

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

**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)

лютого 2026 р.

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

лютого 2026 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 карбонату калію

Виконав: здобувач 5 курсу, групи ЗХТ-5-3
БЄЛЯЄВА Софія Сергіївна
(прізвище, ім'я та по батькові повністю) (підпис)

Керівник РОМАНОВА Олеся Олександрівна
(прізвище, ім'я та по батькові повністю) (підпис)

Консультанти Ігор ЖИТНЕЦЬКИЙ
(Ім'я ПРІЗВИЩЕ) (підпис)

(Ім'я ПРІЗВИЩЕ) (підпис)

(Ім'я ПРІЗВИЩЕ) (підпис)

Рецензент Віра ІЩЕНКО
(Ім'я ПРІЗВИЩЕ) (підпис)

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

Здобувач(ка) _____
(підпис)

Київ – 2026 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

З А В Д А Н Н Я

НА КВАЛІФІКАЦІЙНУ РОБОТУ ЗДОБУВАЧА

Беляєва Софія Сергіївна

(прізвище, ім'я, по батькові)

1. Тема роботи Удосконалення технології виробництва карбонату калію

керівник роботи Романова Олеся Олександрівна, к.т.н., доцент

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

затверджені наказом закладу вищої освіти від “04” листопада 2025 року № 902-КС

2. Строк подання здобувачем роботи 04.02.2026 р.

3. Вихідні дані до роботи потужність виробництва 5000 кг/добу

4. Зміст пояснювальної записки (перелік питань, які потрібно розробити)
Вступ, аналітичний огляд науково-технічної літератури, технологічна частина, техніко-економічне обґрунтування, організація та контроль якості продукції, екологічна безпека та 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., доцент, к.т.н.	05.01.2026	30.01.2026

7. Дата видачі завдання _____ 05 листопада 2025 р. _____

КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

№	Назва етапів виконання кваліфікаційної роботи	Строк виконання етапів роботи	Примітка
1	ВСТУП	05.11.2025	
2	РОЗДІЛ 1 АНАЛІТИЧНИЙ ОГЛЯД НАУКОВО-ТЕХНІЧНОЇ ЛІТЕРАТУРИ	05.11.2025-17.11.2025	
3	РОЗДІЛ 2 ТЕХНОЛОГІЧНА ЧАСТИНА	18.11.2025-30.01.2026	
4	РОЗДІЛ 3 ТЕХНІКО-ЕКОНОМІЧНЕ ОБГРУНТУВАННЯ	16.12.2025-19.12.2025	
5	РОЗДІЛ 4 ОРГАНІЗАЦІЯ ТА КОНТРОЛЬ ЯКОСТІ ПРОДУКЦІЇ	20.12.2025-28.12.2025	
6	РОЗДІЛ 5 ЕКОЛОГІЧНА ЧАСТИНА ТА ОХОРОНА ПРАЦІ	29.12.2025-05.01.2026	
7	ВИСНОВКИ	30.01.2026-01.02.2026	
8	СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ	15.01.2026-25.01.2026	
9	ГРАФІЧНИЙ МАТЕРІАЛ. ПРИНЦИПОВА-ТЕХНОЛОГІЧНА СХЕМА	05.01.2026-15.01.2026	
10	ГРАФІЧНИЙ МАТЕРІАЛ. АПАРАТУРНО-ТЕХНОЛОГІЧНА СХЕМА	16.01.2026-25.01.2026	
11	ГРАФІЧНИЙ МАТЕРІАЛ. ЗАГАЛЬНИЙ ВИГЛЯД АПАРАТУ	05.01.2026-30.01.2026	
12	ПЕРЕДЗАХИСТ, ПЕРЕВІРКА НА АКАДЕМПЛАГІАТ, РЕЦЕНЗУВАННЯ КР	02.02.2026-04.02.2026	

Здобувач

(підпис)

Софія БЄЛЯЄВА

(Ім'я ПРІЗВИЩЕ)

Керівник роботи

(підпис)

Олеся РОМАНОВА

(Ім'я ПРІЗВИЩЕ)

РЕФЕРАТ

Беляєва С.С. Удосконалення технології отримання карбонату калію.

ПОЯСНЮВАЛЬНА ЗАПИСКА: 90 С., 18 РИС., 14 ТАБЛ. 32
ЛІТЕРАТУРНИХ ДЖЕРЕЛ.

У даній кваліфікаційній роботі проведено літературний аналіз та узагальнено інформацію щодо сучасних методів одержання карбонату калію та напрямів удосконалення технологічних процесів його виробництва.

Розглянуто основні фізико-хімічні властивості карбонату калію та вимоги до якості готового продукту. Наведено характеристику основної та допоміжної сировини для отримання карбонату калію.

У роботі запропоновано удосконалену безперервну технологічну схему виробництва карбонату калію, що базується на електролізі водного розчину хлориду калію з подальшою карбонізацією гідроксиду калію діоксидом вуглецю. Розроблено принципову та апаратурно-технологічну схеми процесу.

Виконано розрахунок матеріального балансу хіміко-технологічного процесу, здійснено підбір основного технологічного обладнання та наведено розрахунок основного апарата. Також проведено техніко-економічне обґрунтування запропонованого способу виробництва.

Запропоновано заходи з охорони праці та навколишнього середовища для забезпечення безпечної експлуатації підприємства та мінімізації впливу на довкілля.

КЛЮЧОВІ СЛОВА: КАРБОНАТ КАЛІЮ, ГІДРОКСИД КАЛІЮ, ВУГЛЕКИСЛИЙ ГАЗ, ТЕХНОЛОГІЯ ВИРОБНИЦТВА, КАРБОНІЗАЦІЯ, ЯКІСТЬ, БЕЗПЕКА, СИРОВИНА.

ABSTRACT

Bieliaieva S.S. Improvement of Potassium Carbonate Production Technology.

EXPLANATORY NOTE: 90 pages, 18 figures, 14 tables, 32 references.

In this qualification work, a literature review was conducted and information on modern methods of potassium carbonate production as well as directions for improving technological processes of its manufacture was summarized.

The main physicochemical properties of potassium carbonate and the quality requirements for the final product were considered. The characteristics of the main and auxiliary raw materials for potassium carbonate production were presented.

An improved continuous technological scheme for potassium carbonate production based on the electrolysis of an aqueous potassium chloride solution followed by carbonation of potassium hydroxide with carbon dioxide is proposed. A process flow diagram and an equipment and technological scheme were developed.

The material balance of the chemical-technological process was calculated, the main technological equipment was selected, and the calculation of the main apparatus was performed. A technical and economic justification of the proposed production method was also provided.

Measures for occupational safety and environmental protection were proposed to ensure safe operation of the enterprise and to minimize its impact on the environment.

KEY WORDS: POTASSIUM CARBONATE, POTASSIUM HYDROXIDE, CARBON DIOXIDE, PRODUCTION TECHNOLOGY, CARBONATION, QUALITY, SAFETY, RAW MATERIALS.

ЗМІСТ

ВСТУП.....	7
РОЗДІЛ I АНАЛІТИЧНИЙ ОГЛЯД ЛІТЕРАТУРИ.....	9
1.1 Властивості карбонату калію.....	9
1.2 Економічність та вплив на навколишнє середовище.....	12
1.3 Галузі використання.....	14
1.4 Стан сировинної бази.....	18
1.5 Аналіз існуючих технологій виробництва карбонату калію.....	19
1.6 Шляхи удосконалення технології отримання карбонату калію.....	23
РОЗДІЛ II ТЕХНОЛОГІЧНА ЧАСТИНА.....	26
2.1 Характеристика вихідної сировини для виробництва.....	26
2.2 Принципова технологічна схема виробництва.....	28
2.3 Матеріальний розрахунок.....	31
2.4 Розрахунок та підбір основного обладнання.....	48
2.6 Опис апаратурно-технологічної схеми.....	63
2.5 Розрахунок барабанної сушарки.....	66
РОЗДІЛ III ТЕХНІКО-ЕКОНОМІЧНЕ ОБҐРУНТУВАННЯ.....	72
РОЗДІЛ IV ОРГАНІЗАЦІЯ КОНТРОЛЮ ЯКОСТІ ПРОДУКЦІЇ.....	77
РОЗДІЛ V ЕКОЛОГІЧНА ЧАСТИНА ТА ОХОРОНА ПРАЦІ	81
5.1 Охорона праці на підприємстві.....	81
5.2 Заходи з охорони навколишнього середовища на виробництві.....	83
ВИСНОВКИ.....	85
СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ.....	86

<i>Відповідальна організація</i> НУХТ, каф. ТЖХТ	<i>Технічне узгодження</i> Романова О.О	<i>Вид документа</i> Пояснювальна записка	<i>Статус документа</i>			
НУХТ	<i>Розробник документа</i> Беляєва С.С.	<i>Назва, додаткова назва</i> ЗМІСТ	<i>ННІХТ.ЗХТ-5-3.026.161.006.КР.ПЗ</i>			
	<i>Документ затверджено</i> Носенко Т.Т.		<i>Інд. змін.</i>	<i>Дата видання</i> 05.11.2025	<i>Мова</i> ua	<i>Аркуш</i> 6/90

ВСТУП

Карбонат калію (K_2CO_3) є неорганічною сполукою, яка широко використовується в харчовій промисловості. Він виконує функції регулятора кислотності, стабілізатора та розпушувача. У харчових продуктах застосовується для зниження кислотності, покращення текстури та як джерело калію [1].

Карбонат калію широко використовується в різних галузях промисловості завдяки своїм фізико-хімічним властивостям. Основними напрямками його застосування є склоробне виробництво, хімічна та мийна промисловість, очищення технічних газів, а також сільське господарство, де він використовується як перспективне безхлорне калійне добриво. Значна сфера використання карбонату калію зумовлює актуальність удосконалення технологій його виробництва та підвищення ефективності промислових процесів. [2].

Актуальним є питання вдосконалення технологічних процесів отримання карбонату калію який є важливим компонентом у хімічній, харчовій, сільськогосподарській та скляній промисловості. Сучасна харчова промисловість пред'являє високі вимоги до якості, безпеки та чистоти кінцевого продукту. У зв'язку з цим особливої актуальності набувають дослідження, спрямовані на оптимізацію технології виробництва карбонату калію, мінімізацію домішок, підвищення енергоефективності процесу та забезпечення екологічної безпеки. Підвищення попиту на екологічно чисті продукти та сировину для харчової галузі потребує розробки ефективних технологічних рішень з урахуванням сучасних вимог.

Метою кваліфікаційної роботи є обґрунтування технологічних рішень щодо удосконалення виробництва карбонату калію.

Відповідальна організація НУХТ, каф. ТЖХТ	Технічне узгодження Романова О.О	Вид документа Пояснювальна записка	Статус документа			
Власник документа НУХТ	Розробник документа Беляєва С.С.	Назва, додаткова назва ВСТУП	ННІХТ.ЗХТ-5-3.026.161.007.КР.ПЗ			
	Документ затверджено Носенко Т.Т.		Інд. змін.	Дата видання 05.11.2025	Мова ua	Аркуш 7/90

Актуальність роботи є удосконаленні технології виробництва карбонату калію, що зумовлена необхідністю підвищення ефективності технологічних процесів, забезпечення стабільної якості продукту та зменшення енергетичних і матеріальних витрат.

Об'єкт дослідження – технологічний процес отримання карбонату калію із використанням гідроксиду калію та вуглекислого газу, а також пов'язані з цим технічні, екологічні та економічні аспекти.

Предмет дослідження – карбонат калію як технологічний продукт із широким застосуванням у промисловості, зокрема в харчовому виробництві.

Завдання кваліфікаційної роботи:

- Провести аналітичний огляд літературних джерел щодо властивостей, застосування та існуючих технологій виробництва карбонату калію.
- Дослідити стан сировинної бази та охарактеризувати вихідну сировину для виробництва карбонату калію.
- Запропонувати шляхи удосконалення технології отримання карбонату калію та розробити принципово-технологічну й апаратурно-технологічну схеми виробництва.
- Виконати матеріальний розрахунок хіміко-технологічного процесу та розрахунок основного технологічного обладнання.
- Провести техніко-економічне обґрунтування запропонованої технології.
- Розробити заходи з охорони праці, контролю якості продукції та охорони навколишнього середовища

РОЗДІЛ І АНАЛІТИЧНИЙ ОГЛЯД НАУКОВО-ТЕХНОЛОГІЧНОЇ ЛІТЕРАТУРИ

1.1 Властивості карбонату калію

Карбонат калію є однією з найважливіших неорганічних сполук, які застосовуються в промисловості, незважаючи на те, що його історія сягає найдавніших часів. У місті Помпеї карбонат калію вилучали з попелу та змішували з гашеним вапном для виготовлення мила. Зі зростанням західної цивілізації паралельно зростало і використання цієї лужної сполуки. Виробництво карбонату калію вимагало такої кількості деревини, що лісам Європи загрожувало винищення. У період Французької революції винахід Леблана дозволив масово замінити карбонат калію на карбонат натрію [3].

До 1870 року карбонат калію, який отримували з попелу, був основною калійною сполукою. У ті часи гідроксид калію (KOH, каустичний поташ) виготовляли шляхом реакції карбонату калію з гідроксидом кальцію. Однак із відкриттям у 1860 році калій хлориду у відходах соляних шахт Штрассфурта (Німеччина), ця методика була змінена. Сьогодні гідроксид калію виробляють методом електролізу розчину хлориду калію, після чого його насичують вуглекислим газом для утворення карбонату калію [3].

Хімічна формула K_2CO_3 — це загальноприйняте скорочення для карбонату калію, який також називають PotCarb. Інші вживані назви — PC, поташ (carbonate of potash), перловий попіл (pearl ash), та вуглецева кислота, дипоташієва сіль (carbonic acid, dipotassium salt) [3].

У прикладній хімічній технології вибір між карбонатом калію та карбонатом натрію зазвичай визначається економічними чинниками або бажаними фізико-хімічними властивостями. Основні причини використання карбонату калію включають [3]:

Відповідальна організація НУХТ, каф. ТЖХТ	Технічне узгодження Романова О.О	Вид документа Пояснювальна записка	Статус документа			
Власник документа НУХТ	Розробник документа Беляєва С.С.	Назва, додаткова назва РОЗДІЛ І АНАЛІТИЧНИЙ ОГЛЯД ЛІТЕРАТУРИ	ННІХТ. ЗХТ-5-3.026.161.009.КР.ПЗ			
	Документ затверджено Носенко Т.Т.		Інд. змін.	Дата видання 05.11.2025	Мова ua	Аркуш 9/90

- джерело калій-іонів;
- буферна лужність;
- вища розчинність порівняно з карбонатом натрію;
- більша хімічна активність іонів калію;
- можливість застосування у виробництві без натрію;
- покращення флюсуючих властивостей скла;
- зниження температури замерзання води, що дозволяє використовувати його у низькотемпературних умовах.

Карбонат калію має широкий спектр застосування, включаючи [3]:

- виробництво гідрокарбонату калію;
- відео-скло, спеціальне скло, кераміку;
- агрохімію, добрива;
- силікат калію, харчові продукти;
- мийні засоби, фотографічні хімікати;
- очищення газів, кормові добавки;
- добавки до гуми, каталізatori полімеризації;
- вогнегасні засоби, цемент, текстиль.

Карбонати калію харчової добавки (E501) поділяються на карбонат калію (i) і гідрокарбонат калію (ii) [4].

E501 (i) Карбонат калію — регулятор кислотності, стабілізатор, поживне середовище для дріжджів, разрихлювач, осушувач [4].

Синоніми: калій вуглекислий, поташ, калієва сіль карбонатної кислоти, дикалій карбонат, potassium carbonate, dipotassium carbonate, potassium salt of carbonic acid [4].

Будова. Карбонат калію є калієвою сіллю карбонатної (вугільної) кислоти, існує у вигляді безводної форми або сесквігідрату:

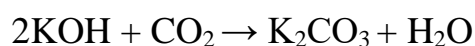


Хімічна назва: калію карбонат (калію карбонат сесквігідрат).

Фізико-хімічні властивості. Це білий гігроскопічний порошок з т. плав. 891°C, який добре розчиняється у воді (112 г/100 г при 20°C); не розчиняється в етанолі. Втрати при висушуванні становлять не більше 5,0% для безводної солі і 18,0% для сесквігідрату (180°C, 4 години) [4].

Джерело. Карбонат калію входить до складу попелу деяких рослин: соняшника (30-40% у перерахунку на K₂O), гречки (25%), соломи (20%), берези (15%) [4].

Добування. Один з основних методів одержання карбоната калію полягає у карбонізації розчинів гідроксиду калію діоксидом вуглецю [4]:



Вміст основної речовини у кінцевому продукті становить не менше 99,0%, арсену - не більше 3 мг/кг, плюмбуму - не більше 5 мг/кг, меркурію - не більше 1 мг/кг [4].

Карбонат калію є дигідратною сіллю вугільної кислоти [5].

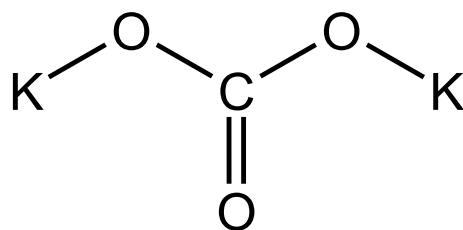


Рисунок 1.1 – Молекулярна структура карбонату калію

Незважаючи на вміст вуглецю, карбонат калію вважається неорганічною речовиною [5].

Карбонат калію є дигідратною сіллю, доступною у вигляді білого порошку (насипна щільність — 37 фунтів/фут³), гранульованих кристалів (75–84 фунтів/фут³) або концентрованого розчину (47% карбонату калію) [5].

Порошкоподібна та кристалічна форми є гігроскопічними та розріджуються в умовах підвищеної вологості [5].

Таблиця 1.1 – Властивості карбонату калію

Властивість	Значення – Карбонат калію
Фізичний стан при 20°C	Білий, гігроскопічний порошок або кристали
Запах	Без запаху
Колір	Білий / безбарвний
Молекулярна формула	K_2CO_3
Молекулярна маса (г/моль)	138,21
Густина (г/см ³) при 25°C	2,29
Розчинність у воді (г K_2CO_3 / 100 г H_2O) при 20°C	110,5
Константи дисоціації при 25°C	6,35 (pKa ₁) та 10,33 (pKa ₂), 3,67 (pKb ₁) та 7,65 (pKb ₂)
Температура плавлення (°C)	891°C
pH водного розчину	11,6
Стабільність	Розпливається у вологому середовищі або при контакті з водою
Реактивність	Несумісний з трифторидом хлору та магнієм
Смак	Лужний

1.2 Економічність та вплив на навколишнє середовище

Виробництво K_2CO_3 пов'язане з викидами, енергоспоживанням і впливом на довкілля [5].

Згідно з технічним звітом USDA, основні ресурси, що споживаються під час виробництва K_2CO_3 , включають електроенергію, природний газ, воду та сировину (KOH і CO_2). Викиди, пов'язані з виробництвом, включають тепло та CO_2 в атмосферу, а також іони K^+ та OH^- у воду [5].

