яка вийде з водяною парою:

$$Q_6 = 287,3 * 2,1 * 100 = 60\,333 \text{ кДж.}$$

Тоді загальні витрати теплоти на стадії термічної дегідратації складають:

$$Q_{\text{витр}} = 865\,931,81 + 642\,019,5 + 60\,333 = 1\,567\,284,31 \text{ кДж.}$$

Тепер визначимо кількість теплоти, яка було втрачена за формулою:

$$Q_{\text{прих}} = Q_{\text{витр}} + Q_{\text{втр}}_{\text{ат}}$$

$$Q_{\text{втр}}_{\text{ат}} = Q_{\text{прих}} - Q_{\text{витр}} = 1\,572\,708,13 - 1\,567\,284,31 = 5\,423,82 \text{ кДж.}$$

Розрахунки проведено за допомогою відповідної літератури [25].

РОЗДІЛ 3 ТЕХНІКО-ЕКОНОМІЧНЕ ОБҐРУНТУВАННЯ

Розрахунок економічної ефективності

Дохід

Для визначення доходу від виробництва пірофосфату натрію необхідно врахувати його вартість на ринку та обсяг виробництва. Вартість 1 кг пірофосфату натрію становить 190 грн, а щоденний обсяг виробництва складає 1000 кг. Таким чином, загальний дохід від продажу пірофосфату натрію можна обчислити за формулою:

$$\text{Дохід} = 190 * 1\ 000 = 190\ 000 \text{ грн.}$$

Витрати на сировину

Для виробництва пірофосфату натрію необхідно використовувати такі основні види сировини, як дигідрофосфат натрію, кальцинована сода та вода. Оскільки 40 кг дигідрофосфату натрію повертається до виробничого процесу, витрати на цей матеріал скорочуються на відповідну кількість. З врахуванням цього внесемо дані до таблиці 3.1.

Вважаємо, що зі 100% дистильованої води (яку треба затратити на виробництво 1т цільового продукту), 80% повертається у виробництво, а 20% треба закупляти.

Таблиця 3.1 - Витрати сировини на виробництво пірофосфату натрію

| 1 | 2 | 3 | 4 |
|----------------------|------------------------|---------------------------|------------------------|
| Назва сировини | Кількість сировини, кг | Вартість за кілограм, грн | Загальна вартість, грн |
| Кальцинована сода | 418 | 32 | 13 376 |
| Дигідрофосфат натрію | 948 | 121 | 114 708 |

| | | | | | | | |
|--|--------------------------------------|--|--|---------------------------------|----------------------------|------------|----------------|
| Відповідальна організація НУХТ, каф. ТЖХТ | Технічне узгодження Бойчук Т.М. | Вид документа Пояснювальна записка | | Статус документа | | | |
| Власник документа НУХТ | Розробник документа Кияниця В.А. | Назва, додаткова назва РОЗДІЛ 3 ТЕХНІКО- ЕКОНОМІЧНЕ ОБҐРУ- НТУВАННЯ | | ННІХТ.ХТ-4-14.025.161.061.КР.ПЗ | | | |
| | Документ затверджено Носенко Т.Т. | | | Інд. змін. | Дата видання 20.02.2025 | Мова ua | Аркуш 61/80 |

| 1 | 2 | 3 | 4 |
|-------------------|------|----|---|
| Дистильована вода | 4166 | 14 | 58 324 (за 4166 кг – 100%). <u>11 665</u> (за 833 кг – 20%). |
| Сума | | | 139 749 |

Витрати на пакування

Продукція фасується в мішки по 25 кг. Вартість одного пакета – 7,7 грн, отже, загальні витрати на пакування для 1000 кг продукції:

$$\text{Витрати на пакування} = 40 * 7,5 = 300 \text{ грн}$$

Витрати на заробітні плати

На виробництві пірофосфату натрію працює 7 осіб. Один працівник відповідає за реактор, інший працює на ротаційній печі. Третій займається охолодженням порошків і підготовкою сушильного агента. Ще один працівник обслуговує сепаратор, а інший працює на дезінтеграторі. Шостий займається пакуванням продукції. Останній контролює роботу апаратів і якість готового продукту.

Заробітна плата одного працівника становить 26 500 грн на місяць, а загальна сума виплат – 185 500 грн. Що становить 9 275 гривень на день.

Податки

Єдиний соціальний внесок (ЄСВ) для 7 працівників становить 22% від мінімальної зарплати (1760 грн на одного працівника), тобто 12 320 грн на місяць. Вирахуємо денний ЄСВ:

$$\text{ЄСВ на день} = \frac{12\,320}{20} = 616 \text{ грн.}$$

Єдиний податок для підприємства складає 5% від доходу, тобто 10 000 грн.

Військовий збір – 1% від доходу, що дорівнює 2 000 грн.