Дослідження, проведене Grant et al. (2014), показало, що виробництво K_2CO_3 спричиняє менше закислення та евтрофікації порівняно з іншими синтетичними сполуками, однак все ще сприяє глобальному потеплінню, виснаженню озонового шару та утворенню канцерогенів [5].

Суворі правила управління рН стічних вод відповідно до Директиви ЄС про промислові викиди сприяли впровадженню процесів хімічної нейтралізації. Муніципальні водоочисні споруди в Німеччині тепер використовують розчини карбонату калію для 68% своїх потреб у регулюванні рН, замінюючи традиційні системи на основі вапна через нижчий рівень утворення мулу. З 2020 року використання сполуки в системах десульфурації димових газів зростає на 12% щорічно, особливо на вугільних електростанціях, які переходять на відповідність вимогам щодо викидів [6]

Оцінка екологічного ризику карбонату калію (K_2CO_3), проведена Агентством з охорони навколишнього середовища США (EPA), свідчить про його низьку токсичність для більшості організмів. Для наземних організмів, карбонат калію вважається практично нетоксичним для птахів, ссавців, бджіл та інших безхребетних. Карбонат калію не очікується бути токсичним для рослин при дотриманні рекомендованих умов застосування. Таким чином, при правильному використанні карбонат калію має мінімальний екологічний ризик для більшості організмів [7].

Карбонат калію набуває все більшого значення в пошуках стійких і відновлюваних рішень [8]:

- Каталізатор у зеленій хімії: використовується як каталізатор для забезпечення екологічно чистих реакцій, таких як ті, що беруть участь у виробництві біорозкладаного пластику та біопалива.
- Зберігання відновлюваної енергії: Його лужні властивості досліджуються при розробці систем зберігання енергії, таких як вдосконалені батареї та паливні елементи.

- Поглинання вуглецю: Вивчаються розчини карбонату калію для уловлювання та зберігання атмосферного CO₂, що сприяє зусиллям щодо пом'якшення наслідків зміни клімату.

Універсальність карбонату калію робить його цінним компонентом у стійких промислових практиках [8]:

- Зменшення використання енергії: зниження температури плавлення сировини у виробництві скла допомагає економити енергію та мінімізувати викиди.
- Мінімізація відходів: Його використання для очищення та пом'якшення води сприяє зменшенню відходів та більш чистим циклам виробництва.
- Екологічно чисті альтернативи: заміна більш агресивних хімікатів у таких процесах, як миловаріння та регулювання рН, зменшує вплив на навколишнє середовище.

Вплив на здоров'я: Карбонат калію є їдкою речовиною для шкіри та очей. Основні ризики виникають під час роботи з речовиною на виробництві. Рекомендовано застосовувати засоби індивідуального захисту, вентиляцію, та уникати контакту зі шкірою й очима [9].

Управління ризиками: Хоча речовина нетоксична й невибухонебезпечна, вона лужна і може викликати подразнення. Для безпечного поводження рекомендується захисний одяг, окуляри, респіратори, гумові рукавиці та чітке маркування обладнання [9].

1.3 Галузі використання харчової добавки

Карбонат калію (K₂CO₃) є важливою неорганічною сполукою, що має широкий спектр застосування завдяки високій розчинності у воді, лужним властивостям та здатності вступати у реакції нейтралізації. Значні обсяги використання карбонату калію зумовлюють його промислову важливість та актуальність удосконалення технологій виробництва [2].

Основними напрямками застосування карбонату калію є склоробна промисловість, де його використовують для виробництва скла та кришталю, а також як компонент для регулювання складу та властивостей скляної маси. У хімічній промисловості K_2CO_3 виступає як один із основних реагентів, що використовується для подальшого синтезу калієвих сполук різного призначення. Крім того, дана сполука використовується для очищення технічних газів від сірководню та діоксиду вуглецю [2].

У будівництві карбонат калію застосовується при виконанні бетонних робіт у зимовий період як протиморозна добавка, що сприяє зниженню температури кристалізації води та підвищує ефективність твердіння цементних сумішей при низьких температурах. У сільському господарстві карбонат калію є перспективним безхлорним калійним добривом, яке сприяє нейтралізації кислотності ґрунтів та підвищенню врожайності сільськогосподарських культур [2].

Карбонат калію є як сіллю карбонату, так і сіллю калію, з широким спектром історичних і сучасних застосувань у харчовій промисловості, сільському господарстві та виробництві. Використовується у виробництві жовтої лужної локшини з пшениці, що характерна для китайської та японської кухні. Під час голландування какао карбонат калію застосовують для надання продукту темнішого кольору [5].

Використання у виробництві макаронних і борошняних виробів[5]:

- Проблеми зі здоров'ям, пов'язані зі споживанням натрію з різними натрієвими солями, призвели до використання карбонату калію в тісті.
- Зокрема, карбонат калію використовується у виробництві жовтої лужної пшеничної локшини, поширеної в китайській та японській кухнях.
- Виробники локшини використовують карбонат калію як кондиціонер тіста.
- Карбонат калію безпосередньо впливає на пшеничну клейковину, покращуючи її міцність і текстуру.

Використання у переробці какао (лужна обробка, Dutching) [5]:

- У виробництві какао процес “Dutching” цінується за отримання какао з характерним темно-коричневим кольором.
- Цей процес використовує карбонат калію та інші лужні карбонати для відновлення бажаної темної пігментації, яка частково втрачається під час видалення какао-масла з какао-порошку.
- У цьому процесі карбонат калію розчиняють у воді та наносять на ферментовані какао-боби або частково обсмажені какао-крупки.

Використання у виробництві родзинок [5]:

- У виробництві родзинок карбонат калію може використовуватися як сушильний агент для скорочення часу сушіння.
- Карбонат калію має тривалу історію використання як сушильний агент у виробництві родзинок.
- У сучасному виробництві карбонат калію застосовують як передзбиральне обприскування плодів або як передсушильне занурення в оптимальній концентрації 0,6 % разом з оливковою олією або етилолеатом.

Використання у виноробстві [5]:

- Карбонат калію використовується для підвищення рН під час деацидифікації вина.
- Ця сполука нейтралізує кислотність і призводить до випадання виннокислих солей у осад.

Використання у пивоварінні (екстракти хмелю) [5]:

- Управління з контролю за продуктами і ліками США зазначає карбонат калію як дозволена речовину у виробництві модифікованого екстракту хмелю.
- Карбонат калію або інші лужні карбонати використовуються для отримання більш розчинних форм α -кислот після їх початкової екстракції з хмелю.

Використання у м'ясній промисловості [5]:

- Підприємства з переробки м'яса досліджують використання карбонату калію як заміни фосфатів у перероблених м'ясних продуктах.
- Одне дослідження показало, що карбонат калію при застосуванні в концентрації 0,3 % або 0,5 % зберігав колір свинини, зберігав ніжність і зменшував втрати під час теплової обробки.

Загальна функціональна роль у харчових продуктах:

- Карбонат калію є помірно сильною основою і тому корисний як луг у процесах переробки та обробки харчових продуктів.
- На відміну від багатьох інших карбонатів, карбонат калію добре розчиняється у воді, що дозволяє легко реалізувати лужні властивості карбонат-іона.

Карбонати калію, позначені в міжнародній системі нумерації харчових добавок як E 501 (Potassium carbonates), є дозволеною харчовою добавкою в рамках законодавства Європейського Союзу та міжнародних стандартів безпеки харчових продуктів [10].

Відповідно до Regulation (EC) No 1333/2008 of the European Parliament and of the Council про харчові добавки, E 501 включено до Списку дозволених харчових добавок, які можуть використовуватися у харчових продуктах відповідно до принципу quantum satis. Це означає, що добавка може застосовуватися в кількості, достатній для досягнення технологічного ефекту та відповідно до належної виробничої практики — Good Manufacturing Practice (GMP), без встановлення конкретного числового обмеження [10].

Міжнародний стандарт Codex General Standard for Food Additives (GSFA) також включає карбонати калію до переліку харчових добавок, дозволених для використання в продуктах харчування за умов належної виробничої практики (GMP) [10].

Для добавки Е 501 не встановлено конкретної прийнятної добової норми (ADI), що узгоджується з її класифікацією як речовини, безпечної при використанні в межах GMP і принципу quantum satis [10].

1.4 Стан сировинної бази

Карбонат калію (Е501) виробляється з високочистих неорганічних сполук, головним чином з гідроксиду калію (KOH) та вуглекислого газу (CO₂). Гідроксид калію отримують шляхом електролізу розчину хлориду калію (KCl), що є основним джерелом калію в промисловості [5].

Реакція гідроксиду калію (KOH) з діоксидом вуглецю або збагаченими CO₂ димовими газами (наприклад, із димарів або вапняних печей) для отримання карбонату калію часто використовується як частина процесів уловлювання та зберігання вуглецю. На першому етапі утворюється гідрат карбонату калію, який пізніше кристалізується до безводної солі [5].

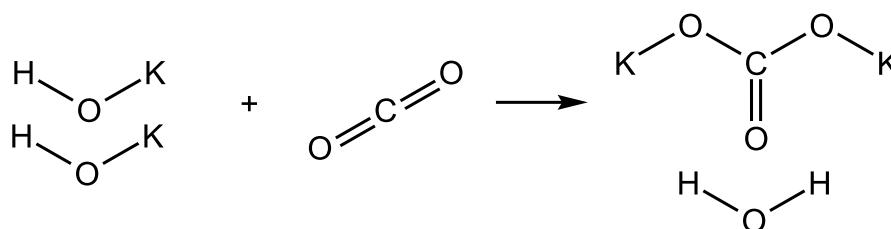


Рисунок 1.2 – Хімічна реакція гідроксиду калію з діоксидом вуглецю, внаслідок якої утворюється карбонат калію та вода

Гідроксид калію майже виключно виробляється електролізом хлориду калію (KCl) із застосуванням діафрагмових, мембранних або ртутних електролізерів. До 1985 року домінували діафрагмовий та ртутний методи, причому останній був кращим для отримання високої чистоти до стадії концентрування. Обидва методи нині регулюються через вимоги до очищення стічних вод [5].

Сучасне виробництво базується на мембранній технології, де в електролізерах використовуються полімерні мембрани, що дозволяє отримувати розчин з низьким вмістом хлоридів і концентрацією KOH на рівні

32%. Незалежно від типу електролізера, усі продукти КОН випарюються до кінцевої концентрації 45–50% [5].

Джерела CO₂ високої чистоти отримують із промислових процесів, зокрема виробництва електроенергії, цементу, етанолу, аміаку, а також під час виплавки сталі та чавуну. Хоча CO₂ трапляється і в природі, його вилучення з навколишнього повітря шляхом дистиляції на сьогодні є економічно недоцільним [5].

Регулюючі дозволи на карбонат калію як речовину GRAS (Common Recognized As Safe) розширили його використання в переробці какао та хлібобулочних виробів. У 2023 році світові ринки інгредієнтів какао спожили 54 000 метричних тонн розчину карбонату калію, головним чином для процесів ощелачивання, які покращують смак і розчинність. Вимоги до чистої етикетки стимулюють заміну синтетичних добавок розчинами на мінеральній основі, такими як карбонат калію, в органічному виробництві харчових продуктів [7].

Очікується, що сегмент харчових продуктів буде найбільш швидкозростаючим на ринку карбонату калію. Таке швидке зростання зумовлене все більшим застосуванням карбонату калію як харчової добавки, перш за все як розпушувача, стабілізатора та джерела калію в різних харчових продуктах. Зростаюча обізнаність споживачів щодо користі споживання калію для здоров'я та зростаючий попит на оброблені та напівфабрикати значно сприяють цьому прискореному зростанню. Регулюючі органи, такі як Управління з санітарного нагляду за якістю харчових продуктів і медикаментів, визнають карбонат калію загальновизнаною безпечною (GRAS) речовиною для використання в харчових продуктах. Оскільки харчова промисловість продовжує розширювати та диверсифікувати свої продуктивні пропозиції, очікується, що попит на харчовий карбонат калію продемонструє найбільш значні темпи зростання в прогнозованому періоді [8].

1.5 Аналіз існуючих технологій виробництва карбонату калію

Раніше переважно використовували гідратований карбонат калію з масовою часткою води близько 16 %, оскільки безводна форма характеризувалась підвищеною гігроскопічністю. Однак із розвитком технологічних процесів виробництва та вдосконаленням методів пакування, транспортування і зберігання сипучих матеріалів відбулося поступове впровадження безводного гранульованого карбонату калію. [3].

Поширеним способом є одержання кальцинованого PotCarb, що включає кілька стадій після рідкофазної взаємодії каустичного поташу з CO_2 . Завершальним етапом є термообробка для видалення води кристалізації. Також застосовують іонообмінні методи, які є багатоступеневими, потребують різної сировини та супроводжуються утворенням побічних продуктів [3].

Більш практичним підходом до виробництва безводного карбонату калію є використання реактора з псевдозрідженим шаром. Цей процес дозволяє здійснювати одноетапне безперервне виробництво матеріалу, який не потребує додаткової очистки. Хоча клієнти найчастіше замовляють саме суху форму, оскільки PotCarb легко розчиняється, виготовлення водних розчинів не становить проблеми [3].

Одержання карбонату калію з содо-поташних розчинів глиноземного виробництва:

При виробництві глинозему з нефеліну утворюються лужні відхідні розчини, що містять значні кількості Na_2CO_3 (≈ 157 г/л), K_2CO_3 (≈ 62 г/л), K_2SO_4 (≈ 15 г/л) та сліди заліза і хлоридів. Ці розчини переробляють для отримання содо-поташної суміші та карбонату калію [2].

Наявність гідрокарбонатів робить розчини агресивними до сталевих обладнання, що підвищує вміст заліза у продукті. Для зменшення корозії застосовують нейтралізацію NaOH , що дозволяє знизити домішки заліза до 0,001–0,002 % [2].

Технологія включає послідовні стадії випарювання та відокремлення

потім випарюють при 130–132 °С до насичення Na_2CO_3 , K_2SO_4 і KNaCO_3 та відокремлюють осад центрифугуванням. Наступне випарювання при 105–112 °С дозволяє виділити KNaCO_3 і K_2SO_4 та підвищити концентрацію K_2CO_3 до ≈ 1060 г/л.

Концентрований розчин охолоджують до 45–50 °С для кристалізації гідратованого карбонату калію $\text{K}_2\text{CO}_3 \cdot 1,5\text{H}_2\text{O}$. Кристали відокремлюють центрифугуванням і спрямовують споживачам, а матковий розчин повертають у виробництво [2].

Одержання карбонату калію із золи соняшника, бардяного вугілля:

Переробка золи соняшника та бардяного вугілля на карбонат калію на практиці не набула широкого застосування через високі енергетичні витрати та недостатню чистоту продукту. Вміст компонентів у такому карбонаті калію становить приблизно: 81%: K_2CO_3 ; 2,5%: K_2SO_4 ; 6,4%: KCl і 10%: Na_2CO_3 [2].

Виробництво карбонату калію електролізом хлориду калію:

Електролізний метод передбачає отримання KOH із розчину KCl із подальшою карбонізацією до K_2CO_3 . Цей спосіб є енергомістким і багатостадійним, а кінцевий продукт часто містить домішки хлоридів через неповне розкладання KCl . Витрати електроенергії складають понад 2340 кВт•год на 1 т KOH (без урахування теплової енергії) і близько 190 кВт•год на 1 K_2CO_3 [2].

Використання амінів для виробництва карбонату калію:

Через високу розчинність карбонату калію порівняно з содою, його отримання за методом Сольве неможливе. Тому сучасні технології отримання поташу все частіше базуються на використанні розчинів хлориду калію з органічними амінами та їх солями як висолюючими агентами. Важливим технологічним параметром у цих процесах є температура кипіння амінів: аміни з точкою кипіння нижче 100 °С відносять до низькокиплячих, а ті, що киплять вище 100 °С — до висококиплячих [2].

Низькокиплячі аміни легко відокремлюються від рідкої фази на стадії регенерації дистиляцією з інертним теплоносієм, наприклад водяною парою.

Висококиплячі аміни не піддаються простій регенерації шляхом додавання лугу та дистиляції [2].

У промисловості застосовують лише низькокиплячі аміни, зокрема триметиламін і ізопропіламін, використовуючи при цьому апаратурні рішення, аналогічні методам отримання соди за Сольве. Вихід продукту при цьому становить 75–90 %. Найбільш ефективним реагентом вважається діетиламін, що дозволяє досягти виходу карбонату калію до 99,6 %. Діетиламін є безбарвною рідиною з характерним аміачним запахом, має температуру кипіння 55 °С при атмосферному тиску, не утворює азеотропних сумішей з водою, що полегшує його відокремлення під час регенерації. За токсикологічною класифікацією належить до 4 класу небезпеки і має низьку шкідливість для людини [2].

У сучасній практиці одним із можливих альтернативних джерел отримання карбонату калію є використання зол з біомаси, зокрема лушпайки какао. Як зазначають дослідники, «основними катіонними видами є калій, кальцій і магній (а також натрій), які присутні у вигляді карбонатів (K_2CO_3 , $CaCO_3$, $MgCO_3$, Na_2CO_3)» (Recycling, 2020, 5, 23, р. 3). Проведений хімічний аналіз показав, що «середній вміст калію становив 1,63 мас.%. Це дає вихід K_2CO_3 у розмірі 5,76 мас.% від початкової маси какао-лушпайки». Для вилучення калійних солей із золи застосовується метод екстракції водою. Автори підкреслюють: «найкращий підхід – додати золу у воду з перемішуванням. Калієві (та натрієві) солі легко розчиняються, утворюючи розчин карбонату калію та гідроксиду калію, який є сильно лужним». Такий розчин придатний як добриво або для подальшого концентрування й кристалізації калійної солі. У роботі також вказується на історичне значення цього методу: «отримання карбонату калію з деревної золи має давню історію. Насправді, перший патент, виданий у США, стосувався вдосконалення процесу видобутку карбонату калію з деревної золи» [6].

1.6 Шляхи удосконалення технології отримання карбонату калію

Удосконалення стадії карбонізації

Для підвищення ефективності процесу карбонізації у запропонованій технології виробництва карбонату калію було впроваджено встановлення багатопереливних тарілок у нижній частині колони карбонізації замість однопереливних. Таке технічне рішення забезпечує більш рівномірний розподіл CO_2 по перетину колони, що критично важливо у нижній частині, де відбувається введення газу та організація протитечійного контакту газової та рідкої фаз [11].

Впровадження багатопереливних тарілок забезпечує такі технічні переваги [11]:

1. Підвищення ефективності масо- та теплообміну у колоні карбонізації, особливо в критичній зоні контакту CO_2 та КОН.
2. Оптимізація умов для кристалізації K_2CO_3 , що сприяє отриманню продукту з більш однорідною гранулометриєю та мінімальною кількістю дефектних кристалів.
3. Зменшення утворення кристалів неправильної форми та з нерівною поверхнею, що підвищує якість кінцевого продукту і знижує втрати під час фільтрування та випарювання.

Таким чином, впровадження багатопереливних тарілок дозволяє підвищити технологічну стабільність процесу карбонізації, зменшити втрати K_2CO_3 та покращити фізико-хімічні властивості готового продукту, забезпечуючи відповідність промисловим стандартам.

Удосконалення стадії центрифугування

У запропонованій технологічній схемі виробництва карбонату калію для підвищення ефективності стадії очищення та підготовки продукту до сушіння було впроваджено використання центрифуги ФПД після кристалізації замість часткової обробки суспензії традиційним фільтром. Таке рішення дозволяє

значно знизити залишкову вологість кристалів, полегшити їх подальше сушіння та забезпечити більш стабільну сипкість готового продукту [12].

Застосування центрифуг ФПД у промислових процесах карбонату калію дозволяє ефективно відділяти кристалічний продукт від маточного розчину, знижуючи його вологість та підвищуючи якість кінцевого продукту. Центрифугування після кристалізації використовують для скорочення часу сушіння та покращення гранулометричного складу карбонату калію [12].

Технічні та технологічні переваги впровадженого удосконалення [12]:

1. Зменшення залишкової вологості кристалів, що дозволяє знизити енерговитрати на сушіння.
2. Підвищення сипкості та поліпшення фізико-хімічних характеристик кінцевого продукту.
3. Стабілізація технологічного процесу за рахунок більш ефективного відділення рідкої та твердої фаз.

Таким чином, впровадження центрифуги ФПД після кристалізації підвищує технологічну стабільність процесу та покращує якість готового карбонату калію.

Висновок до розділу 1

У розділі 1 було проведено аналіз літературних джерел щодо фізико-хімічних властивостей карбонату калію, його основних характеристик та сфер застосування. Встановлено, що карбонат калію є важливою неорганічною сполукою, яка широко використовується у склоробній, хімічній, харчовій промисловості, а також у сільському господарстві та процесах очищення технічних газів. Значна кількість напрямів застосування даного продукту зумовлює постійний попит на нього та необхідність удосконалення існуючих технологій виробництва.

На основі аналізу сучасних способів отримання карбонату калію визначено, що перспективним напрямом є безперервна технологічна схема, яка

базується на електролізі водного розчину хлориду калію з подальшою карбонізацією гідроксиду калію діоксидом вуглецю. Обрана технологія характеризується високим ступенем конверсії, можливістю отримання продукту високої чистоти та ефективною організацією виробничого процесу.

Таким чином, враховуючи широкий попит на карбонат калію та його значну промислову важливість, для подальших досліджень і розробки технологічної частини дипломного проєкту було обрано технологію отримання карбонату калію шляхом електролізу хлориду калію з подальшою карбонізацією гідроксиду калію діоксидом вуглецю.

РОЗДІЛ II ТЕХНОЛОГІЧНА ЧАСТИНА

2.1 Характеристика вихідної сировини

Хлорид калію (KCl) — неорганічна сіль, що представляє собою безбарвні або білі кристали без запаху, дуже добре розчинні у воді. Він має молекулярну масу 74,55 г/моль, густину близько 1,98 г/см³, температуру плавлення $\approx 770^\circ\text{C}$ та температуру кипіння $\approx 1420^\circ\text{C}$, що робить його стабільною і технологічно придатною сировиною для хімічних процесів за різних умов. У промисловості KCl застосовується як джерело калію в багатьох галузях, включно з виробництвом добрив (як MOP — muriate of potash), у харчовій та фармацевтичній промисловості та як вихідна сировина для отримання гідроксиду калію (KOH) методом мембранного електролізу. Для технологічних процесів, зокрема виробництва карбонату калію, використовують високочисті розчини KCl з мінімальним вмістом домішок, через негативний вплив сторонніх іонів на електроліз і якість продукту [13].

Гідроксид калію (KOH), також відомий як каустичний поташ, є білою або злегка жовтою гігроскопічною твердою речовиною. Він має молекулярну масу 56,11 г/моль, температуру плавлення 360°C та температуру кипіння 1327°C . KOH добре розчиняється у воді, етанолі та метанолі, утворюючи сильнолужні розчини. Його густина становить 2,12 г/см³. Ця сполука є сильно корозійною та гігроскопічною, активно поглинає вологу та CO₂ з повітря, що призводить до утворення карбонату калію [14].

Вуглекислий газ (CO₂) — безбарвний газ без запаху за нормальних умов. Його молекулярна маса становить 44,01 г/моль, густина — приблизно 1,98 кг/м³ при 0 °C та 1 атм. CO₂ не є горючим, але підтримує горіння деяких металів, таких як магній. При температурі $-78,5^\circ\text{C}$ CO₂ переходить у тверду

Відповідальна організація НУХТ, каф. ТЖХТ	Технічне узгодження Романова О.О	Вид документа Пояснювальна записка	Статус документа			
Власник документа НУХТ	Розробник документа Беляєва С.С.	Назва, додаткова назва РОЗДІЛ II ТЕХНОЛОГІЧНА ЧАСТИНА	ННІХТ.ЗХТ-5-3.026.161.026.КР.ПЗ			
	Документ затверджено Носенко Т.Т.		Інд. змін.	Дата видання 05.11.2025	Мова ua	Аркуш 26/90

+фазу, відому як сухий лід, який сублімується без утворення рідини [15]

Для виробництва харчового карбонату калію (E501) використовуються високочисті сировини. Гідроксид калію повинен мати вміст основної речовини не менше 90%, з мінімальним вмістом домішок, таких як хлориди та натрій. Вуглекислий газ, що використовується у харчовій промисловості, повинен відповідати стандартам чистоти, зокрема мати мінімальний вміст домішок, таких як монооксид вуглецю, сірководень та інші забруднювачі [16].

Гідроксид калію слід зберігати в герметичних контейнерах з матеріалів, стійких до корозії, у сухих, прохолодних і добре вентиляованих приміщеннях. Він є сильно корозійним і гігроскопічним, тому необхідно уникати контакту з вологою та кислотами. Транспортування здійснюється в спеціалізованих контейнерах, що відповідають вимогам безпеки для корозійних речовин.

Вуглекислий газ транспортується в зрідженому або стисненому стані в спеціальних балонах або танк-контейнерах. Необхідно забезпечити герметичність системи та уникати перевищення допустимого тиску. Зберігання здійснюється в прохолодних, добре вентиляованих приміщеннях, подалі від джерел тепла та відкритого вогню [17].

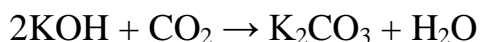
Карбонат калію є гігроскопічною речовиною, тому його слід зберігати в сухих, добре вентиляованих приміщеннях, захищених від вологи та прямих сонячних променів. Рекомендована температура зберігання — від 15 °C до 25 °C. Тара для зберігання повинна бути герметичною, виготовленою з матеріалів, стійких до лужних речовин, таких як поліетилен високої щільності.

Транспортування карбонату калію здійснюється в герметичних контейнерах, таких як мішки з поліетиленовим вкладишем, барабани або великі контейнери. Під час перевезення необхідно уникати контакту речовини з вологою та кислотами, а також забезпечити належну вентиляцію транспортних засобів [3,18].

Для виробництва 1000 кг карбонату калію (K_2CO_3) необхідно приблизно:
811 кг гідроксиду калію (KOH)

318 кг вуглекислого газу (CO₂)

Ці розрахунки базуються на стехіометричних співвідношеннях реакції:



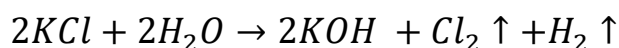
З урахуванням можливих втрат та ефективності процесу, фактичні витрати можуть бути дещо вищими [3].

2.2 Принципова технологічна схема виробництва

Виробництво карбонату калію у даному проєкті здійснюється за безперервною технологічною схемою, що базується на електролізі водного розчину хлориду калію з подальшою карбонізацією гідроксиду калію діоксидом вуглецю. Обрана схема є промислово перевіреною, характеризується високим ступенем конверсії (понад 95 %), можливістю глибокого очищення продукту та ефективною організацією матеріальних і теплових потоків. Процес проводиться при помірних температурах (30–110 °С), переважно при атмосферному або зниженому тиску, з використанням розчинів концентрацією 20–50 %, що забезпечує стабільність роботи обладнання та високу якість готового продукту. Застосовують корозійностійке обладнання з нержавіючої сталі з автоматичним контролем температури, рН і витрат [19,20].

1. Електроліз

Першою стадією виробництва карбонату калію є електроліз водного розчину хлориду калію (KCl) у мембранних електролізерах. Для цього застосовується очищений розчин KCl концентрацією 250–300 г/л. Процес проводять при температурі 80–90 °С, напрузі 3,2–4 В і густині струму 250–350 А/м². На катоді відбувається виділення водню, на аноді – хлору, а в катодному просторі накопичується розчин гідроксиду калію (KOH) концентрацією 30 %, який при необхідності концентрують у багатокорпусних випарниках до 40 % [19,20]. Реакція стадії:



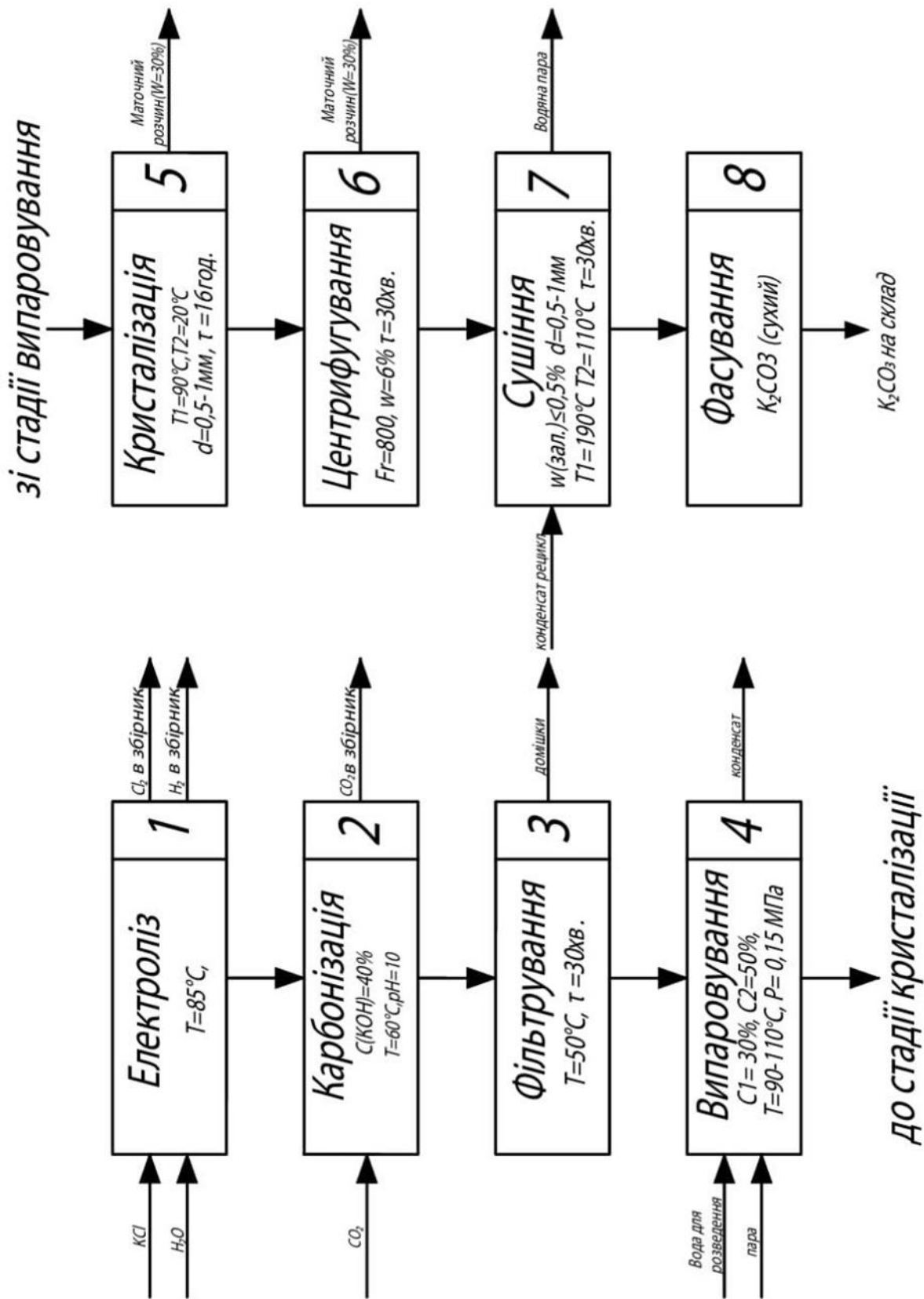
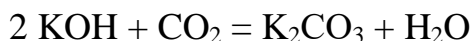


Рисунок. 2.1 – Принципова схема отримання карбонату кальцію

2. Карбонізація

Гідроксид калію подають у верхню частину вертикальної колони, тоді як очищений CO₂ вводять знизу, створюючи протитечію газової та рідкої фаз. Процес відбувається при температурі 40–60 °С та значеннях рН 9–11 за швидкості газу 0,5–1 м/с. Реакція утворення карбонату калію є екзотермічною:



Ступінь перетворення КОН за один прохід становить 92–97 %. Колона висотою 18–25 м і діаметром 2–4 м оснащується 20–30 тарілками або насадкою типу кілець Рашига для забезпечення інтенсивного масообміну [20].

У даному проєкті, з урахуванням продуктивності 5 т/добу, використовується колонний апарат зменшених габаритів, геометричні параметри якого обрані за принципами гідродинамічної та масообмінної подібності.

3. Фільтрування

Суспензію, що утворюється після карбонізації (концентрація K₂CO₃ 25–35 %), направляють на стадію механічного очищення. Використовують вакуум-фільтри або камерні фільтр-преси для відділення осаду при температурі близько 50 °С та тиску 0,05–0,1 МПа. Осад промивають водою до зниження вмісту хлорид-іонів до 0,05–0,1 % [20].

4. Випаровування

Очищений розчин карбонату калію концентрують у вакуум-випарних установках до масової частки K₂CO₃ близько 50 %. Випаровування здійснюють при температурі 90–110 °С і тиску 0,15 МПа. Процес ведуть у багатоефектних апаратах, що забезпечує економію енергії та стабільність концентрації [19].

5. Кристалізація

Концентрований розчин K₂CO₃ (50%) направляють на кристалізацію у вакуум-кристалізаторі циркуляційного типу (тип Lurgi). Основна кристалізація відбувається при температурі 40–45 °С і вакуумі 0,1–0,2 МПа за рахунок часткового випаровування води до пересичення розчину. Після завершення

кристалізації суспензію охолоджують у тому ж апараті до 20–25 °С для стабілізації кристалів перед центрифугуванням. Середній розмір кристалів складає $d=0,5-1$ мм, що забезпечує оптимальні умови для відділення маточного розчину та подальшого сушіння. [19].

6. Центрифугування

Після кристалізації частину маточного розчину відокремлюють від кристалів за допомогою відцентрифуг. Це дозволяє знизити залишкову вологість кристалів та підготувати їх до сушіння. Для цього застосовують центрифуги ФПД [20].

7. Сушіння

Вологий продукт піддають сушінню у барабанних сушарках при температурі 150–220 °С до залишкової вологості менше 0,5–1 %. Процес забезпечує стабільну сипкість та готовність кристалів до фасування [20].

8. Фасування

Сушений карбонат калію гранулюють до розміру 0,8–1,2 мм (за необхідності) і направляють на автоматизовані лінії пакування у мішки масою 25–50 кг. Готовий продукт характеризується чистотою $\geq 99\%$ та високими сипкими властивостями [20].

2.3 Матеріальний розрахунок

Продуктивність установки прийнята 5 т/добу, що відповідає малогабаритному промислово-дослідному виробництву та узгоджується з реальними потребами внутрішнього ринку України (≈ 3000 т/рік).

Матеріальний баланс складають за стадіями процесу:

1. Електроліз
2. Карбонізація
3. Фільтрування
4. Випаровування
5. Кристалізація

6. Центрифугування

7. Сушіння

8. Фасування

Вихідні дані:

1. Електроліз КСl: $\eta_1 = 0,98$

2. Карбонізація КОН: $\eta_2 = 0,95$

3. КСl (технічна чистота ~90%)

4. Втрати K_2CO_3 на фільтруванні: 1,5 %

5. Втрати K_2CO_3 на випаровуванні: 0,5 %

6. Втрати K_2CO_3 на кристалізації: 1 %

7. Втрати K_2CO_3 на центрифугуванні: 1 %

8. Вологість вологого продукту після центрифугування: 94 % сухої речовини

9. Товарна вологість сухого K_2CO_3 після сушіння: $\leq 0,5$ %

10. Розчин КОН після електролізу: 30 %

11. Концентрування розчину КОН до 40 % перед карбонізацією

12. Розчин K_2CO_3 після фільтрування: 41 %, розбавляється до 30 % перед випаровуванням

13. Концентрований розчин перед кристалізацією: 50 %

14. Концентрація маточного розчину після кристалізації: 30 %

15.w: маса випареної води,

1. Молярна маса:

$M(\text{KOH}) = 56,1$ г/моль;

$M(\text{CO}_2) = 44$ г/моль;

$M(\text{K}_2\text{CO}_3) = 138,2$ г/моль;

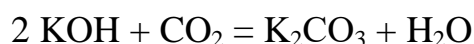
$M(\text{KCl}) = 74,6$ г/моль.

$M(\text{H}_2\text{O}) = 18$ г/моль.

$M(\text{H}_2) = 2$ г/моль.

$M(\text{Cl}_2) = 70,9$ г/моль.