Визначаємо загальну суму податків на день:

$$\text{Загальні податки} = 616 + 10\,000 + 2\,000 = 12\,616 \text{ грн.}$$

Витрати на комунальні послуги

Комунальні витрати охоплюють споживання електроенергії, води та інші супутні витрати.

Таблиця 3.2 - Витрати електроенергії на роботу апаратів

| Назва апарату | Кількість використаної енергії – кВт за годину | Кількість використаної енергії, кВт - весь процес | Загальна вартість, грн |
|----------------------|--|---|------------------------|
| Реактор | 9 | 63 | 272,16 |
| Ротаційна піч | 4 | 414 | 1 788,48 |
| Охолоджувач порошків | 17 | 119 | 514,08 |
| Сито | 1,5 | 10,5 | 45,36 |
| Дезінтегратор | 15 | 105 | 453,6 |
| Пакувальна машина | 4 | 28 | 120,96 |
| Сума | | | 3194,64 |

З урахуванням конвеєрів і насосів загальні комунальні витрати приймаємо рівними 3 300 грн.

Загальні витрати

Визначаємо загальні витрати:

$$\text{Загальні витрати} = 139\,749 + 9\,275 + 300 + 3\,300 + 12\,616 = 165\,240 \text{ грн.}$$

Прибутковість

За формулами (...) - (...) визначаємо прибуток та рентабельність.

$$\text{Прибуток} = \text{Дохід} - \text{Витрати} = 190\,000 - 165\,240 = 24\,760 \text{ грн.}$$

$$\text{Рентабельність} = \frac{\text{Прибуток}}{\text{Дохід}} * 100\% = \frac{24\,760}{190\,000} * 100 = 13,15\%.$$

Таблиця 3.3 - Основні фонди (засоби) виробництва

| Найменування обладнання | Кількість | Ціна за одиницю | Загальна вартість, грн |
|-------------------------|-----------|-----------------|------------------------|
| Ротаційна піч | 1 | 7000 USD | 280 000 |
| Охолоджувач порошків | 1 | 12000 USD | 480 000 |
| Реактори | 3 | 325 000 грн | 975 000 |
| Разом | | | 1 735 000 |

Приймаємо термін служби обладнання 8 років.

Метод амортизації прямолінійний.

Продуктивність виробництва по цільовому продукту 1000 кг/добу.

Загальна вартість основного обладнання = 1 735 000 грн. (без врахування допоміжного обладнання.)

Річна амортизація = 216 875 грн.

Амортизація на 1т продукції = 722,92 грн/т.

Таблиця 3.4 – Оборотні фонди

| Стаття | Сума, грн |
|----------------------------|----------------|
| Сировина | 320 210 |
| Незавершене виробництво | 65 707 |
| Електроенергія (на 5 днів) | 16 650 |
| Разом | 402 567 |

Оборотні фонди для забезпечення безперервної роботи виробництва з 5-денним циклом становлять = 402 567 грн.

Річна потужність виробництва 360 т/рік. (за умови продуктивності 1т/добу; підприємство виробляє продукцію 360 днів на рік).

Собівартість одиниці продукції 158 937 грн/1т продукції. (159 грн/кг, або 3975 грн за мішок 25 кг.)

При вартості всього обладнання (основне та допоміжне) 2 500 000 грн, ціні реалізації продукту 190 000 грн/1т, період окупності до 3 місяців.

Розрахунки проведено за допомогою відповідної літератури [13].

РОЗДІЛ 4 ОРГАНІЗАЦІЯ КОНТРОЛЮ ЯКОСТІ ПРОДУКЦІЇ

Тетранатрій дифосфат

Відповідно до Регламенту Комісії (ЄС) № 231/2012, харчова добавка **E450(iii)** ідентифікована як [3]:

Хімічна назва: тетранатрій фосфат.

Номер EINECS: 231-767-1.

Хімічна формула: $\text{Na}_4\text{P}_2\text{O}_7$ (безводна форма) або $\text{Na}_4\text{P}_2\text{O}_7 \cdot 10\text{H}_2\text{O}$ (декагідратна форма).

Молекулярна маса: 265,94 (безводна форма), 446,09 (декагідратна форма).

Фізичний опис: безбарвні або білі кристали або білий кристалічний або гранульований порошок.

CAS номер: 7722-88-5.

Розчинність: розчинний у воді.

Температура плавлення становить 988°C (Haynes, 2010).

Синоніми включають: пірофосфат тетранатрій, дифосфат тетранатрій, фосфат тетранатрій та пірофосфат натрію [3].

Таблиця 4.1 - Специфікації для тетранатрій дифосфату (**E450(iii)**) згідно з Регламентом Комісії (ЄС) №231/2012 та як **INS 450(iii)** згідно з JECFA (2012a,b) [3]

| | | | | | | |
|--|--------------------------------------|--|---------------------------------|----------------------------|------------|----------------|
| Відповідальна організація НУХТ, каф. ТЖХТ | Технічне узгодження Бойчук Т.М. | Вид документа Пояснювальна записка | Статус документа | | | |
| Власник документа НУХТ | Розробник документа Кияниця В.А. | Назва, додаткова назва РОЗДІЛ 4 ОРГАНІЗАЦІЯ КОНТРОЛЮ ЯКОСТІ ПРОДУКЦІЇ | ННІХТ.ХТ-4-14.025.161.065.КР.ПЗ | | | |
| | Документ затверджено Носенко Т.Т. | | Інд. змін. | Дата видання 20.02.2025 | Мова ua | Аркуш 65/80 |

Таблиця 4.1 [3]

| | Регламент Комісії (ЄС) № 231/2012 | ЖЕСФА (2012a,b) |
|----------------------------|--|--|
| 1 | 2 | 3 |
| Аналіз | Вміст $\text{Na}_4\text{P}_2\text{O}_7$ не менше 95% на прожарену основу. Вміст P_2O_5 не менше 52,5% та не більше 54,0%. | Не менше 95,0% на прожареній основі. |
| Опис | Безбарвні або білі кристали, або білий кристалічний чи гранульований порошок. Декагідрат злегка розсіюється на сухому повітрі. | Безбарвні або білі кристали, або білий кристалічний чи гранульований порошок; декагідрат злегка розсіюється на сухому повітрі. |
| Ідентифікація | | |
| Тест на натрій | Проходить тест | Проходить тест |
| Тест на фосфати | Проходить тест | Проходить тест |
| Розчинність | Розчинний у воді. Нерозчинний в етанолі. | Розчинний у воді. Нерозчинний в етанолі. |
| рН | Між 9,8 та 10,8 (1% розчин). | 9,9–10,8 (розчин 1 до 100). |
| Чистота | | |
| Втрати при прожарюванні | Не більше 0,5% для безводної солі; не менше 38% та не більше 42% для декагідрату (105°C, 4 год, потім 550°C, 30 хв). | Не більше 0,5% для безводного; 38–42% для декагідрату (105°C, 4 год, потім 550°C, 30 хв). |
| Нерозчинна у воді речовина | Не більше 0,2%. | Не більше 0,2%. |

| 1 | 2 | 3 |
|---------|--|---------------------|
| Фторид | Не більше 10 мг/кг (виражено як фтор). | Не більше 10 мг/кг. |
| Миш'як | Не більше 1 мг/кг. | Не більше 3 мг/кг. |
| Кадмій | Не більше 1 мг/кг. | - |
| Свинець | Не більше 1 мг/кг. | Не більше 4 мг/кг. |

Фосфати є дозволеними харчовими добавками в Європейському Союзі (ЄС) відповідно до Додатку II та III до Регламенту (ЄС) № 1333/2008 про харчові добавки, а спеціальні критерії чистоти були визначені в Регламенті Комісії (ЄС) № 231/2012 [3].

Групова допустима добова норма споживання (ДДН) для фосфатів, виражена через фосфор, становить на рівні 40 мг/кг маси тіла на день.

«Максимально допустима добова норма споживання» становить 70 мг/кг маси тіла (м.т.) на день (виражена як фосфор) для суми фосфатів та поліфосфатів, які природно присутні в їжі та споживаються як харчові добавки (JECFA, 1982a).

Експертна група з вітамінів та мінералів (EVM) також дійшла висновку, що загальне споживання 2400 мг/день (враховуючи 2110 мг/день неорганічного фосфору з їжі, включаючи харчові добавки та воду, та 250 мг/день з додаткового фосфору) не призводить до жодних побічних ефектів (Експертна група з вітамінів та мінералів, 2003) [3].

У висновку комісії EFSA NDA щодо допустимого верхнього рівня споживання фосфору верхня межа для фосфору не була встановлена, оскільки наявних даних було недостатньо, і вони вказують на те, що здорові дорослі можуть переносити споживання фосфору (фосфатів) щонайменше до 3000 мг/день без несприятливих системних ефектів (EFSA NDA Panel, 2005) [3].

Комісія з питань харчування, дієтичних продуктів, нових продуктів харчування та алергії Норвезького наукового комітету з безпеки харчових продуктів (VKM) опублікувала оцінку споживання фосфору з їжею стосовно допустимих верхніх рівнів споживання, пропонуючи 3000 мг/день як попередній верхній рівень (ВР) для загального споживання фосфору для дорослих та 750 мг/день як верхній рівень для харчових добавок (VKM, 2017) [3].

Фосфат необхідний для всіх живих організмів. Комісія вважає фосфати такими, що мають низьку гостру пероральну токсичність, і немає жодних занепокоєнь щодо генотоксичності та канцерогенності.

Наразі фосфати (E338–341, E343, **E450–452**) є дозволеними харчовими добавками в ЄС з максимально допустимими рівнями (MPL) від 500 до 20 000 мг/кг у 104 дозволених сферах використання [3].