Основна реакція процесу:

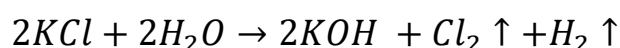


Прийняті конверсії:

- електроліз: $\eta_1 = 0,98$
- карбонізація: $\eta_2 = 0,95$

Стадія 1: Електроліз

1. Реакція стадії:



2. Скільки KOH потрібно на виході стадії 1:

- Розрахунок кількості K_2CO_3 у кмолях:

$$n_{\text{K}_2\text{CO}_3} = \frac{5000}{138,2} = 36,17 \text{ кмоль/добу}$$

- За реакцією карбонізації:

$$n_{\text{KOH}}^{\text{реак}} = 2 \cdot 36,17 = 72,34 \text{ кмоль}$$

- Маса чистого KOH, що фактично прореагує:

$$m_{\text{KOH}}^{\text{реак}} = 72,34 \cdot 56,1 = 4058 \text{ кг} = 4,06 \text{ т}$$

- З урахуванням конверсії карбонізації 95%:

$$m_{\text{KOH}}^{\text{вих}} = \frac{4,06}{0,95} = 4,27 \text{ т}$$

- Втрати KOH-0,5%

$$m_{\text{KOH}}^{\text{втр}} = 4,27 \cdot 0,005 = 0,021 \text{ т/добу}$$

- Маса KOH:

$$m_{\text{KOH}} = 4,27 - 0,021 = 4,25 \text{ т/добу}$$

3. Витрата KCl:

- Кількість KOH у кмолях:

$$n_{\text{KOH}} = \frac{4250}{56,1} = 75,8 \text{ кмоль}$$

- За реакцією електролізу:

$$n_{\text{KCl}} = n_{\text{KOH}}$$

- Теоретична маса KCl:

$$m_{KCl}^{теор} = 75,8 \cdot 74,6 = 5650 \text{ кг} = 5,65 \text{ т}$$

- З урахуванням конверсії 98%:

$$m_{KCl}^{чист} = \frac{5,65}{0,98} = 5,77 \text{ т}$$

- За чистоти KCl 90%:

$$m_{KCl}^{техн} = \frac{5,77}{0,90} = 6,41 \text{ т}$$

- Загальна маса 30%-го розчину:

$$m_{розч} = \frac{6,41}{0,30} = 21,36 \text{ т}$$

- Маса H₂O:

$$m_{H_2O} = 21,36 - 6,41 = 14,85 \text{ т}$$

- Кількість води, яка реагує:

$$m_{H_2O}^{реар} = 75,8 \cdot 18 = 1364 \text{ кг} = 1,36 \text{ т}$$

4. Утворення побічних продуктів:

$$n_{Cl_2} = \frac{75,8}{2} = 37,9 \text{ кмоль}$$

$$m_{Cl_2} = 37,9 \cdot 70,9 = 2687 \text{ кг} = 2,69 \text{ т}$$

$$m_{H_2} = 37,9 \cdot 2 = 75,8 \text{ кг} = 0,076 \text{ т}$$

5. Маса розчину KOH (30%):

$$m_{KOH} = \frac{4,25}{0,30} = 14,17 \text{ т}$$

Таблиця 2.1 – Матеріальний баланс стадії електролізу

№	Прихід	т/добу	№	Витрата	т/добу
1	KCl (90%)	6,41	1	KOH (30%)	14,17
2	H ₂ O	14,85		KOH	4,25
				H ₂ O	9,92

Продовження таблиці 2.1

№	Прихід	т/добу	№	Витрата	т/добу
			2	Cl ₂	2,69
			3	H ₂	0,076
			4	Випарена вода	4,31
			5	Втрати (0,5%)	0,021
	Разом	21,26		Разом	21,26

6. Концентрування розчину КОН з 30 % до 40 %:

Маса чистого КОН після електролізу: 42,7 т/добу.

Масова частка КОН після електролізу: $w_1 = 0,30$

Масова частка КОН після концентрування: $w_2 = 0,40$

- Маса розчину КОН після електролізу (30 %):

$$m_1 = \frac{4,25}{0,30} = 14,17 \text{ т}$$

Маса води в розчині:

$$m_{H_2O} = 14,17 - 4,25 = 9,92 \text{ т/добу}$$

- Втрати КОН-0,5%:

$$m_{KOH}^{втр} = 4,25 \cdot 0,005 = 0,021 \text{ т/добу}$$

- Маса КОН:

$$m_{KOH} = 4,25 - 0,021 = 4,23 \text{ т/добу}$$

- Маса розчину КОН після концентрування (40 %):

$$m_2 = \frac{4,23}{0,40} = 10,58 \text{ т/добу}$$

Маса води в концентрованому розчині:

$$m_{H_2O} = 10,58 - 4,23 = 6,35 \text{ т/добу}$$

- Кількість випареної води:

$$m_{H_2O}^{випар} = 9,92 - 6,35 = 3,57 \text{ т/добу}$$

Таблиця 2.2 – Матеріальний баланс міжстадійної операції концентрування розчину

№	Прихід	т/добу	№	Витрата	т/добу
1	Розчин КОН 30 %	14,17	1	Розчин КОН 40 %	10,58
			2	Випарена вода	3,57
			3	Втрати (0,5%)	0,021
	Разом	14,17		Разом	14,17

Стадія 2: Карбонізація

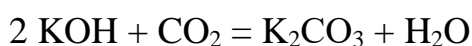
Вхід на стадію:

- розчин КОН, масова частка 40 %
- CO₂ (газ)

Вихід зі стадії:

- суспензія K₂CO₃, 40 %
- реакційна вода
- надлишковий CO₂ (рецикл)
- конверсія КОН: $\eta_2 = 0,95$

Основна реакція процесу:



1. Витрата КОН, що надходить на карбонізацію:

- Маса розчину КОН 40 %:

$$m_{\text{розч}} = 10,58 \text{ т/добу}$$

- Маса чистого КОН:

$$m_{\text{KOH}} = 4,23 \text{ т/добу}$$

2. Кількість КОН, що вступає в реакцію:

- З урахуванням конверсії 95 %:

$$m_{\text{KOH}}^{\text{реак}} = 4,23 \cdot 0,95 = 4,02 \text{ т/добу}$$

- Маса КОН, що не прореагувала:

$$m_{\text{КОН}}^{\text{надлишок}} = 4,23 - 4,02 = 0,21 \text{ т/добу}$$

- Втрати КОН-1%:

$$m_{\text{КОН}}^{\text{втр}} = 4,02 \cdot 0,01 = 0,04 \text{ т/добу}$$

- Маса КОН:

$$m_{\text{КОН}} = 4,02 - 0,04 = 3,98 \text{ т/добу}$$

- Кількість КОН у кмолях:

$$n_{\text{КОН}}^{\text{реак}} = \frac{3980 \cdot 1000}{56,1} = 70,9 \text{ кмоль/добу}$$

3. Розрахунок витрати CO_2 :

- За стехіометрією реакції: на 2 кмоль КОН витрачається 1 кмоль CO_2 :

$$n_{\text{CO}_2} = \frac{70,9}{2} = 35,45 \text{ кмоль/добу}$$

- Маса CO_2 :

$$m_{\text{CO}_2} = 35,45 \cdot 44 = 1559 \text{ кг} = 1,56 \text{ т/добу}$$

4. Утворення карбонату калію

- Кількість утвореного K_2CO_3 :

$$n_{\text{K}_2\text{CO}_3} = 35,45 \text{ кмоль/добу}$$

- Маса K_2CO_3 :

$$m_{\text{K}_2\text{CO}_3} = 35,45 \cdot 138,2 = 4899 \text{ кг} = 4,9 \text{ т/добу}$$

5. Утворення реакційної води:

- За рівнянням реакції:

$$n_{\text{H}_2\text{O}}^{\text{реакц}} = n_{\text{CO}_2} = 35,45 \text{ кмоль/добу}$$

- Маса води:

$$m_{\text{H}_2\text{O}}^{\text{реакц}} = 35,45 \cdot 18 = 638 \text{ кг} = 0,64 \text{ т/добу}$$

Маса води у суспензії:

$$m_{\text{H}_2\text{O}}^{\text{вих}} = 0,64 + 6,3 = 6,94 \text{ т/добу}$$

6. Маса суспензії:

$$m_{\text{суп}} = 4,9 + 6,94 + 0,21 = 12,05 \text{ т/добу}$$

Таблиця 2.3 – Матеріальний баланс стадії карбонізації

№	Прихід, т/добу		№	Витрата, т/добу	
1	Розчин КОН 40 %	10,58	1	Суспензія K_2CO_3	12,05
2	CO_2	1,56	2	Втрати (1%)	0,04
	Разом	12,14		Разом	12,14

Стадія 3: Фільтрування

Фільтрація суспензії після карбонізації здійснюється на фільтр-пресі тонкого очищення. Згідно з характеристиками промислових фільтр-пресів та застосовуваних фільтротканин, середній розмір відфільтрованих твердих частинок становить близько 5 мкм, що забезпечує необхідний ступінь очищення розчину карбонату калію.

Прийняті параметри:

- Вміст Cl^- після очищення: < 0,05 %
- Втрати K_2CO_3 : 1–2 %

1. Приймаємо втрати K_2CO_3 на фільтруванні 1,5 %:

$$m_{K_2CO_3}^{\text{вх}} = 4,9 \text{ т/добу}$$

$$m_{K_2CO_3}^{\text{втрати}} = 4,9 \cdot 0,015 = 0,074 \text{ т}$$

2. Маса очищеної суспензії:

- Маса K_2CO_3 після фільтрування:

$$m_{K_2CO_3}^{\text{очищ}} = 4,9 - 0,074 = 4,83 \text{ т}$$

- Маса очищеної суспензії:

$$m_{\text{продукту}} = 4,83 + 6,94 = 11,77 \text{ т/добу}$$

- Фільтрат (втрати):

$$m_{\text{фільтрату}} = 12,05 - 11,77 = 0,28 \text{ т/добу}$$

На стадії фільтрування здійснюється очищення суспензії карбонату калію від механічних домішок та іонів хлориду, які надходять у систему з попередніх стадій виробництва. В результаті фільтрування та промивання осаду вміст Cl^- у розчині карбонату калію знижується до значення менше 0,05 %, що відповідає вимогам до якості готового продукту. Іони хлориду виводяться з системи разом із фільтратом.

Таблиця 2.4 – Матеріальний баланс стадії фільтрування

№	Прихід	т/добу	№	Витрата	т/добу
1	Суспензія K_2CO_3	12,05	1	Очищений розчин K_2CO_3	11,77
			2	Фільтрат (втрати)	0,28
	Разом	12,05		Разом	12,05

3. Розбавлення очищеного розчину K_2CO_3 до 30 %:

Очищений після фільтрування розчин карбонату калію має підвищену концентрацію (41 %), що є неприйнятним для ефективної та стабільної роботи випарного апарата. Тому перед стадією випаровування здійснюється розбавлення розчину водою до концентрації 30 %.

- Фактична концентрація після фільтрування:

$$w_{\text{K}_2\text{CO}_3} = \frac{4,83}{11,77} = 0,41 = 41\%$$

- Маса розчину після розбавлення (30%):

$$m_{\text{розч}} = \frac{4,83}{0,30} = 16,1 \text{ т/добу}$$

- Кількість доданої води:

$$m_{\text{H}_2\text{O}}^{\text{дод}} = 16,1 - 11,77 = 4,33 \text{ т/добу}$$

- Перевірка водного балансу:

$$m_{\text{H}_2\text{O}}^{\text{вих}} = 16,1 - 4,83 = 11,27 \text{ т/добу}$$

$$11,27 - 6,94 = 4,33 \text{ т}$$

Таблиця 2.5 – Матеріальний баланс міжстадійної операції розбавлення очищеного розчину

№	Прихід	т/добу	№	Витрата	т/добу
1	Очищений розчин K ₂ CO ₃	11,77	1	Розчин K ₂ CO ₃ 30 %	16,1
2	Вода (додаткова)	4,33			
	Разом	16,1		Разом	16,1

Стадія 4: Випаровування

Початковий вміст сухих речовин у розчині:

$$w_1 = 30 \%$$

Кінцевий вміст сухих речовин після випаровування:

$$w_2 = 50 \%$$

1. Приймаємо втрати 0,5 % K₂CO₃ на стадії випаровування:

$$m_{K_2CO_3}^{втрат} = 4,83 \cdot 0,005 = 0,024 \text{ т/добу}$$

2. Маса K₂CO₃ після випаровування:

$$m_{K_2CO_3}^{вих} = 4,83 - 0,024 = 4,81 \text{ т/добу}$$

3. Перерахунок концентрації 50 %:

$$m_{розч} = \frac{4,81}{0,50} = 9,62 \text{ т/добу}$$

- Вода у концентрованому розчині:

$$m_{H_2O}^{вих} = 9,62 - 4,81 = 4,81 \text{ т/добу}$$

4. Випарена вода:

- Вхідна вода:

$$m_{H_2O}^{вх} = 11,27 \text{ т/добу}$$

$$m_{H_2O}^{випар} = 11,27 - 4,81 = 6,46 \text{ т/добу}$$

5. Продуктивність випарної установки по випареній волозі:

$$G_2 = \frac{6480 \cdot 0,30}{0,50} = 3888 \text{ кг/год}$$

$$W = 6480 - 3888 = 2592 \text{ кг/год}$$

Таблиця 2.6 – Матеріальний баланс стадії випаровування

№	Прихід	т/добу	№	Витрата	т/добу
1	Розчин K_2CO_3 (30 %)	16,1	1	Концентрований розчин K_2CO_3 (50 %)	9,62
			2	Випарена вода (рецикл)	6,46
			3	Втрати K_2CO_3	0,024
	Разом	16,1		Разом	16,1

Стадія 5: Кристалізація

Прийняті параметри кристалізації:

- Охолодження: $65 \rightarrow 25 \text{ }^\circ\text{C}$
- Ступінь кристалізації: $\alpha=70\%$
- Втрати K_2CO_3 на стадії: 1 %

1. Розрахунок втрат K_2CO_3 :

$$m_{K_2CO_3}^{\text{втрати}} = 4,81 \cdot 0,01 = 0,048 \text{ т/добу}$$

2. K_2CO_3 , що бере участь у кристалізації:

$$m_{K_2CO_3} = 4,81 - 0,048 = 4,76 \text{ т/добу}$$

3. Кількість K_2CO_3 , що кристалізується:

$$m_{K_2CO_3}^{\text{кр}} = 4,76 \cdot 0,70 = 3,33 \text{ т/добу}$$

4. K_2CO_3 , що залишається в маточному розчині:

$$m_{K_2CO_3}^{\text{мат}} = 4,76 - 3,33 = 1,43 \text{ т/добу}$$

5. Концентрація маточного розчину ($\approx 30\%$ — перевірка):

$$m_{\text{мат.розч}} = \frac{1,43}{0,30} = 4,76 \text{ т/добу}$$

6. Маса води в маточному розчині:

$$m_{H_2O}^{\text{мат}} = 4,76 - 1,43 = 3,33 \text{ т/добу}$$

7. Вода, що переходить у кристалічну суспензію:

$$m_{H_2O}^{сусп} = 4,81 - 3,33 = 1,48 \text{ т/добу}$$

8. Маса кристалічної суспензії:

$$m_{сусп} = 3,33 + 1,48 = 4,81 \text{ т/добу}$$

Таблиця 2.7 – Матеріальний баланс стадії кристалізації

№	Прихід	т/добу	№	Витрата	т/добу
1	Розчин K_2CO_3 50 %	9,62	1	Кристалічна суспензія K_2CO_3	4,81
			2	Маточний розчин (30 %)	4,76
			3	Втрати K_2CO_3	0,048
	Разом	9,62		Разом	9,62

Стадія 6: Центрифугування

Прийняті параметри центрифугування

- Вміст сухої речовини у вологому продукті: 94 % (у допустимому інтервалі 92–95 %)
- Втрати K_2CO_3 : 1 %
- Маточний розчин — рецикл на стадію кристалізації

1. Втрати K_2CO_3 на стадії:

$$m_{K_2CO_3}^{втрати} = 3,33 \cdot 0,01 = 0,033 \text{ т/добу}$$

2. K_2CO_3 після центрифугування:

$$m_{K_2CO_3} = 3,33 - 0,033 = 3,3 \text{ т/добу}$$

3. Маса вологого K_2CO_3 (94 % сухої речовини):

$$m_{\text{вологого}} = \frac{3,3}{0,94} = 3,5 \text{ т/добу}$$

4. Вміст води у вологому продукті:

$$m_{H_2O}^{прод} = 3,5 - 3,3 = 0,2 \text{ т/добу}$$

5. Маса маточного розчину після центрифугування:

- Загальна вода на вході: 1,48 т/добу
- Вода у вологому продукті: 0,2 т/добу

- Втрати K_2CO_3 : 0,033 т/добу

Отже, у маточний розчин переходить:

$$m_{H_2O}^{mat} = 1,48 - 0,2 = 1,28 \text{ т/добу}$$

Загальна маса маточного розчину:

$$m_{mat.розч} = 1,28 + 0,033 = 1,313 \text{ т/добу}$$

Таблиця 2.8 – Матеріальний баланс стадії центрифугування

№	Прихід	т/добу	№	Витрата	т/добу
1	Кристалічна суспензія K_2CO_3	4,81	1	Вологий K_2CO_3 (94 %)	3,5
			2	Маточний розчин (рецикл)	1,313
				Втрати K_2CO_3	0,33
Разом		4,81	Разом		4,81

Підготовка до сушіння (змішування з циркуляційним розчином):

Для забезпечення стабільної роботи сушарки та необхідної продуктивності по сухому K_2CO_3 перед сушінням вологі кристали після центрифугування змішують з частиною циркуляційного (концентрованого) розчину K_2CO_3 концентрацією 50%.

Циркуляційний розчин утворюється в системі як внутрішній рецикл і повертається в процес для підтримання матеріального балансу та сталого режиму сушіння. На виході сушіння плануємо 5 т сухого K_2CO_3 . Для цього потрібно:

1. Маса сухого K_2CO_3 у вологому продукті після центрифугування: 3,3 т сухої речовини
2. Додаємо додаткову кількість циркуляційного концентрованого розчину K_2CO_3 (50 % сухої речовини) для забезпечення заданої подачі на сушіння (5 т/добу у перерахунку на суху речовину):

$$m_{\text{додатковий розчин}} = \frac{5-3,3}{0,5} = 3,4 \text{ т/добу}$$

3. Вхід на сушіння:

$$m_{\text{входу}} = 3,5 + 3,4 = 6,9 \text{ т/добу}$$

Стадія 7: Сушіння

1. Знаходимо масу розчину після сушіння, де K_2CO_3 становить 99%:

$$m_{\text{після сушіння}} = \frac{5}{0,99} = 5,05 \text{ т}$$

2. Знаходимо кількість води, що була в розчині до сушіння:

$$m_{\text{води до}} = 6,9 - 5,05 = 1,85 \text{ т}$$

3. Знаходимо кількість води, що залишилася після сушіння:

$$m_{\text{води після}} = 5,05 - 5 = 0,05 \text{ т}$$

4. Кількість водяної пари, що відводиться із сушарки:

$$m_{\text{вод.пари}} = 1,85 - 0,05 = 1,8 \text{ т}$$

1. Втрати – 1%:

$$m_{\text{втрат}} = 5 \cdot 0,01 = 0,05 \text{ т}$$

2. Знаходимо масу товарного продукту:

$$m_{\text{товарного}} = 5,05 - 0,05 = 5 \text{ т}$$

Таблиця 2.9 – Матеріальний баланс стадії сушіння

№	Прихід, т/добу	т/добу	№	Витрата, т/добу	т/добу
1	Вологий K_2CO_3	6,9	1	Сухий K_2CO_3 (товарний продукт)	5
			2	Водяна пара	1,8
			3	Втрати (1 %)	0,05
	Разом	6,9		Разом	6,9

Таблиця 2.10 – Загальний матеріальний баланс виробництва карбонату калію

№	Стадія	Прихід	Маса, т/добу	Витрата	Маса, т/добу
1	Електроліз	KCl (30 %)	6,41	Розчин КОН (30 %)	14,17
		H ₂ O	14,85	Cl ₂	2,69
				H ₂	0,076
				Випарена вода	4,31
				Втрати (0,5 %)	0,021
		Разом	21,26	Разом	21,26
2	Концентрування КОН (міжстадійна операція)	Розчин КОН 30 %	14,17	Розчин КОН 40 %	10,58
				Випарена вода	3,57
				Втрати (0,5 %)	0,021
		Разом	14,17	Разом	14,17
3	Карбонізація	Розчин КОН 40 %	10,58	Суспензія K ₂ CO ₃	12,05
		CO ₂	1,56	Втрати (1 %)	0,04
		Разом	12,1	Разом	12,1
4	Фільтрування	Суспензія K ₂ CO ₃	12,05	Очищений розчин K ₂ CO ₃	11,77
				Фільтрат (втрати)	0,28

Продовження таблиці 2.10

№	Стадія	Прихід	Маса, т/добу	Витрата	Маса, т/добу
				Фільтрат (втрати)	0,28
		Разом	12,05	Разом	12,05
5	Випаровування	Розчин K_2CO_3 (30 %)	16,1	Концентрований розчин K_2CO_3 (50 %)	9,62
				Випарена вода	6,46
				Втрати K_2CO_3	0,024
		Разом	16,1	Разом	16,1
6	Кристалізація	Розчин K_2CO_3 50 %	9,62	Кристалічна суспензія K_2CO_3	4,81
				Маточний розчин (30 %)	4,76
				Втрати K_2CO_3	0,048
		Разом	9,62	Разом	9,62
7	Центрифугування	Кристалічна суспензія K_2CO_3	4,81	Вологий K_2CO_3 (94 %)	3,5
				Маточний розчин (рецикл)	1,313
		Разом	4,81	Разом	4,81
8	Сушіння	Вологий K_2CO_3	6,9	Сухий K_2CO_3 (товарний продукт)	5
				Водяна пара	1,8

Продовження таблиці 2.10

№	Стадія	Прихід	Маса, т/добу	Витрата	Маса, т/добу
				Втрати (1 %)	0,05
		Разом	6,9	Разом	6,9

Тепловий баланс процесу випарювання

Для розрахунку теплового балансу випарювання використовуються такі вхідні параметри:

- $G_{\text{поч}} = 16,1 \text{ т/добу} = 16\,100 \text{ кг/добу}$ — маса розчину, що надходить у випарний апарат;
- $W = 6,48 \text{ т/добу} = 6480 \text{ кг/добу}$ — маса випареної води;
- $t_{\text{поч}} = 90^\circ\text{C}$ — температура розчину на вході в апарат;
- $t_{\text{кін}} = 110^\circ\text{C}$ — температура кипіння розчину в апараті;
- $C_{\text{поч}} = 3,2 \text{ кДж/(кг}\times\text{}^\circ\text{C)}$ — питома теплоємність розчину (для 30% розчину K_2CO_3);
- $r = 2230 \text{ кДж/кг}$ — питома теплота пароутворення води при тиску 0,15 МПа;
- Втрати теплоти у навколишнє середовище становлять 5% від суми $Q_{\text{нагр}} + Q_{\text{випар}}$

Рівняння теплового балансу загальної кількості теплоти Q (в кДж), яка витрачається на випарювання розчину, виражають як:

$$Q = Q_{\text{нагр}} + Q_{\text{випар}} + Q_{\text{втр}}$$

де Q — витрата теплоти на випарювання;

$Q_{\text{нагр}}$ — теплота, що витрачається на нагрівання розчину;

$Q_{\text{випар}}$ — теплота, що витрачається на випарювання води;

$Q_{\text{втр}}$ – теплота, яка втрачається в навколишнє середовище (приймають переважно 3-5%).

1. Теплота, що витрачається на нагрівання розчину:

$$Q_{\text{нагр}} = G_{\text{поч}} \times C_{\text{поч}} \times (t_{\text{кін}} - t_{\text{поч}})$$

де $Q_{\text{нагр}}$ – теплота, що витрачається на нагрівання розчину;

$G_{\text{поч}}$ – кількість початкового розчину, кг/сек;

$C_{\text{поч}}$ – теплоємність початкового розчину;

$t_{\text{кін}}$ – температура розчину в випарному апараті, °С;

$t_{\text{поч}}$ – початкова температура розчину, що поступає в апарат, °С.

$$Q_{\text{нагр}} = 16100 \cdot 3,2 \cdot 20 = 1\,030\,400 \text{ кДж}$$

2. Теплота, що витрачається на випарювання води:

$$Q_{\text{випар}} = W \cdot r = 6480 \cdot 2230 = 14\,450\,400 \text{ кДж/добу}$$

3. Втрати теплоти у навколишнє середовище (5% від суми):

$$Q_{\text{втр}} = 0,05 \times (Q_{\text{нагр}} + Q_{\text{випар}})$$

$$Q_{\text{втр}} = 0,05 \cdot (1030400 + 14450400) = 774\,040 \text{ кДж/добу}$$

Загальні витрати теплоти:

$$Q = Q_{\text{нагр}} + Q_{\text{випар}} + Q_{\text{втр}}$$

$$Q = 1030400 + 14450400 + 774040 = 16\,254\,840 \text{ кДж/добу}$$

4. Витрати сухої гріючої пари

Теплота конденсації гріючої пари:

$$r_{\text{пари}} = 2230 \text{ кДж/кг}$$

$$G_{\text{пари}} = \frac{Q}{r_{\text{пари}}}$$

$$G_{\text{пари}} = \frac{16254840}{2230} = 7289 \text{ кг/добу} \approx 7,29 \text{ т/добу}$$

Питома витрата пари:

$$D = \frac{7,29}{6,48} = 1,13 \text{ кг пари / кг води}$$


2.4 Розрахунок та підбір основного обладнання

Підбір основного технологічного обладнання виконано на основі матеріальних балансів та добової продуктивності виробництва карбонату калію 5 т/добу. Обладнання забезпечує безперервну роботу технологічної лінії, враховує фізико-хімічні властивості середовищ та впроваджені удосконалення стадій карбонізації та центрифугування.

Таблиця 2.11 – Підбір основного обладнання

1	2	3
Мембранний електролізер	Тип апарата: мембранний електролізер Режим роботи: безперервний Продуктивність: 600 кг/год Робочий тиск: атмосферний Робоча напруга на комірку: 3,6 В Густина струму: 300 А/м ² Матеріал корпусу: нержавіюча сталь Тип мембрани: катіонообмінна Режим руху фаз: протитечійний Кількість електролітичних комірок: 60 Активна площа однієї мембрани: 2,5 м ² Загальна активна площа: 150 м ² Розміри, мм: 2800 × 1600 × 1200 мм	


Продовження таблиці 2.11

1	2	3
<p>Карбонізаційна колона</p>	<p>Призначення: Газо-рідинний масообмін CO₂ з лужним розчином</p> <p>Режим роботи: Безперервний, протитечійний</p> <p>Продуктивність: 500 кг/год суспензії K₂CO₃</p> <p>Робочий тиск: Атмосферний</p> <p>Робоча температура: 40–60 °С</p> <p>Кількість тарілок: 10</p> <p>Тип тарілок: Перфоровані багатопереливні</p> <p>Діаметр колони: 600 мм</p> <p>Висота робочої частини: 4000 мм</p> <p>Загальна висота апарата: 5500 мм</p> <p>Відстань між тарілками: 350–400 мм</p> <p>Товщина корпусу: 6 мм</p> <p>Матеріал корпусу: Корозійностійка сталь</p> <p>Матеріал внутрішніх елементів: Нержавіюча сталь</p> <p>Теплообмін: Вбудований холодильник</p> <p>Орієнтовна маса апарата: 1,8–2,2 т</p> <p>Потужність: До 3 кВт</p>	


Продовження таблиці 2.11

1	2	3
Камерний фільтр-прес	<p>Температура фільтрування: до 60 °С</p> <p>Робочий тиск фільтрації: 0,6–1,0 Мпа</p> <p>Кількість фільтрувальних камер: 25–30</p> <p>Продуктивність: 700 кг/год суспензії</p> <p>Площа фільтрування: 35–45 м²</p> <p>Тип фільтрувальних плит: камерні, поліпропіленові</p> <p>Товщина фільтрувального осаду: 25–30 мм</p> <p>Матеріал рами та елементів, що контактують із середовищем: нержавіюча сталь AISI 304 / 316</p> <p>Режим роботи: періодичний</p> <p>Спосіб розвантаження осаду: механічний</p> <p>Потужність гідравлічної станції: 3–5 кВт</p> <p>Габаритні розміри, мм: 3200 × 1200 × 1400 (В × Д × Ш)</p> <p>Маса апарата: 2-2,5 т</p>	


Продовження таблиці 2.11

1	2	3
<p>Вакуум-випарна установка, 3-корпусна типу Вігант</p>	<p>Тип апарата: вакуум-випарна установка багатоефектна, трикорпусна</p> <p>Продуктивність: 3000 кг/год випареної вологи</p> <p>Температура розчину: 90–110 °С</p> <p>Робочий тиск у корпусах: 0,12–0,15 МПа</p> <p>Кількість корпусів: 3</p> <p>Тип випарників: вертикальні з пучком теплообмінних труб</p> <p>Площа теплообміну одного корпусу: 35–45 м²</p> <p>Загальна площа теплообміну: 110–130 м²</p> <p>Матеріал корпусів та труб: нержавіюча сталь AISI 316L</p> <p>Режим роботи: безперервний</p> <p>Спосіб циркуляції розчину: природна</p> <p>Потужність вакуумної системи: 5–7 кВт</p> <p>Загальна встановлена потужність: 10–15 кВт</p> <p>Габаритні розміри установки, мм: 6500 × 2200 × 4800</p> <p>Маса установки: 8–10 т</p>	


Продовження таблиці 2.11

1	2	3
<p>Вакуум-кристалізатор типу Lurgi</p>	<p>Тип апарата: вакуум-кристалізатор періодичний з внутрішньою рециркуляцією маточного розчину, циркуляційний</p> <p>Продуктивність: 5000 кг кристалічної суспензії за цикл</p> <p>Тривалість одного циклу кристалізації: 16 год</p> <p>Температура початку кристалізації: 65 °С</p> <p>Температура кінця кристалізації: 25 °С</p> <p>Робочий тиск: 0,08–0,12 МПа (вакуум)</p> <p>Швидкість росту кристалів: 1–2 мм/хв</p> <p>Об’єм кристалізатора: 2–3 м³ (для продуктивності 5 т/добу)</p> <p>Режим роботи: безперервний з рециркуляцією</p> <p>Матеріал корпусу та теплообмінних елементів: нержавіюча сталь AISI 316L</p> <p>Тип циркуляції: примусова, насосна, з рециркуляцією маточного розчину</p>	

Продовження таблиці 2.11

1	2	3
	<p>Потужність циркуляційного насоса: 2–3 кВт</p> <p>Потужність вакуумної системи: 5–7 кВт</p> <p>Габаритні розміри, мм: 4500 × 1800 × 2500</p> <p>Маса апарата: 3–4 т</p>	
<p>Центрифуга ФПД типу ФПН</p>	<p>Тип апарата: фільтрувальна центрифуга періодичної дії (ФПД)</p> <p>Призначення: відокремлення кристалів карбонату калію від маточного розчину після вакуум-кристалізації</p> <p>Режим роботи: періодичний</p> <p>Цикл фільтрування: 30 хв</p> <p>Продуктивність: 700 кг/год кристалічної суспензії K_2CO_3</p> <p>Спосіб розділення: фільтрування під дією відцентрових сил</p> <p>Продуктивність за сухим продуктом: ~600–800 кг/год</p> <p>Початкова масова частка твердої фази: 70 %</p> <p>Кінцева масова частка твердої фази: 94 %</p> <p>Залишкова вологість продукту: 5–6%</p>	

Продовження таблиці 2.11

1	2	3
	<p>Частота обертання ротора: 900–1200 об/хв</p> <p>Фактор розділення: 600–1000</p> <p>Діаметр барабана: 800–1000 мм</p> <p>Матеріал основних вузлів: нержавіюча сталь</p> <p>Робоча температура суспензії: до 60 °С</p> <p>Робочий тиск: атмосферний</p> <p>Потужність електродвигуна: 7,5–11 кВт</p> <p>Габаритні розміри, мм: 1200× 1600 × 1300</p> <p>Маса апарата: 1200–1800 кг</p>	
<p>Барабанна сушарка типу СБ-С</p>	<p>Тип апарата: барабанна сушарка, безперервна</p> <p>Продуктивність по сухому продукту: 700 кг/год</p> <p>Початкова вологість продукту: 29 %</p> <p>Кінцева вологість продукту: 1 %</p> <p>Температура сушильного агента (повітря):</p> <ul style="list-style-type: none"> - на вході: 190 °С - на виході: 100 °С <p>Температура продукту на виході: 75 °С</p>	

Продовження таблиці 2.11

1	2	3
	<p>Кількість випареної вологи: 250 кг/год</p> <p>Діаметр барабана: 1200 мм</p> <p>Довжина барабана: 5500 мм</p> <p>Кут нахилу барабана до горизонту: 3°</p> <p>Частота обертання барабана: 2,35 об/хв</p> <p>Час перебування матеріалу в барабані: 30 хв</p> <p>Швидкість руху сушильного агента: 1,5 м/с</p> <p>Потужність електродвигуна приводу барабана: 3,7 кВт</p> <p>Матеріал корпусу та барабана: нержавіюча сталь AISI 304/316</p> <p>Режим роботи: безперервний, прямоток</p> <p>Габаритні розміри сушарки: 2550 × 7849 × 2550 мм</p> <p>Маса апарата: 3–4 т</p>	

Мембранний електролізер

Мембранний електролізер призначений для електролітичного розкладання водного розчину хлориду калію з утворенням гідроксиду калію, який у подальшому використовується для синтезу карбонату калію [19,20].

Карбонізаційна колона

Карбонізаційна колона є газо-рідиним контактним апаратом, призначеним для інтенсивного масообміну між фазами у процесі утворення карбонату калію в результаті взаємодії діоксиду вуглецю (CO_2) з розчином гідроксиду калію. Такий апарат забезпечує протитечійний контакт рідкої фази, що подається зверху, і газової фази, яка вводиться знизу, що сприяє максимальному поглинанню CO_2 і високому ступеню перетворення KOH у K_2CO_3 [11].



Рисунок 2.1 – Зображення карбонізаційної колони

Конструктивно апарат складається з вертикального циліндричного корпусу та внутрішніх елементів, що створюють послідовні рівні контакту фаз. У верхній частині колонного корпусу рідина рівномірно розподіляється по поперечному перерізу, а нижня частина містить багатопереливні тарілки або інші контактні пристрої, що забезпечують інтенсивний масообмін між CO_2 і рідкою фазою. Через отвори в тарілках газ проходить у вигляді бульбашок чи потоків через шар рідини, що сприяє поглинанню і хімічній взаємодії [11].

Габаритні та конструктивні параметри карбонізаційної колони прийняті за аналогами промислових тарілчастих масообмінних апаратів, що працюють при атмосферному тиску, з урахуванням продуктивності технологічної схеми [11].

Камерний фільтр-прес

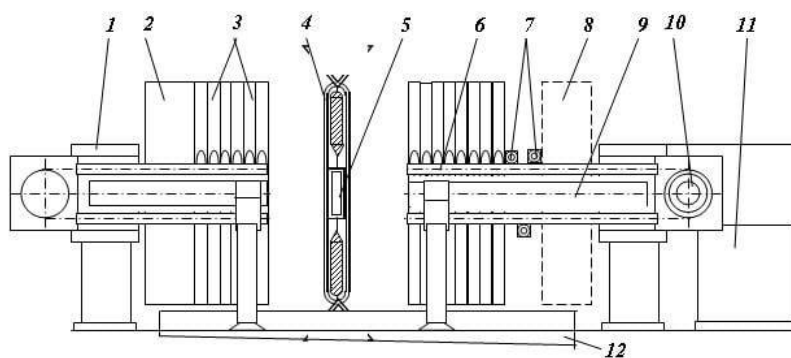


Рисунок 2.2 – Схема камерного фільтр-пресу

1 - шарнірна головка; 2 - упорна плита; 3 - фільтрувальні плити; 4 - фільтрувальна тканина; 5 - гумове кільце; 6 - ланцюг механізму переміщення плит; 7 - напрямні ролики; 8 - притискна плита; 9 - опорна балка; 10 - привід ланцюгової передачі; 11 - гідропривод; 12 - жолоб для відводу фільтрату.

Структура: Використовує інтегровану фільтрувальну пластину (без окремої рамки фільтра). Увігнуті порожнини з обох боків фільтрувальної пластини утворюють фільтрувальну камеру, а край фільтрувальної пластини оснащений отвором для подачі та виходом для рідини [23].

Принцип роботи [23]:

- Формування герметичних фільтрувальних камер:

Пресувальний пристрій стискає кілька інтегрованих фільтрувальних пластин разом, так що двосторонні увігнуті порожнини сусідніх фільтрувальних пластин утворюють низку герметичних фільтрувальних камер. Поверхня фільтрувальної пластини покрита фільтрувальною тканиною, а отвір для подачі та вихід рідини на краю з'єднані.

- Введення суспензії:

Суспензія потрапляє в кожен фільтрувальну камеру через отвір для подачі на краю фільтрувальної пластини та під тиском заповнює простір фільтрувальної камери.

- Розділення твердих і рідких речовин:

Рідкий компонент проходить через фільтрувальну тканину та виводиться з виходу рідини через напрямні канавки для рідини на поверхні фільтрувальної пластини; тверді частинки затримуються фільтрувальною тканиною та поступово утворюють фільтрувальні осади у фільтрувальній камері.

- Відпадання фільтраційного осаду:

Після фільтрування прес-пристрій відпускається для розділення фільтрувальних пластин, і фільтрувальний осад падає з увігнутої порожнини фільтрувальної пластини під дією власної сили тяжіння або механічної вібрації.

Вакуум-випарна установка

У випарнику з прямою подачею триетапного типу сировина потрапляє в перший каскад випарної системи. Концентрована рідина з першого каскаду потім передається в другий каскад, і процес продовжується послідовно до останнього каскаду. Сироватка тече в тому ж напрямку, що й нагрівальне середовище (зазвичай пара) в кожному каскаді [24].

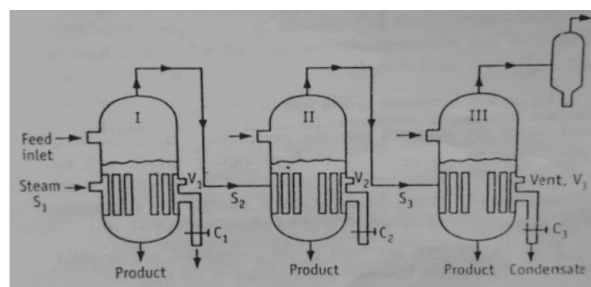


Рисунок 2.3 – Схема трьохкорпусної вакуум-випарної установки прямооточного типу.

Принцип роботи включає три стадії: перший ефект, другий ефект і третій ефект.

У першому етапі сира сировина, яку часто називають «слабким лугом», потрапляє у випарник і нагрівається. Це нагрівання призводить до випаровування частини сировини, утворюючи пару, яка проходить через сепаратор. Решта рідини, тепер концентрована, переходить до другого етапу [24].

У другому етапі концентрована рідина з попереднього етапу діє як сировина. Аналогічно, подається тепло, що призводить до подальшого випаровування та утворення більшої кількості пари. Потім пара переміщується до сепаратора, а концентрована рідина переходить до третього етапу [24].