Розрахована добова норма споживання фосфору 40 мг/кг маси тіла на день призводить до впливу фосфору на рівні 2800 мг/особу на день для дорослої людини вагою 70 кг, що знаходиться в межах безпечного рівня впливу 3000 мг/особу на день, встановленого Панеллю EFSA NDA (2005).

Група експертів дійшла висновку, що групова добова норма споживання (ДДН) 40 мг/кг маси тіла на день, виражена у вигляді фосфору, є захисною для здорових дорослих. Однак ця ДДН не застосовується до людей із помірним або тяжким зниженням функції нирок [3].

РОЗДІЛ 5 ЕКОЛОГІЧНА ЧАСТИНА

Викиди парникових газів

Хімічна промисловість – це промисловий сектор з найбільшим попитом на енергію, який використовує значну частку світового викопного палива та викидає все більшу кількість парникових газів після швидкого зростання протягом останніх 25 років [14].

Хімічна промисловість є однією із найважливіших галузей з точки зору викидів парникових газів. Відновлювана енергія є ключовою для скорочення викидів парникових газів.

Викиди утворюються на виробничих майданчиках шляхом спалювання викопного палива, а також у багатьох фундаментальних процесах виробництва ключових хімічних речовин, так звані викиди категорії 1, а також у зовнішньому виробництві тепла та електроенергії, що використовуються промисловістю, так звані викиди категорії 2 [14].

Для досягнення суттєвого скорочення викидів вкрай важливо дотримуватися стратегій глибокої декарбонізації. Шлях до декарбонізації викидів, полягає в уловлюванні та використанні вуглецю (CCU) для хімічної переробки. Потреба в енергії для процесів уловлювання вуглецю значно відрізняється залежно від джерела вуглецю [14].

Для того, щоб шлях до декарбонізації був суттєвим, також важливо забезпечити не лише зменшення викидів, а й справжнє уникнення викидів завдяки використанню вловленого вуглецю [14].

Досягнення декарбонізації викидів виробництв відповідає міжнародним кліматичним цілям. Повна декарбонізація світової промисловості є важливою для досягнення стабілізації клімату.

| | | | | | | |
|--|--------------------------------------|--|---------------------------------|----------------------------|------------|----------------|
| Відповідальна організація НУХТ, каф. ТЖХТ | Технічне узгодження Бойчук Т.М. | Вид документа Пояснювальна записка | Статус документа | | | |
| Власник документа НУХТ | Розробник документа Кияниця В.А. | Назва, додаткова назва РОЗДІЛ 5 ЕКОЛОГІЧНА ЧАСТИНА | ННІХТ.ХТ-4-14.025.161.069.КР.ПЗ | | | |
| | Документ затверджено Носенко Т.Т. | | Інд. змін. | Дата видання 20.02.2025 | Мова ua | Аркуш 69/80 |

Швидке зростання викидів парникових газів у хімічному секторі в глобальному масштабі, призвело до збільшення викидів більш ніж удвічі порівняно із 1995 роком [14].

У 2014 році промисловий сектор відповідав за 33% світових антропогенних викидів парникових газів [15].

Досягнення нульових викидів парникових газів до 2050–2070 років необхідне для обмеження глобального потепління на 1,5 °С.

До галузей із найбільшими викидами належать: цементна, чорна металургія, сталеливарна галузь, а також хімічна та пластмасова промисловість. (Виробництво цементу належить до однієї із найскладніших для декарбонізації галузей промисловості) [15].

Викиди, пов'язані з енергетикою, відбуваються від спалювання палива, тоді як технологічні викиди – від іншої промислової діяльності. Прямі викиди відбуваються від промислових об'єктів, тоді як непрямі викиди пов'язані з виробництвом електроенергії або централізованого теплопостачання, що закуповується промисловістю (а не виробляється на місці) [15].

Компанії, які інвестують у вдосконалені технології, будуть позиціоновані як лідери протягом цього століття, коли занепокоєння щодо зміни клімату, ймовірно, зробить неефективність та високий рівень викидів дедалі серйознішими бізнес-проблемами. Промислова декарбонізація буде мотивована зниженням вартості чистіших технологій [15].

Оскільки вартість відновлюваної електроенергії продовжує знижуватися, зростає інтерес до ролі водню, отриманого із відновлюваної електроенергії (тобто шляхом електролізу), як фактора, що сприяє декарбонізації промисловості, як безпосереднього палива, так і хімічної сировини.

Досягнення нульових промислових викидів вимагатиме комплексу різних втручань, як з боку пропозиції, так і з боку попиту [15].

Ключовими технологіями з боку пропозиції будуть різні заходи енергоефективності, серед яких - *уловлювання вуглецю* (а також електрифікація в певних галузях промисловості та використання водню з нульовим вмістом вуглецю як джерела тепла та хімічної сировини).

Хоча промисловий сектор є великим та неоднорідним, мета декарбонізації світового промислового виробництва в цьому столітті є досяжною [15].

Стічні води

Зростання населення світу та промисловості призвело до постійного зростання попиту на воду пропорційно до наявних запасів, які залишаються постійними. Таким чином, необхідно мінімізувати її споживання, а також необхідно повертати її назад у навколишнє середовище з мінімальним навантаженням забруднення через обмежену здатність до самоочищення, звідси важливість процесу очищення стічних вод [16].

Протягом останніх двох десятиліть у Європі та Сполучених Штатах відбулися масштабні екологічні ініціативи, що призвели до запровадження суворих екологічних норм щодо промислових викидів для хімічної промисловості. Було необхідно інвестувати в чистіші технології та ефективніші методи обробки. З іншого боку, численні хімічні компанії встановили системи очищення стічних вод, щоб відповідати нещодавно розробленим нормам країни, в якій вони базуються, або нормам країн, з якими вони торгують [16].

Хімічна промисловість складається з компаній, що виробляють промислові хімікати. Хімічна промисловість має важливе значення з точки зору її впливу на навколишнє середовище [16].

Хімічні промислові стічні води зазвичай містять органічні та неорганічні речовини в різних концентраціях. Багато матеріалів у хімічній промисловості є токсичними, мутагенними, канцерогенними або просто майже не біорозкладними.

Активоване вугілля може бути використане для видалення металів, хлоридів, фторидів із промислових стічних вод [16].

РОЗДІЛ 6 ОХОРОНА ПРАЦІ

Загальні вимоги.

Роботодавець повинен забезпечити своєчасне і якісне проведення атестації робочих місць за умовами праці, де технологічний процес, використовуване обладнання, сировина та матеріали є потенційними джерелами шкідливих і небезпечних виробничих факторів, що можуть несприятливо впливати на стан здоров'я працюючих, а також на їх нащадків як тепер, так і в майбутньому, відповідно до вимог Порядку проведення атестації робочих місць за умовами праці, затвердженого постановою Кабінету Міністрів України від 01.08.92 N 442 (442-92-п) [17].

Небезпечні чинники (речовини, матеріали), що використовуються на підприємстві, повинні бути зареєстровані відповідно до Положення про гігієнічну регламентацію та державну реєстрацію небезпечних факторів, затвердженого постановою Кабінету Міністрів України від 13.06.95 N 420 (420-95-п) [17].

Під час прийняття на роботу та в процесі роботи на підприємствах основної хімічної промисловості працівники проходять навчання, інструктаж і перевірку знань з питань охорони праці згідно з вимогами Типового положення про порядок проведення навчання і перевірки знань з питань охорони праці, затвердженого наказом Державного комітету України з нагляду за охороною праці від 26.01.2005 N 15 (z0231-05), зареєстрованого в Міністерстві юстиції України 15.02.2005 за N 231/10511 (НПАОП 0.00-4.12-05) [17].

До роботи на підприємствах основної хімічної промисловості допускаються працівники, які пройшли медичний огляд згідно з Порядком проведення медичних оглядів працівників певних категорій, затвердженим наказом Міністерства охорони

| | | | | | | |
|--|--------------------------------------|---|---------------------------------|----------------------------|------------|----------------|
| Відповідальна організація НУХТ, каф. ТЖХТ | Технічне узгодження Бойчук Т.М. | Вид документа Пояснювальна записка | Статус документа | | | |
| Власник документа НУХТ | Розробник документа Кияниця В.А. | Назва, додаткова назва РОЗДІЛ 6 ОХОРОНА ПРАЦІ | ННІХТ.ХТ-4-14.025.161.072.КР.ПЗ | | | |
| | Документ затверджено Носенко Т.Т. | | Інд. змін. | Дата видання 20.02.2025 | Мова ua | Аркуш 72/80 |

здоров'я України від 21.05.2007 N 246 (z0846-07), зареєстрованим у Міністерстві юстиції України 23.07.2007 за N 846/14113 [17].

Працівники підприємств основної хімічної промисловості на роботах із шкідливими та небезпечними умовами праці, а також роботах, пов'язаних із забрудненням або здійснюваних у несприятливих температурних умовах, забезпечуються спеціальним одягом, спеціальним взуттям та засобами індивідуального захисту ЗІЗ. ЗІЗ мають відповідати чинним національним стандартам та вимогам Технічного регламенту засобів індивідуального захисту [17].

Загальні вимоги безпеки до виробництв основної хімічної промисловості.

Під час технологічних процесів на підприємствах основної хімічної промисловості відповідно до технологічних регламентів на працівників можуть діяти небезпечні та шкідливі виробничі чинники, які класифіковано в ГОСТ 12.0.003-74 "ССБТ. Опасные и вредные производственные факторы. Классификация" [17].