Третій ефект функціонує аналогічно другому. Він використовує концентровану рідину з попереднього етапу, додатково концентруючи її за допомогою теплопередачі. Зрештою, концентрована рідина випускається, а утворена пара конденсується, утворюючи дистилат [24].

Вакуум-кристалізатор типу Lurgi

Вакуум-кристалізатор циркуляційного типу (типу Lurgi) забезпечує контрольоване утворення та ріст кристалів за рахунок створення пересичення розчину [25].

Принцип роботи апарата полягає у тому, що за рахунок вакууму знижується температура кипіння розчину, внаслідок чого відбувається часткове випаровування води. Це призводить до підвищення концентрації солі та формування пересиченого розчину, що є рушійною силою кристалізації [25].

Апарат працює за схемою примусової циркуляції суспензії, що забезпечується насосом. Розчин багаторазово прокачується через циркуляційний контур, завдяки чому досягається інтенсивне перемішування, рівномірний розподіл температури та концентрації, а також стабільний ріст кристалів без їх злипання [25].



Рисунок 2.4 – Вакуум-кристалізатор

Вакуум-кристалізатор типу Lurgi являє собою вертикальний апарат циркуляційного типу, який складається з кристалізаційної камери, циркуляційного контуру з насосом, теплообмінника (підігрівача), сепаратора вторинної пари та вакуумної системи. Конструкція апарата забезпечує безперервну або напівбезперервну роботу та можливість підтримання стабільних технологічних параметрів процесу [25].

Однією з основних переваг даного типу кристалізаторів є інтенсивна примусова циркуляція суспензії, що запобігає осадженню кристалів на теплообмінних поверхнях та зменшує ризик інкрустації (накипоутворення). Завдяки цьому підвищується надійність роботи обладнання, зменшуються витрати на очищення апарата та збільшується тривалість безперервного циклу експлуатації [25].

Апарат забезпечує високий коефіцієнт теплопередачі та рівномірний температурний режим у всьому об'ємі, що сприяє формуванню кристалів однорідного гранулометричного складу. Наявність сепараційної зони дозволяє ефективно відокремлювати вторинну пару від суспензії, що запобігає виносу крапель розчину разом із паром та знижує втрати цільового продукту [25].

Центрифуга ФПД типу ФПН

Для відділення кристалів від маточного розчину після стадії кристалізації застосовується фільтрувальна підвісна центрифуга періодичної дії типу ФПД. Даний тип обладнання забезпечує ефективне зневоднення кристалічної суспензії перед подальшим сушінням [26].

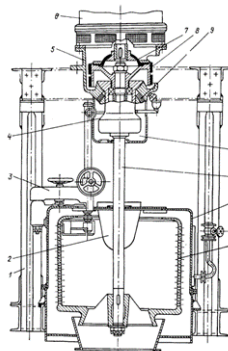


Рисунок 2.5 – Центрифуга ФПД: 1 - металоконструкція; 2 - лоток;

3 - механізм зрізування осаду; 4 - корпус підшипників; 5 - корпус приводу; 6 - електродвигун; 7 - муфта; 8 - гальмо; 9 - амортизатор; 10 - привід; 11 - вал; 12 - кожух з кришкою; 13 – ротор

Центрифуга ФПД за конструкцією подібна до центрифуг типу ФПН і складається з ротора, приводу, вала, кожуха з кришкою, електродвигуна, гальмівного пристрою та металоконструкції. Електродвигун з'єднаний з валом через еластичну муфту, що знижує вібраційні навантаження та забезпечує стабільну роботу обладнання [26].

Ротор центрифуги виконаний у вигляді циліндра з перфорованою обичайкою та оснащений фільтрувальним ситом. Під дією відцентрової сили рідка фаза проходить крізь перфорацію та відводиться через штуцер у нижній частині кожуха, а тверда фаза затримується на внутрішній поверхні ротора у вигляді осаду [26].

Завантаження суспензії здійснюють при знижених обертах ротора, після чого швидкість обертання підвищують до робочої для інтенсивного зневоднення осаду. Управління роботою центрифуги здійснюється у напівавтоматичному режимі зі станції керування [26].

Особливістю центрифуг типу ФПД є наявність запірною конуса, який перекидає вивантажувальний отвір ротора та забезпечує рівномірний розподіл суспензії по його стінці. Це підвищує якість фільтрування та запобігає потраплянню невідфільтрованого продукту у приймальну частину апарата [26].

Барабанна сушарка типу СБ-С

Барабанна сушарка є звареним циліндром (барабаном), на зовнішній поверхні якого укріплені бандажні опори, кільця жорсткості і приводний зубчастий вінець; вісь барабана може бути нахилена до горизонту на кут до 4° [27].

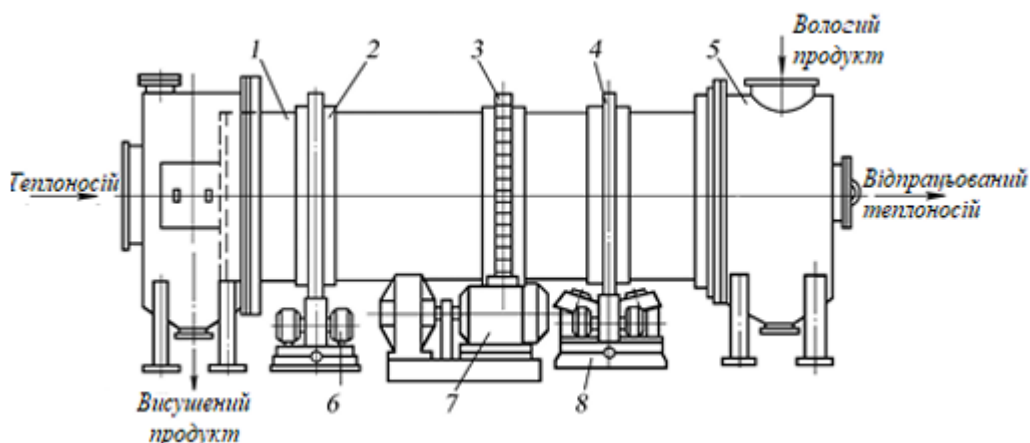


Рисунок 2.6 – Барабанна сушарка

1 – барабан; 2, 4 – бандажі; 3 – вінцева шестерня; 5 – завантажувальний бункер; 6 – опорна станція; 7 – привід; 8 – опорна фіксуюча станція

Барабанна сушарка типу СБ-С призначена для безперервного сушіння сипких матеріалів. Принцип роботи полягає в тому, що вологий продукт подається у обертвий циліндричний барабан, де під дією лопатей матеріал піднімається та пересипається, інтенсивно контактуючи з потоком гарячого сушильного агента (повітря або газів). У результаті відбувається випаровування вологи, після чого висушений продукт вивантажується з вихідної частини барабана, а пароповітряна суміш відводиться через газовідвідний патрубок [27].

2.6 Опис апаратурно-технологічної схеми

Виробництво карбонату калію здійснюється за безперервною апаратурно-технологічною схемою. Особливістю запропонованої технології є **удосконалення стадій карбонізації та відокремлення твердої фази**, що дозволяє підвищити стабільність процесу та якість готового продукту.

Процес починається з подачі очищеного водного розчину хлориду калію у мембранний електролізер (1), де в результаті електрохімічного процесу

утворюється розчин гідроксиду калію з масовою часткою близько 30 %, а також побічні продукти — водень і хлор. Отриманий розчин КОН надходить у збірник (2) та насосом (3) подається у двокорпусну вакуум-випарну установку (4), де концентрується до 40 %.

На відміну від базової схеми, стадія карбонізації здійснюється у колоні карбонізації (5), обладнаній багатопереливними тарілками у нижній частині апарата. У колоні відбувається протитечійний контакт розчину КОН з діоксидом вуглецю з утворенням карбонату калію. Застосування багатопереливних тарілок забезпечує рівномірний розподіл CO_2 по перетину колони та інтенсифікацію масообміну в зоні реакції. Утворена суспензія насосом Н-2 (6) подається у збірник (7), після чого насосом (8) надходить на камерний фільтр-прес (9) для видалення механічних домішок.

Очищений розчин K_2CO_3 надходить у змішувальний бак (10), де коригується його концентрація до 30 %, та насосом (11) подається у трикорпусну вакуум-випарну установку (12), у якій здійснюється концентрування до 50 %.

Сконцентрований розчин насосом (13) частково повертається у процес як рецикл, а основний потік подається у вакуум-кристалізатор (14). **Удосконаленням наступної стадії** є застосування центрифуги ФПД (16) після кристалізації замість традиційного фільтрування. Кристалічна суспензія шестерінчастим насосом (15) подається у центрифугу, де відбувається ефективно відокремлення кристалів карбонату калію від маточного розчину та зниження їх залишкової вологості.

Вологий карбонат калію гвинтовим транспортером (17) подається у барабанну сушарку (18), де продукт доводиться до товарної вологості. Висушений карбонат калію гвинтовим транспортером (19) транспортується у конусний бункер готового продукту (20), з якого він направляється на фасування. На рисунку 2.3 наведено апаратурно-технологічну схему виробництва карбонату калію з урахуванням запропонованих удосконалень.

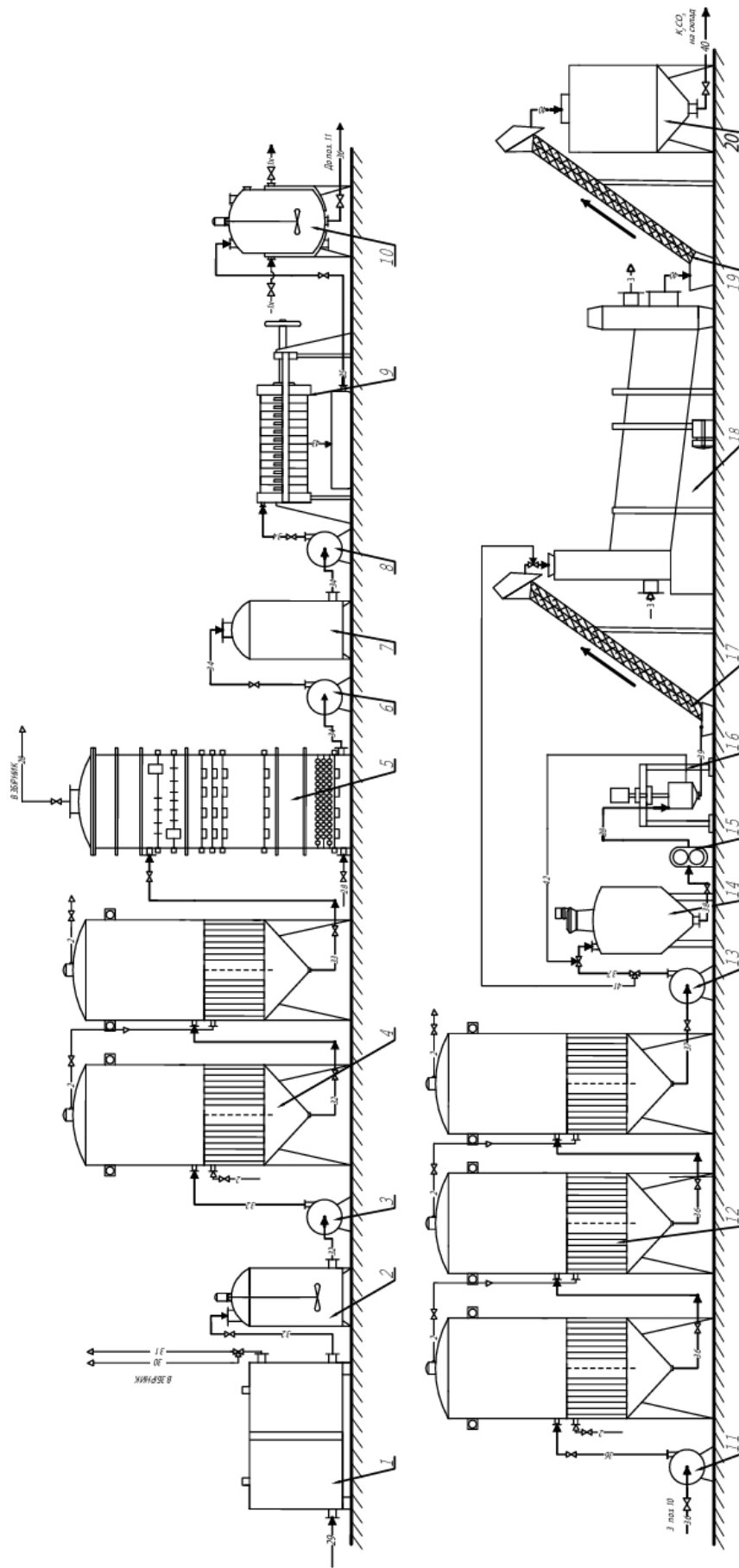


Рисунок 2.7 – Апаратурно-технологічну схему виробництва карбонату калію

2.5 Розрахунок барабанної сушарки

Для сушіння карбонату калію K_2CO_3 :

Вихідні дані для розрахунку:

Згідно з матеріальним балансом стадії сушіння:

- продуктивність сушарки по вологому матеріалу

$$G=700 \text{ кг/год}$$

- Масштабування матеріального балансу на 700 кг/год:

Дані з балансу:

Товарний продукт: 5,025 т/добу

Випарена вода: 1,8 т/добу

Переводимо товарний продукт у кг/год:

$$\frac{5,025 \cdot 1000}{24} = 209,4 \text{ кг/год}$$

Коефіцієнт масштабування:

$$k = \frac{700}{209,4} = 3,34$$

Випарена вода:

$$G_{\text{вип}} = \frac{1,8 \cdot 1000}{24} \cdot 3,34 = 250 \text{ кг/год}$$

Вхід у сушарку (вологий продукт):

$$G_{\text{вх}} = \frac{6,9 \cdot 1000}{24} \cdot 3,34 = 960 \text{ кг/год}$$

Втрати K_2CO_3 (0,5 %):

$$G_{\text{втр}} = 700 \cdot 0,005 = 3,5 \text{ кг/год}$$

- масова частка сухої речовини до сушіння

$$X_1 = \frac{4,9}{6,9} = 0,710 \Rightarrow W1 = 1 - X_1 = 0,29 = 29\%$$

- масова частка сухої речовини після сушіння

$$X_2 = 0,99 \Rightarrow W_2 = 0,01 = 1\%$$

Температура сушильного агента:

$$T=190^{\circ}\text{C}$$

Матеріал — карбонат калію K_2CO_3 , кінцевий продукт — сухий товарний продукт.

Після стадії фільтрації та центрифугування дрібнодисперсні частинки карбонату калію з середнім розміром близько 5 мкм утворюють агломерований вологий продукт. У процесі зневоднення та подальшої підготовки до сушіння (змішування з рециклом) відбувається злипання частинок з формуванням грудочок (агломератів) розміром 0,5–2 мм, що є характерним для подачі матеріалу в барабанні сушарки. У подальших розрахунках прийнято середній діаметр частинок $d = 1 \text{ мм} = 0,001 \text{ м}$.

Коефіцієнт заповнення барабана: $\beta=0,1$

Швидкість повітря в барабані: $\vartheta=1,5 \text{ м/с}$

1. Вологість до та після сушіння:

$$W_{\text{вип}} = G \cdot (W_1 - W_2)$$

$$W_{\text{вип}} = 960 \cdot (0,29 - 0,01) = 269 \text{ кг/год}$$

Для подальших конструктивних розрахунків приймаємо узгоджене з балансом значення: $W_{\text{вип}} = 250 \text{ кг/год}$.

2. Об'єм барабана розраховуємо за формулою (2.1) або (2.2)

$$V_6 = \frac{\pi D_6^2}{4} \cdot L_6 \quad (2.1)$$

$$V_6 = \frac{W}{A} \quad (2.2)$$

Згідно з Малежиком для солей: $A=20\dots60 \text{ кг}/(\text{м}^3)$, приймаємо середнє значення: $A=40 \text{ кг}/(\text{м}^3 \cdot \text{год})$

$$V_6 = \frac{W}{A} = \frac{250}{40} = 6,25 \text{ м}^3$$

Де D_6 та L_6 , - діаметр і довжина барабана, м:

Діаметр розраховуємо за формулою (2.3)

$$D_6 = 0,0188 \cdot \sqrt{\frac{V}{(1-\beta) \cdot \vartheta}} \quad (2.3)$$

Де ϑ - швидкість повітря в барабані, м/с: 0,5 -3,0 м/с

β - коефіцієнт заповнення барабана

V - об'ємна витрата вологого повітря, м³

Об'ємна витрата повітря:

$$V = \frac{G_{\text{вип}}}{\rho_p}$$

За температури 190 °С густина повітря $\rho_p \approx 0,75$ кг/м³:

$$\dot{V} = \frac{250}{0,75} = 333 \text{ м}^3/\text{год} = 0,0925 \text{ м}^3/\text{с}$$

$$D_6 = 0,0188 \cdot \sqrt{\frac{0,0925}{0,9 \cdot 1,5}} = 1,2 \text{ м}$$

Знайдемо довжину барабана за формулою (2.4)

$$L_6 = \frac{V_6 \cdot 4}{\pi \cdot D_6^2} \quad (2.4)$$

$$L_6 = \frac{6,25 \cdot 4}{3,14 \cdot 1,2^2} = 5,5 \text{ м}$$

$$\frac{L_6}{D_6} = \frac{5,5}{1,2} = 4,6$$

Відношення довжини барабана до його діаметра становить 4,6, що входить в норми.