Фізичні шкідливі чинники:

- машини і механізми, що рухаються;
- рухомі частини виробничого обладнання;
- підвищена запиленість та загазованість повітря робочої зони;
- підвищена або знижена температура поверхонь обладнання, матеріалів;
- підвищена або знижена температура повітря робочої зони;
- підвищений рівень шуму на робочому місці;
- підвищений рівень загальної та локальної вібрації;
- підвищений рівень ультразвуку;
- підвищений рівень інфразвуку;
- підвищений рівень ультрафіолетової та інфрачервоної радіації;
- підвищений рівень іонізуючих випромінювань;
- підвищена чи знижена іонізація повітря;
- підвищена або знижена вологість повітря;

- підвищена або знижена рухомість повітря;
- підвищене значення напруги в електричному контурі, замикання якого може відбуватися через тіло людини;
- підвищений рівень статичної електрики;
- підвищений рівень електромагнітного випромінювання;
- відсутність або недостатність природного світла;
- недостатня освітленість робочої зони [17].

Хімічні шкідливі чинники:

- за характером впливу на організм людини:

- загальнотоксичної дії;
- канцерогени;
- аерозолі переважно фіброгенної дії.

- за шляхом проникнення в організм людини через:

- органи дихання;
- органи травлення;
- шкірні покриви і слизові оболонки [17].

Психофізіологічні шкідливі чинники:

- фізичні перевантаження (статичні та динамічні);
- нервово-психічні перевантаження (монотонність праці, емоційні перевантаження).

Показники мікроклімату в межах робочої зони виробничих приміщень під час виробництва на підприємствах основної хімічної промисловості мають відповідати вимогам Санітарних норм мікроклімату виробничих приміщень, затверджених постановою головного державного санітарного лікаря України від 01.12.99 N 42 (va042282-99) (ДСН 3.3.6.042-99) [17].

Електропостачання та електрообладнання.

В електричних схемах машин і обладнання має бути передбачено захист від

перевантаження та короткого замикання, який забезпечує автоматичне розвантаження або відключення [17].

Виробниче обладнання з електричним приводом повинно мати засоби (пристрої) захисту від ураження електричним струмом (зокрема у випадках помилкової дії працівників, які обслуговують обладнання) згідно з вимогами ГОСТ 12.1.019-79 «ССБТ. Электробезопасность. Общие требования и номенклатура видов защиты».

Усе електрообладнання (корпуси електричних машин, апаратів, світильників, розподільчих пристроїв, металеві корпуси пересувних та переносних електроприймачів) повинно мати надійне захисне заземлення та/або занулення [17].

ВИСНОВКИ

1. Під час виконання роботи було здійснено вичерпне дослідження пірофосфату натрію, в ході якого були опрацьовані літературні джерела. Було визначено основні відомості про пірофосфат натрію як хімічну речовину $\text{Na}_4\text{P}_2\text{O}_7$, а також як харчову добавку E450(iii). Описано фізичні та хімічні властивості сполуки, а також зазначено сфери та приклади застосування.

2. Кваліфікаційна робота містить огляд різних технологій виробництва пірофосфату натрію, а також опис його сировинної бази. Особливу увагу зосереджено на технології отримання із кальцинованої соди Na_2CO_3 і дигідрофосфату натрію NaH_2PO_4 . Для цієї технології було розроблено удосконалення виробництва пірофосфату натрію $\text{Na}_4\text{P}_2\text{O}_7$ шляхом уловлювання викидів вуглекислого газу CO_2 , його подальшого осушення та стиснення.

3. Розроблено принципову і апаратурно-технологічну схеми виробництва. Також був розрахований матеріальний баланс для даної технології, враховуючи проведені розрахунки, було виявлено що для виробництва із продуктивністю 1 т/добу, використовується 5532 кг вихідної сировини. Технологічні втрати становлять 5% від маси цільового продукту.

4. Також було проведено економічний розрахунок, результати свідчать про вартість виготовлення 1т пірофосфату натрію, яка становить 165 240 грн. Рентабельність виробництва становить 13,15%. Задля впровадження цієї технології було обрано відповідне технологічне обладнання, яке відповідає усім вимогам продуктивності процесу виробництва.

5. Розраховано реактор-змішувач із рамною мішалкою, номінальним (повним) об'ємом 2 м³. Робочий об'єм реактора становить 1,8 м³. Розроблено креслення реактора, із зазначенням його технічної характеристики.

| | | | | | | |
|--|--------------------------------------|--|---------------------------------|----------------------------|------------|----------------|
| Відповідальна організація НУХТ, каф. ТЖХТ | Технічне узгодження Бойчук Т.М. | Вид документа Пояснювальна записка | Статус документа | | | |
| Власник документа НУХТ | Розробник документа Кияниця В.А. | Назва, додаткова назва ВИСНОВКИ | ННІХТ.ХТ-4-14.025.161.076.КР.ПЗ | | | |
| | Документ затверджено Носенко Т.Т. | | Інд. змін. | Дата видання 20.02.2025 | Мова ua | Аркуш 76/80 |

СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ

1. Vorobets M., Kobasa I., Cheban A. Application of titrimetric technique for determination of phosphates in cheeses. 2014. Volume XIII. Issue 4. P. 372–375.

2. Tuominen M., Karp H. J., Itkonen S. T. Phosphorus-Containing Food Additives in the Food Supply – An Audit of Products on Supermarket Shelves. Journal of Renal Nutrition. 2022. Vol. 32, No. 1. P. 30–38.

3. Re-evaluation of phosphoric acid–phosphates – di-, tri- and polyphosphates (E338–341, E343, E450–452) as food additives and the safety of proposed extension of use / Younes M., Aquilina G., Castle L., Engel K.-H., Fowler P. and other. EFSA Panel on Food Additives and Flavourings (FAF), EFSA Journal. 2019.

4. Sodium Carbonate Supply Chain Profile. EPA 817-F-22-042. December 2022.

5. Sodium Di Hydrogen Phosphate Anhydrous. www.indiamart.com.

URL: https://www.indiamart.com/proddetail/sodium-di-hydrogen-phosphate-anhydrous17138067462.html?srsId=AfmBOopDtZJ8FZpUHIE_OjQkL0HiW5javTs4YxxKOc9O4Hc1EY1dFIvE (дата звернення: 06.04.2025).

6. Пірофосфат натрію як харчова добавка. Система оптимум.

URL: https://www.systopt.com.ua/article-pyrofosfat-natryya-kak-pyshhevaya-dobavka?srsId=AfmBOopgM_RVzPry9FtKJRZ1Fw10BzH67T8mYQD25Z_DIZrwRge3P4 (дата звернення: 06.04.2025).

7. Monosodium Phosphate Supply Chain – Full Profile. EPA 817-F-22-033. December 2022.

8. Hensler, Paul Leonard. USA. Process for manufacturing tetrasodium pyrophosphate. European Patent Office, Patent No. EP0361986A1, 07.02.89. Application number: 89400346.6. Google scholar.

| | | | | | | |
|---|---|---|--|-----------------------------------|-------------------|-----------------------|
| <i>Відповідальна організація</i> НУХТ, каф. ТЖХТ | <i>Технічне узгодження</i> Бойчук Т.М. | <i>Вид документа</i> Пояснювальна записка | <i>Статус документа</i> | | | |
| <i>Власник документа</i> НУХТ | <i>Розробник документа</i> Кияниця В.А. | <i>Назва, додаткова назва</i> СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ | <i>ННІХТ.ХТ-4-14.025.161.077.КР.ПЗ</i> | | | |
| | <i>Документ затверджено</i> Носенко Т.Т. | | <i>Інд. змін.</i> | <i>Дата видання</i> 20.02.2025 | <i>Мова</i> ua | <i>Аркуш</i> 77/80 |

9. Inventor 张益辉 (винахідник: Чжан Іхуей). Sodium pyrophosphate preparation technology. China. Patent No. CN102951625 A. 2013.03.06. Google patents. Current Assignee: guizhou huishui phosphate factory. URL: <https://patents.google.com/patent/CN102951625A/en> (дата звернення: 01.04.2025.)

10. Phosphoric Acid and Phosphates / Schrödter K., Bettermann G., Staffel T., Wahl F., Klein T., Hofmann T. Ullmann's Encyclopedia of Industrial Chemistry. Wiley Online Library. 2012. URL: https://doi.org/10.1002/14356007.a19_465.pub3.

11. Натрій карбонат. URL: <https://testbook.com/chemistry/na2co3> (дата звернення: 06.04.2025).

12. Фосфат натрію (натрій фосфорнокислий) однозаміщений безводний. Система оптимум. URL: <https://www.systopt.com.ua/item-natrij-fosfornokyslyj-fosfat-natriyu-odnozamishhenyj-b-v?srsId=AfmBOooq8ouelyww4JUQDKpTvpLLFSTuFMqTMUp2diOBSR6P4v9c1DV>. (дата звернення: 06.04.2025).

13. Ємцева Г.Ф. Економіка підприємства. Конспект лекцій для здобувачів освітнього ступеня бакалавр спеціальності 161 “Хімічні технології та інженерія” освітньо-професійної програми “Хімічна технологія” денної форми навчання. Київ: НУХТ. 2023. 170 с.

14. Bauer F., Tilsted J. P., Pfister S., Oberschelp C., Kulionis V. Mapping GHG emissions and prospects for renewable energy in the chemical industry. 2023. Current Opinion in Chemical Engineering, Volume 39. URL: <https://doi.org/10.1016/j.coche.2022.100881>.