3. Об'єм матеріалу, який заповнює барабан, м³, визначаємо за формулою (2.5)

$$V_M = \frac{G_{\text{ср}} \cdot \tau}{\rho_H \cdot 60}$$

де $G_{\text{ср}}$ - середня маса матеріалу який проходить через барабан, кг/год (2.6)

Середня маса матеріалу який проходить через барабан (2.6):

$$G_{\text{ср}} = \frac{G_{\text{вх}} + G_{\text{вих}}}{2} = \frac{960 + 700}{2} = 830 \text{ кг/год}$$

Насипна густина ρ_H :

Для сухого кристалічного карбонату калію з довідників приймають:
 $\rho_n = 850 \text{ кг/м}^3$

Час перебування матеріалу в барабані $\tau = 30$ хв - значення прийнято згідно з типовими рекомендаціями для барабанних апаратів безперервної дії при обробці сипких матеріалів.

$$V_M = \frac{830 \cdot 30}{850 \cdot 60} = 0,49 \text{ м}^3$$

4. Критерій Архімеда (формула 2.7):

$$Ar = \frac{g \cdot d^3 \cdot \rho_{\text{ч}} \cdot \rho_{\text{сп}}}{\mu_{\text{сп}}^2}$$

де:

- $g = 9,81 \text{ м/с}^2$
- $d = 0,001 \text{ м}$
- густина частинок K_2CO_3 : $\rho_{\text{ч}} = 1660 \text{ кг/м}^3$
- густина повітря: $\rho_{\text{сп}} = 0,75 \text{ кг/м}^3$
- динамічна в'язкість повітря при $190 \text{ }^\circ\text{C}$: $\mu = 2,6 \cdot 10^{-5} \text{ Па}\cdot\text{с}$

$$Ar = 1,8 \cdot 10^4 \text{ Н} = 18000 \text{ Н}$$

5. Знайдемо швидкість витання частинок (2.8)

$$V_{\text{ВИТ}} = \frac{\mu_{\text{сп}}}{d \cdot \rho_{\text{сп}}} \cdot \left(\frac{Ar}{18 + 0,575 \cdot \sqrt{Ar}} \right) \quad (2.8)$$

$$V_{\text{ВИТ}} = \frac{0,000026}{0,001 \cdot 0,75} \cdot \left(\frac{18000}{18 + 0,575 \cdot \sqrt{18000}} \right) = 6,6 \text{ м/с}$$

6. Частота обертання барабана, хв^{-1} визначається формулою (2.9):

$$n = \frac{m \cdot k \cdot L_6}{\tau \cdot D_6 \cdot \text{tg} \alpha} \quad (2.9)$$

$$n = \frac{m \cdot k \cdot L_6}{\tau \cdot D_6 \cdot \text{tg} \alpha}$$

Де, $m = 0,8$ (для барабанних сушарок з поличковими насадками коефіцієнт m приймається в межах $0,7-0,9$). $k = 1,0$ (Для сипких матеріалів при сталому русі

продукту і сушильного агента коефіцієнт k приймається рівним 1,0); α - кут нахилу барабана, $\alpha=3^\circ$, $\operatorname{tg}\alpha=\operatorname{tg}3^\circ=0,052$.

$$n = \frac{0,8 \cdot 1,0 \cdot 5,5}{30 \cdot 1,2 \cdot 0,052} = 2,35 \text{ об/хв}^{-1}$$

7. Потужність, яка потрібна для обертання барабана, орієнтовно визначається формулою (2.10):

$$N = 0,0013 \cdot D_6^3 \cdot L_6 \cdot p_H \cdot \sigma \cdot n \quad (2.10)$$

Коефіцієнт опору обертання барабана σ приймаємо рівним 0,15.:

$$N = 0,0013 \cdot 1,2^3 \cdot 5,5 \cdot 850 \cdot 0,15 \cdot 2,35 = 3,7 \text{ кВт}$$

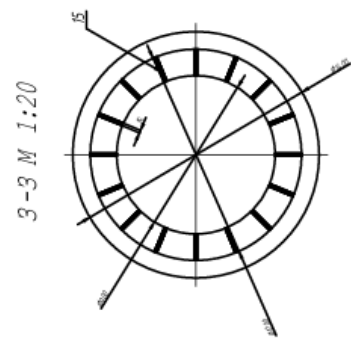
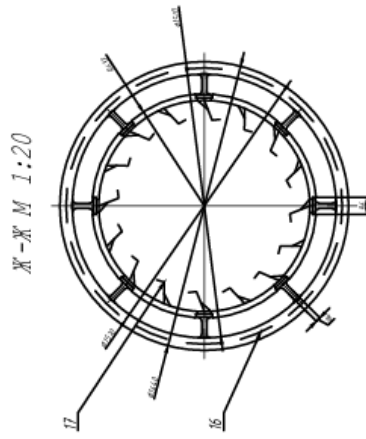
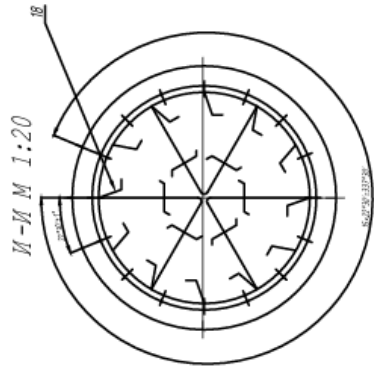
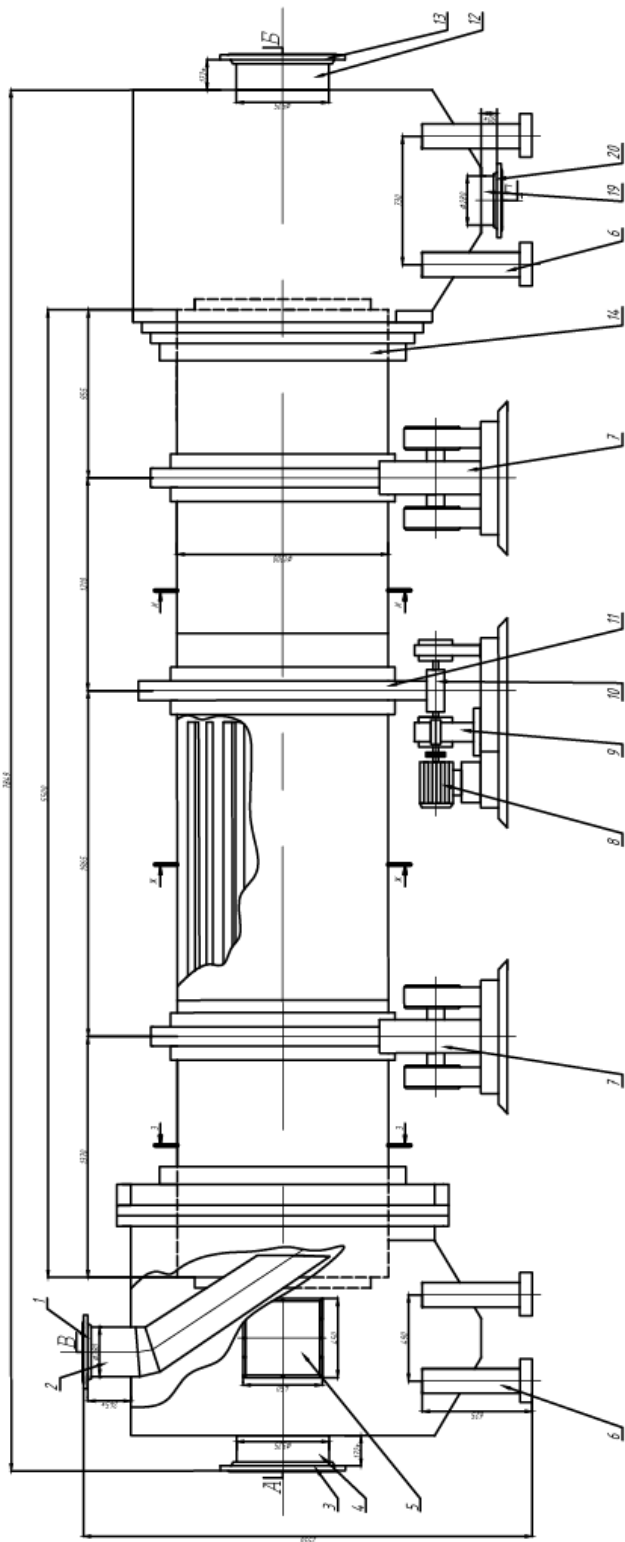


Рисунок 2.8 – Загальний вигляд барабанної

РОЗДІЛ III ТЕХНІКО-ЕКОНОМІЧНЕ ОБҐРУНТУВАННЯ

Карбонат калію (K_2CO_3) є важливим неорганічним продуктом, який широко застосовується у виробництві скла спеціального призначення, калійних безхлорних добрив, фармацевтичній, харчовій та хімічній промисловості. Завдяки високому вмісту K_2O (до 68 %) карбонат калію є ефективним джерелом калію для сільського господарства, особливо для культур, чутливих до хлоридів, оскільки не містить хлор-іонів і не спричиняє засолення ґрунту [19].

Стан та особливості українського ринку карбонату калію

Світовий ринок калійних солей характеризується стабільно високим попитом, що зумовлено розвитком аграрного сектору, зростанням виробництва мінеральних добрив та скла, а також розширенням застосування калійних сполук у хімічній промисловості. В Україні внутрішній попит на калійні солі у перерахунку на K_2O становить близько 2,2 млн т на рік, при цьому власне виробництво не забезпечує повного покриття потреб внутрішнього ринку, що призводить до значної імпортозалежності [19].

За наявними даними, щорічний обсяг імпорту карбонату калію в Україну перевищує 80 тис. т, що свідчить про дефіцит продукції внутрішнього виробництва та наявність ринкової ніші для створення нових або розширення існуючих виробничих потужностей [19].

Основними постачальниками карбонату калію на український ринок є країни Азійського регіону та Європейського Союзу, що обумовлює залежність від зовнішньої кон'юнктури ринку, логістичних витрат і валютних коливань [29].

Український ринок карбонату калію характеризується відносною стабільністю. За прогностичними оцінками, середньорічний темп зростання ринку до 2027 року становить близько $-0,03\%$, що свідчить про насичення ринку та

Відповідальна організація НУХТ, каф. ТЖХТ	Технічне узгодження Романова О.О	Вид документа Пояснювальна записка	Статус документа			
Власник документа НУХТ	Розробник документа Беляєва С.С.	Назва, додаткова назва РОЗДІЛ III ТЕХНІКО- ЕКОНОМІЧНЕ ОБҐРУНТУВАННЯ	ННІХТ.ЗХТ-5-3.026.161.072.КР.ПЗ			
	Документ затверджено Носенко Т.Т.		Інд. змін.	Дата видання 05.11.2025	Мова ua	Аркуш 72/90

перехід до стадії стабільного попиту. Водночас зберігається стійкий інтерес до високочистого карбонату калію з боку виробників скла, фармацевтичної та харчової промисловості [29].

Конкурентне середовище та технологічні тенденції

На українському ринку калійних продуктів переважають великі міжнародні компанії, зокрема OstChem Holding AG та EuroChem Group AG, які орієнтовані переважно на масове виробництво калійних добрив. Сегмент виробництва високочистого карбонату калію залишається недостатньо насиченим, що створює передумови для розвитку середньотоннажних виробництв, орієнтованих на внутрішніх промислових споживачів [30].

Сучасні тенденції розвитку хімічної промисловості спрямовані на впровадження екологічно безпечних та енергоефективних технологій. Особливу увагу приділяють мембранним електролізним процесам, які не передбачають використання ртуті, забезпечують високий ступінь конверсії та дозволяють отримувати побічні продукти — водень і хлор — з потенціалом подальшої утилізації або реалізації [19-20].

Техніко-економічне обґрунтування вибору технології

У даному дипломному проєкті передбачено виробництво карбонату калію за безперервною технологічною схемою, що включає мембранний електроліз водного розчину хлориду калію з подальшою карбонізацією гідроксиду калію діоксидом вуглецю. Обрана технологія є промислово впровадженою та широко застосовується у світовій практиці, характеризується високим ступенем перетворення КОН (понад 95 %) та забезпечує отримання продукту з масовою часткою основної речовини не менше 99 % [19-20].

Проєктна продуктивність установки становить 5 т/добу карбонату калію, що відповідає приблизно 1650–1700 т/рік з урахуванням планових зупинок обладнання. Обрана потужність є оптимальною для умов українського ринку, оскільки не потребує значних капітальних інвестицій, дозволяє оперативно

адаптуватися до змін попиту та орієнтована на часткове заміщення імпоротної продукції [29].

Згідно з літературними даними, питомі витрати електроенергії при мембранному електролізі становлять понад 2300 кВт•год на 1 т КОН та близько 190 кВт•год на 1 т K_2CO_3 без урахування теплових витрат, що є прийнятним показником для сучасних електрохімічних виробництв [19].

Застосування багатоефектних випарних установок і вакуум-кристалізаторів дозволяє знизити енергоспоживання та забезпечити стабільність технологічного процесу [17].

Економічні та інвестиційні передумови

Економічна доцільність створення виробництва карбонату калію в Україні зумовлена поєднанням стабільного внутрішнього попиту, значної імпоротної залежності та можливості використання сучасних ресурсозберігаючих технологій. Додатковим чинником є державна політика у сфері екологічного регулювання та підтримки вітчизняного виробництва, що сприяє підвищенню конкурентоспроможності хімічної продукції на внутрішньому ринку [29].

Таким чином, реалізація проєкту виробництва карбонату калію продуктивністю 5 т/добу є технічно здійсненою та економічно обґрунтованою. Впровадження мембранної електролізної технології дозволяє отримувати високоякісний продукт, конкурентоспроможний на українському ринку та здатний частково замінити імпортні поставки [19-20].

Розрахунок собівартості продукції виробництва карбонату калію

Вихідні дані:

- Відпускна ціна карбонату калію: 130 000 грн/т
- Вартість сировини (КОН / технологічні реагенти): 40 000 грн/т
- Питома сумарна електроенергія: 2490 кВт•год/т
- Тариф на електроенергію: 4,50 грн/кВт•год
- Витрати на заробітну плату: 6 000 грн/т

- Витрати на реагенти та допоміжні матеріали: 12 000 грн/т
- Витрати на очищення/екологічні заходи: 10 000 грн/т
- Амортизація, ремонт, обслуговування: 8 000 грн/т

Продуктивність установки — 5 т/добу;

Кількість робочих днів на рік — 330 діб.

1. Річний обсяг виробництва:

$$Q_{\text{річний}} = 5 \cdot 330 = 1650 \text{ т/рік}$$

2. Витрати на електроенергію:

$$2490 \cdot 4,50 = 11\,205 \text{ грн/т}$$

3. Собівартість 1 т карбонату калію:

$$C = 40\,000 + 11\,205 + 6\,000 + 12\,000 + 10\,000 + 8\,000 = 87\,205 \text{ грн/т}$$

4. Річні виробничі витрати:

$$Z_{\text{річні}} = 87\,205 \cdot 1650 = 143\,888\,250 \text{ грн/рік}$$

5. Річна виручка від реалізації продукції:

$$V_{\text{річна}} = 130\,000 \cdot 1650 = 214\,500\,000 \text{ грн/рік}$$

6. Річний прибуток:

$$P = 214\,500\,000 - 143\,888\,250 = 70\,611\,750 \text{ грн/рік}$$

7. Рентабельність продукції:

$$R = \frac{P}{V_{\text{річна}}} \cdot 100\% = \frac{70\,611\,750}{214\,500\,000} \cdot 100\% = 32,9\%$$

8. Орієнтовна величина капітальних вкладень для середньотоннажних хімічних виробництв визначається укрупненим методом з урахуванням вартості основного технологічного обладнання, будівельно-монтажних робіт та допоміжної інфраструктури. Для подальших розрахунків прийнято орієнтовну величину капітальних вкладень на рівні 180 млн грн.

$$K = 180\,000\,000 \text{ грн}$$

9. Строк окупності:

$$T = \frac{K}{P} = \frac{180\,000\,000}{70\,611\,750} = 2,55 \text{ роки}$$

Таблиця 3.1 – Техніко-економічні показники виробництва карбонату калію

Показник	Значення
Продуктивність установки	5 т/добу
Кількість робочих днів на рік	330 днів
Річний обсяг виробництва	1650 т/рік
Відпускна ціна продукції	130 000 грн/т
Собівартість 1 т продукції	87 205 грн/т
Річні виробничі витрати	143 888 250 грн/рік
Річна виручка від реалізації продукції	214 500 000 грн/рік
Річний прибуток	70 611 750 грн/рік
Рентабельність продукції	32,9 %
Орієнтовні капітальні вкладення	180 млн грн
Строк окупності капітальних вкладень	2,55 року

Результати виконаних розрахунків показують, що виробництво карбонату калію продуктивністю 5 т/добу є економічно доцільним. За умови річного випуску 1650 т собівартість 1 т продукції становить 87 205 грн, рентабельність — 32,9 %, а строк окупності капітальних вкладень не перевищує 3 років.

Отримані показники свідчать про конкурентоспроможність запропонованого виробництва та доцільність його реалізації в умовах українського ринку карбонату калію.

РОЗДІЛ IV ОРГАНІЗАЦІЯ КОНТРОЛЮ ЯКОСТІ ПРОДУКЦІЇ

Система контролю якості карбонату калію на підприємстві є комплексною сукупністю методів і засобів, що забезпечують відповідність готового продукту встановленим стандартам якості та безпеки. Вона охоплює всі етапи виробничого процесу — від постачання сировини до реалізації готового продукту [5].

Контроль якості включає [5]:

- контроль сировини та допоміжних матеріалів;
- проміжний контроль під час технологічного процесу;
- контроль готової продукції;
- контроль умов зберігання та транспортування.

Для харчового карбонату калію встановлюються такі основні показники якості [5]:

Таблиця 4.1 – Показники якості харчового карбонату калію

Показник	Норма для харчового продукту	Метод визначення
Вміст K_2CO_3	$\geq 99\%$	Гравіметричний, титриметричний
Вологість	$\leq 0,5\%$	Гравіметричний метод
Розмір кристалів	0,5–2 мм	Сітковий аналіз, візуально
pH 1% водного розчину	11–12	pH-метрія
Вміст домішок (Na_2CO_3 , Cl^- , SO_4^{2-})	$\leq 0,2\%$	Хімічний аналіз
Метали важкі (Pb, As, Hg)	\leq нормативів FDA/ЄС	Атомно-абсорбційна спектроскопія

Відповідальна організація НУХТ, каф. ТЖХТ	Технічне узгодження Романова О.О	Вид документа Пояснювальна записка	Статус документа			
Власник документа НУХТ	Розробник документа Беляєва С.С.	Назва, додаткова назва РОЗДІЛ IV ОРГАНІЗАЦІЯ КОНТРОЛЮ ЯКОСТІ	ННІХТ.ЗХТ-5-3.026.161.077.КР.ПЗ			
	Документ затверджено Носенко Т.Т.		Інд. змін.	Дата видання 05.11.2025	Мова ua	Аркуш 77/90

Продовження таблиці 4.1

Показник	Норма для харчового продукту	Метод визначення
Органолептичні властивості	Білий, без запаху, лужний смак	Візуальний та сенсорний аналіз

Система контролю якості на підприємстві включає [5]:

1. Стратегічний контроль якості: визначення стандартів продукції, сертифікація виробництва, вибір постачальників сировини.
2. Технологічний контроль: постійний моніторинг параметрів процесу — концентрації розчину, температури випарювання, швидкості кристалізації, втрат карбонату калію.
3. Вхідний контроль сировини: перевірка чистоти KOH, CO₂, води та допоміжних реагентів.
4. Контроль проміжних продуктів: перевірка масової частки карбонату калію, вологості та розміру кристалів після випарної стадії.
5. Контроль готової продукції: перевірка фізико-хімічних, органолептичних та безпечних показників.
6. Умови зберігання та транспортування: продукція повинна зберігатися у герметичних, сухих контейнерах при температурі 5–25 °С; транспортування виконується відповідно до правил перевезення сипучих харчових продуктів.

Основні методи контролю якості, що застосовуються на виробництві [5]:

- Фізико-хімічні методи: гравіметрія, титриметрія, рН-метрія, атомно-абсорбційна спектроскопія;
- Органолептичні методи: оцінка кольору, запаху, смаку, структури кристалів;
- Механічні методи: сітковий аналіз розміру часток;

- Системи моніторингу технологічного процесу: контроль температури, тиску, концентрації розчинів, швидкості подачі сировини.

Вимоги до маркування та пакування [5]:

- Продукція маркується згідно стандартів харчових добавок: карбонат калія харчовий, харчова добавка E501, маса нетто, дата виготовлення, термін придатності, умов зберігання.
- Пакування: герметичні полімерні мішки або контейнери, що захищають від вологи та сторонніх запахів.
- Транспортування: сухими транспортними засобами, уникати контакту з кислотами та вологістю.