15. J. Rissman, C. Bataille, E. Masanet et al. Technologies and policies to decarbonize global industry: Review and assessment of mitigation drivers through 2070. 2020. Applied Energy. Volume 266. URL: <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2020.114848>.

16. Awaleh M. O., Soubaneh Y. D. Waste water treatment in chemical industries: the concept and current technologies. 2014. Hydrology Current Research. Vol. 5, Issue 1. P. 1-12. URL: <http://dx.doi.org/10.4172/2157-7587.1000164>.

17. Про затвердження Правил охорони праці для виробництв основної хімічної промисловості: наказ Міністерства надзвичайних ситуацій України від 26.08.2010 № 162. - Зареєстровано в Міністерстві юстиції України 24.09.2010 за № 850/18145.

18. І.Ф. Малезик. Процеси і апарати харчових виробництв. Курсове проектування. Київ НУХТ 2012. 543 с.

19. Bielka P., Kuczyński S., Nagy S. CO₂ Compression and Dehydration for Transport and Geological Storage. 2023. Energies. Volume 16, Issue 4. URL: <https://doi.org/10.3390/en16041804>.

20. Sebastian Posch, Markus Haider. Optimization of CO₂ compression and purification units (CO₂CPU) for CCS power plants. 2012. Fuel. Vol. 101, P. 254-263. URL: <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2011.07.039>.

21. Chih-Hung Huang, Chung-Sung Tan. A Review: CO₂ Utilization. 2014. Aerosol and Air Quality Research. Vol. 14, Issue 2. P. 480–499. URL: <https://doi.org/10.4209/aaqr.2013.10.0326>.

22. J. Kemper, L. Sutherland, J. Watt, S. Santos. Evaluation and analysis of the performance of dehydration units for CO₂ capture. 2014. Energy Procedia, Vol. 63. P. 7568-7584.

URL: <https://doi.org/10.1016/j.egypro.2014.11.792>.

23. Устаткування виробництва високомолекулярних сполук: конспект лекцій для студентів спеціальності 161 «Хімічні технології та інженерія» за спеціалізацією «Хімічні технології високомолекулярних сполук» / укл. В. К. Лукашов. Суми: Сумський державний університет, 2021. 275 с.

24. Нестеренко С. В. Технологія виробництва хімічних речовин і матеріалів: конспект лекцій (для студентів 1 курсу денної та заочної форм навчання другого (магістерського) рівня вищої освіти за спеціальністю 161 – Хімічні технології та інженерія) / С. В. Нестеренко; Харків. нац. ун-т міськ. госп-ва ім. О. М. Бекетова. – ХНУМГ ім. О. М. Бекетова, 2020. – 101 с.

25. Методичні рекомендації до виконання кваліфікаційної роботи [Електронний ресурс]: на здобуття освіт. ступ. "Бакалавр" спец. 161 "Хімічні технології та інженерія" освіт.-проф. програми "Хімічна технологія" ден. та заоч. форм здобуття освіти / уклад.: О. В. Подобій, Т. М. Бойчук ; Нац. ун-т харч. технол. - Київ: НУХТ, 2025. - 75 с. - каф. технології жирів, хімічних технологій харчових добавок та косметичних засобів.

26. Baek J. S., Groll E. A., and Lawless P. B. Piston-cylinder work producing expansion device in a transcritical carbon dioxide cycle. Part I: experimental investigation. 2005. International Journal of Refrigeration. Vol. 28, Issue 2. P. 141-151. URL: doi:10.1016/j.ijrefrig.2004.08.006.

27. Ротаційна (обертова) піч HW003. Сайт виробника обладнання. Wasteprocessingplant. URL: <https://www.wasteprocessingplant.com/quality-13467856-testing-4kw-200kg-h-426x6000mm-cement-rotary-kiln-plant> (дата звернення: 01.06.2025.)

28. Охолоджувач для порошків YPR-200. Сайт виробника обладнання. Інтернет-джерело. URL: <https://lingyumachinery.en.made-in-china.com/product/wBVmLEYjJURp/China-200-Kg-H-Powder-Coatings-Compact-Cooler-Good-Cooling-Performance.html> (дата звернення: 01.06.2025).

29. Дезінтегратор ДІ1-06 від «НВП Крамтехцентр». Сайт виробника обладнання. URL: <https://www.kramtechcenter.com.ua/di1-06-harakteristiki/> (дата звернення: 01.06.2025).

30. Автоматичний пакувальний апарат SXP25PB. Сайт виробника. URL: <https://www.saimopackingmachine.com/sale-13140540-high-accuracy-25kg-bag-chemical-powder-packing-machine.html> (дата звернення: 01.06.2025).

31. Професійно про Е-добавки та продукти харчування. Інтернет-джерело. <https://proe.info/uk>. URL: <https://proe.info/uk/additives/e450> (дата звернення: 01.06.2025).

32. ГОСТ 20680-86. Аппараты с механическими перемешивающими устройствами вертикальные. Общие технические требования.