Для харчового карбонату калію визначаються наступні ключові параметри [30]:

- Зовнішній вигляд (порошок або гранули білого кольору, без сторонніх включень)
- Вміст K_2CO_3
- Вміст Na_2CO_3 та KOH (за нормами безпечного споживання)
- Вміст важких металів (Fe, Pb, Cd, Hg тощо)
- Вологість та залишок, нерозчинний у воді

Продукт відноситься до 3-го класу небезпеки через можливий вплив на здоров'я при неправильному поводженні. Забезпечується використанням засобів індивідуального захисту: рукавичок, спецодягу, маски та захисного взуття [30].

Система контролю включає кілька ключових етапів [30]:

1. Приймання продукції.

- Перевірка умов зберігання на складі: сухість, відсутність сторонніх запахів, цілісність упаковки.
- Візуальний контроль на наявність пошкоджених пакетів або вологості.

- Вибіркова відбірка проб для лабораторного аналізу.
2. Контроль контейнерів та транспортних засобів.
 - Перевірка чистоти та герметичності контейнерів або вантажних відсіків перед завантаженням.
 - Контроль стану дверей, замків, ущільнень і внутрішніх поверхонь.
 3. Завантаження та відбір проб
 - Спостереження за процесом завантаження, контроль ваги та відповідності кількості продукції.
 - Відбір проб відповідно до міжнародних стандартів для подальшого лабораторного аналізу.
 - Підготовка комбінованих проб для комплексної оцінки якості.
 4. Лабораторний контроль
 - Аналіз у акредитованих лабораторіях згідно з міжнародними стандартами (ISO, CEN) та національними методиками.
 - Визначення вмісту K_2CO_3 , вологи, важких металів та інших ключових показників.
 - Фіксація результатів у документах та звітах.
 5. Документування та сертифікація
 - Після завершення контролю видається сертифікат якості та детальний звіт з фотодокументацією.
 - Документи можуть мати цифровий підпис для підтвердження автентичності.

Запровадження системи контролю якості на всіх стадіях виробництва та логістики харчового K_2CO_3 дозволяє гарантувати безпечність, відповідність стандартам та надійність продукту на ринку. Таке комплексне регулювання знижує ризики під час транспортування та зберігання та забезпечує довіру споживачів [30].

РОЗДІЛ V ЕКОЛОГІЧНА ЧАСТИНА ТА ОХОРОНА ПРАЦІ

5.1 Охорона праці на підприємстві

Вплив на здоров'я [31]:

- Карбонат калію може подразнювати шкіру, а при контакті з очима — викликати сильне подразнення. Якщо не надати своєчасну допомогу, можливе ушкодження тканин.
- Вдихання пилу, туману або аерозолі карбонату калію може пошкодити верхні дихальні шляхи, а за значного впливу — навіть легеневу тканину, що може спричинити хімічну пневмонію.
- Потрапляння всередину може викликати подразнення слизових оболонок рота, горла, стравоходу та шлунка; ступінь ураження залежить від кількості речовини.
- На сьогодні не виявлено хронічних ефектів, пов'язаних з дією карбонату калію.
- Карбонат калію не класифікується як канцероген Національною токсикологічною програмою США (NTP), Міжнародним агентством з вивчення раку (IARC) або Управлінням охорони праці США (OSHA).

Рекомендовані заходи управління ризиками

Карбонат калію не є легкозаймистим, вибухонебезпечним або токсичним, однак як лужна речовина становить небезпеку для шкіри та очей. Він також може вступати в реакцію з деякими матеріалами. Перед використанням слід ознайомитися з паспортом безпеки хімічної речовини (MSDS) [30].

Ефективні заходи безпеки [31]:

- Обладнання зон роботи фонтанами для промивання очей і душовими установками. У разі потрапляння на шкіру чи в очі —

Відповідальна організація НУХТ, каф. ТЖХТ	Технічне узгодження Романова О.О	Вид документа Пояснювальна записка	Статус документа			
Власник документа НУХТ	Розробник документа Беляєва С.С.	Назва, додаткова назва РОЗДІЛ V ЕКОЛОГІЧНА ЧАСТИНА	ННІХТ.ЗХТ-5-3.026.161.081.КР.ПЗ			
	Документ затверджено Носенко Т.Т.		Інд. змін.	Дата видання 05.11.2025	Мова ua	Аркуш 81/90

рясно промити водою та звернутися до лікаря. Не використовувати нейтралізуючі розчини без вказівки лікаря.

- Для захисту очей — обов'язково застосовувати захисні окуляри, щитки або окуляри з боковим захистом.
- Робочі місця мають бути добре вентилявані. Якщо працівники відчують дискомфорт, необхідно застосовувати респіратори з високоефективними фільтрами (NIOSH).
- Захист тіла — хімічностійкий одяг (гумові або вінілові костюми).
- Захист рук — гумові рукавиці, довші за зап'ястя, з фіксацією рукавів одягу поверх рукавиць.
- Захист ніг — гумові чоботи. Штани повинні бути поверх чобіт, не заправляти.
- Сухі залишки карбонату калію на обладнанні можуть спричиняти подразнення — обладнання потрібно регулярно очищувати.
- Правильне маркування, поводження та зберігання карбонату калію знижує ризик випадкового потрапляння в організм.
- Обладнання для зберігання та переробки має бути з відповідних матеріалів: рекомендовано — залізо, сталь, нержавіюча сталь, гумовопокрите або фенолопокрите обладнання; для рідких форм — поліетиленові ємності. Не рекомендується використання алюмінію, цинку, латуні, бронзи та міді через ризик реакції.
- Ущільнення насосів має бути захищене кожухами, щоб запобігти розбризкуванню при витіканні.
- Для фланцевих з'єднань рекомендується захисна обгортка з поліпропілену для запобігання розбризкуванню у разі витоку.
- Весь персонал, залучений до роботи з карбонатом калію, повинен пройти відповідне навчання.

Гідроксид калію (KOH) — сильнолужна речовина, 2 клас небезпеки, що спричиняє значні ураження шкіри та очей. Згідно із SDS, KOH класифікується як корозійний для шкіри та очей (Skin Corr. 1A) із фразою H314: Causes severe skin burns and eye damage, а також небезпечний при проковтуванні внаслідок сильної корозійної дії [32].

Хлор (Cl_2) — дуже токсичний газ, 2 клас небезпеки, що належить до окислювальних газів і газів під тиском, із вираженою гострою токсичністю при вдиханні. SDS для Cl_2 показують фрази H330: Fatal if inhaled, спричиняє сильне подразнення очей, шкіри та дихальних шляхів, та H280: Contains gas under pressure; may explode if heated [32].

Діоксид вуглецю (CO_2) — 4 клас небезпеки, не класифікується як токсичний за CLP за нормальних умов, однак як газ під тиском він може спричинити гіпоксію у разі витоків у замкненому просторі; відповідно до SDS категорія фізичної небезпеки «Gas under pressure» використовується для безпеки транспортування та зберігання CO_2 [32].

Водень (H_2) — 4 клас небезпеки, легкозаймистий газ, який у GHS/CLP класифікується як легкозаймистий газ («Flammable gas»); цей фізичний клас небезпеки є обов'язковим при маркуванні балонів із газом як джерела пожежної та вибухової небезпеки [32].

Хлорид калію (KCl) — 4 клас небезпеки, хімічна речовина без класифікації як небезпечна за CLP/GHS у чистому вигляді; SDS зазначають, що вона не класифікується як небезпечна речовина за Регламентом CLP, хоча можливі несерйозні подразнення при контакті з пилом [32].

5.2 Заходи з охорони навколишнього середовища на виробництві

Вплив на водні екосистеми

Карбонат калію підвищує рН водойм і негативно впливає на водні екосистеми. Зокрема, підвищення рН може призвести до порушення балансу водних організмів та зниження біорізноманіття [31].

Вплив на повітряне середовище

Під час виробництва та використання карбонату калію можливе утворення пилу, який може спричиняти подразнення дихальних шляхів у людей та тварин. Тривале вдихання пилу карбонату калію може призвести до хронічних захворювань дихальної системи [31].

Вплив на ґрунт та рослинність

У сільському господарстві карбонат калію використовується як добриво для підвищення лужності ґрунту. Однак надмірне застосування цієї речовини може призвести до порушення кислотно-лужного балансу ґрунту, що негативно впливає на ріст рослин та мікрофлору ґрунту [31].

Заходи з охорони навколишнього середовища

Для мінімізації негативного впливу карбонату калію на довкілля необхідно впроваджувати наступні заходи [32]:

- Контроль за викидами у водні об'єкти: Перед скиданням стічних вод, що містять карбонат калію, необхідно проводити нейтралізацію та очищення для зниження рівня рН до нормативних значень.
- Пилопригнічення: Виробничі процеси повинні бути оснащені системами пилопригнічення та вентиляції для зменшення концентрації пилу в повітрі.
- Раціональне використання в сільському господарстві: Застосування карбонату калію як добрива повинно здійснюватися відповідно до агрохімічних рекомендацій, з урахуванням потреб ґрунту та рослин.
- Впровадження систем екологічного менеджменту: Підприємства, що виробляють або використовують карбонат калію, повинні впроваджувати системи екологічного менеджменту, такі як ISO 14001, для систематичного контролю та покращення екологічних показників діяльності.

ВИСНОВКИ

1. Проведено огляд літературних джерел щодо фізико-хімічних властивостей карбонату калію, сфер застосування та технологій його виробництва. Встановлено, що продукт широко використовується у харчовій, скляній, хімічній промисловості та сільському господарстві, що підтверджує актуальність його виробництва.
2. Досліджено сировинну базу та охарактеризовано вихідну сировину виробництва карбонату калію, що базується на електролізі водного розчину хлориду калію з подальшою карбонізацією гідроксиду калію діоксидом вуглецю.
3. Розроблено принципову технологічну та апаратурно-технологічну схеми виробництва карбонату калію продуктивністю 5 т/добу. Для підвищення ефективності карбонізації запропоновано використання багатопереливних тарілок, а для покращення відділення твердої фази — застосування центрифуги ФПД після кристалізації.
4. Виконано матеріальний розрахунок хіміко-технологічного процесу виробництва карбонату калію, загальні втрати склали 0,8 т/добу. Проведено розрахунок та підбір основного технологічного обладнання, зокрема барабанної сушарки. Визначено потужність приводу барабана 3,7 кВт.
5. Виконано техніко-економічне обґрунтування, собівартість 1 т карбонату калію склала 87 205 грн, річний прибуток — 70 611 750 грн, рентабельність — 32,9%. Строк окупності проєкту становить 2,55 року.
6. Розроблено заходи з охорони праці, контролю якості та охорони довкілля, що забезпечують безпечну експлуатацію обладнання та відповідність продукції нормативним вимогам.

<i>Відповідальна організація</i> НУХТ, каф. ТЖХТ	<i>Технічне узгодження</i> Романова О.О	<i>Вид документа</i> Пояснювальна записка		<i>Статус документа</i>			
Власник документа НУХТ	<i>Розробник документа</i> Беляєва С.С.	<i>Назва, додаткова назва</i> ВИСНОВКИ		<i>ННІХТ.ЗХТ-5-3.026.161.085.КР.ПЗ</i>			
	<i>Документ затверджено</i> Носенко Т.Т.			<i>Інд. змін.</i>	<i>Дата видання</i> 05.11.2025	<i>Мова</i> ua	<i>Аркуш</i> 85/90

СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ

1. Aung Ph. Z., Whittaker L., Rademaker M., Coulson I. Food additives and E numbers. *DermNet*. Wellington, New Zealand, 2023. URL:<https://dermnetnz.org/topics/food-additives-and-e-numbers> (дата звернення: 06.11.2025).
2. Ciceri D., Manning D. A. C., Allanore A. Historical and technical developments of potassium resources. *Science of the Total Environment*. 2015. Vol. 502. P. 590–601.
3. Potassium carbonate handbook / Armand Products Company. Muscle Shoals, AL: Armand Products Company, 2021. 46 с.
4. Ластухін Ю. О. Харчові добавки. Е-коди. Будова. Одержання. Властивості : навч. посіб. Львів : Центр Європи, 2009. 836 с.
5. Technical evaluation report: potassium carbonate handling/processing / USDA Agricultural Marketing Service, 2023. URL:https://www.ams.usda.gov/sites/default/files/media/2023Technical_Report_Potassium_Carbonate_Handling.pdf (дата звернення: 06.11.2025).
6. Potassium carbonate solution market report. 2025. URL:<https://pmarketresearch.com/chemi/potassium-carbonate-solution-market> (дата звернення: 08.11.2025).
7. U.S. Environmental Protection Agency. Potassium carbonate + red thyme oil: ecological risk assessment. 2023. URL:<https://downloads.regulations.gov/EPA-HQ-OPP-2021-0219-0005/content.pdf> (дата звернення: 09.11.2025).

Відповідальна організація НУХТ, каф. ТЖХТ	Технічне узгодження Романова О.О	Вид документа Пояснювальна записка	Статус документа			
Власник документа НУХТ	Розробник документа Беляєва С.С.	Назва, додаткова назва СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ	ННІХТ.ЗХТ-5-3.026.161.086.КР.ПЗ			
	Документ затверджено Носенко Т.Т.		Інд. змін.	Дата видання 05.11.2025	Мова укра	Аркуш 86/90

8. Annexe Chem Pvt. Ltd. What is potassium carbonate? A comprehensive overview. 2024 URL:<https://annexechem.com/guide-to-potassium-carbonate/> (дата звернення: 10.11.2025).
9. Occidental Chemical Corporation. Product stewardship summary: potassium carbonate. URL:
<https://www.oxy.com/siteassets/documents/chemicals/stewardship/potassium-carbonate.pdf> (дата звернення: 10.11.2025).
10. Regulation (EC) No 1333/2008 of the European Parliament and of the Council of 16 December 2008 on food additives (Text with EEA relevance). Official Journal of the European Union. 2008. L 354. P. 16–33.
11. Колона карбонізаційна : пат. на корисну модель UA 89436 U / В. М. Фрумін, В. В. Звонарьов, Ю. В. Звонарьова ; заявник та власник Ю. В. Звонарьова. № u201311097 ; заявл. 17.09.2013 ; опубл. 25.04.2014, Бюл. № 8.
12. The AS Engineers. Decanter Centrifuges – Uses, Benefits & Selection Guide. URL:<https://theasengineers.com/decanter-centrifuges-applications-benefits-and-selection-criteria> (дата звернення: 12.11.2025).
13. KCl – Potassium Chloride. Targeted salts profiles. OBP UEST. URL:
<https://obp.uest.gr/portal/index.php/targeted-salts-profiles/item/27-kcl-potassium-chloride> (дата звернення: 19.11.2025).
14. Potassium Hydroxide — Properties, Structure, Preparation and Uses. URL:
<https://byjus.com/chemistry/potassium-hydroxide/> (дата звернення: 19.11.2025).
15. Carbon Dioxide : Compound Summary // PubChem. URL:
<https://pubchem.ncbi.nlm.nih.gov/compound/Carbon-Dioxide#section=Crystal-Structures> (дата звернення: 19.11.2025).

16. Carbon Dioxide (CO₂) Purity Grade Chart // CO2Meter. URL: <https://www.co2meter.com/blogs/news/co2-purity-grade-charts> (дата звернення: 20.11.2025).
17. Brownsort P. A. Briefing on carbon dioxide specifications for transport: 1st Report of the Thematic Working Group on CO₂ transport, storage and networks. Brussels, 2019. 26 p. URL: https://www.ccusnetwork.eu/sites/default/files/TG3_Briefing-CO2-Specifications-for-Transport.pdf (дата звернення: 21.11.2025).
18. Potassium Carbonate. West Liberty University. URL: <https://westliberty.edu/health-and-safety/files/2012/08/Potassium-Carbonate.pdf> (дата звернення: 21.11.2025).
19. Гринь Г.І., Панасенко В.В., Лавренко А.О., Бондаренко Л.М., Резніченко Г.М., Дейнека Д.М., Адаменко С. Ю. Методи промислового одержання карбонатних солей. *Інтегровані технології та енергозбереження*. 2014. № 2. С. 17–24.
20. Hine F., Yasuda M., Ogata Y., Kojima T., Weiyi Y. Electrochemical Production of Potassium Carbonate. *Journal of The Electrochemical Society*. 1985. Vol. 132, No. 10. P. 2337–2341.
21. Методичні рекомендації до виконання кваліфікаційної роботи: на здобуття освіт. ступ. "Бакалавр" спец. 161 "Хімічні технології та інженерія" освіт.-проф. програми "Хімічна технологія" ден. та заоч. форм здобуття освіти. О. В. Подобій, Т. М. Бойчук ; Нац. ун-т харч. технол. Київ: НУХТ, 2025. 75 с.
22. Тертишний О. О., Півоваров О. А., Кошулько В. С. Теплові процеси та обладнання в харчових виробництвах : навч. посібник. Дніпро : ДДАЕУ, 2025. 362 с.
23. Filter Press Working Principles / YW Wellfilter. URL: <https://www.yw-wellfilter.com/filter-press-working-principles.html> (дата звернення: 25.11.2025).

24. Triple Effect Evaporator: Maximizing Efficiency in Evaporation Systems with Forward-Backward Feed / YASA Ltd. URL: <https://www.yasa.ltd/post/triple-effect-evaporator-maximizing-efficiency-in-evaporation-systems-with-forward-backward-feed> (дата звернення: 25.11.2025).
25. Vacuum Crystallizer / Grellix. URL: https://grellix.com/vacuum-crystallizer/?utm_source (дата звернення: 25.11.2025).
26. Волошин М. Д., Шестозуб А. Б., Гуляєв В. М. Устаткування галузі та основи проектування : навч. посіб. Дніпродзержинськ : ДДТУ, 2004. 371 с.
27. Rotary Drum Dryer / Baichy China. URL: https://www.baichychina.com/Products_Knowledge/rotary-drum-dryer.html?utm_source (дата звернення: 25.11.2025).
28. Процеси і апарати харчових виробництв. Курсове проектування : навч. посіб. І. Ф. Малежик та ін.; за ред. І. Ф. Малежика. Київ : НУХТ, 2012. 543 с.
29. Ukraine potassium carbonate market. 6WResearch. URL: <https://www.6wresearch.com/industry-report/ukraine-potassium-carbonate-market> (дата звернення: 16.12.2025).
30. Potassium carbonate inspection (potash) services : інспекційні послуги щодо контролю якості карбонату калію / CISS GROUP. URL: <https://ciss-group.com/service/survey/survey-by-industry/fertilizers/536-potassium-carbonate-inspection-potash.html> (дата звернення: 24.12.2025).
31. Product Stewardship Summary: Potassium Carbonate / Occidental Chemical Corporation. URL: <https://www.oxy.com/siteassets/documents/chemicals/stewardship/potassium-carbonate.pdf> (дата звернення: 30.12.2025).

32. Classification and Labelling Inventory (CLP) / European Chemicals Agency (ECHA). URL: <https://echa.europa.eu/information-on-chemicals/cl-inventory-database> (дата звернення: 3.01.2026).