

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ ХАРЧОВИХ ТЕХНОЛОГІЙ

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

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

«__» червня 2025 р.

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

«__» червня 2025 р.

КВАЛІФІКАЦІЙНА РОБОТА
НА ЗДОБУТТЯ ОСВІТНЬОГО СТУПЕНЯ БАКАЛАВРА
зі спеціальності 161 Хімічні технології та інженерія
(код та назва спеціальності)
освітньо-професійної програми Хімічні технології харчових добавок та косметичних засобів
на тему: Удосконалення технології виробництва фосфату кальцію

Виконала: здобувачка 4 курсу, групи ХТ-4-14

ЛАВРЕНЧУК Ангеліна Сергіївна
(прізвище, ім'я та по батькові повністю)

_____ (підпис)

Керівник БІЛА Галина Миколаївна
(прізвище, ім'я та по батькові повністю)

_____ (підпис)

Консультанти Ігор ЖИТНЕЦЬКИЙ
(Ім'я ПРІЗВИЩЕ)

_____ (підпис)

_____ (Ім'я ПРІЗВИЩЕ)

_____ (підпис)

Рецензент Олег КРОНІКОВСЬКИЙ
(Ім'я ПРІЗВИЩЕ)

_____ (підпис)

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

Здобувачка _____
(підпис)

Київ – 2025 р.

НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ ХАРЧОВИХ ТЕХНОЛОГІЙ

Інститут Навчально-науковий інститут харчових технологій

Кафедра технології жирів, хімічних технологій харчових добавок та косметичних засобів

Освітній ступінь бакалавр

Спеціальність 161 Хімічні технології та інженерія

(код і назва)

Освітньо-професійна програма Хімічні технології харчових добавок та косметичних засобів

ЗАТВЕРДЖУЮ

Завідувач кафедри ТЖХТ

Тамара НОСЕНКО

“ ” - 2025 року

ЗАВДАННЯ

НА КВАЛІФІКАЦІЙНУ РОБОТУ ЗДОБУВАЧКИ

Лавречнук Ангеліни Сергіївни

(прізвище, ім'я, по батькові)

1. Тема роботи Удосконалення технології отримання фосфату кальцію

Керівник роботи Біла Галина Миколаївна, к.х.н.

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

затверджені наказом закладу вищої освіти від “07” 04 2025 року № 212-кв

2. Строк подання здобувачем роботи 01.06.2025 р.

3. Вихідні дані до роботи 1000 кг/за виробничий цикл

4. Зміст пояснювальної записки (перелік питань, які потрібно розробити)

Вступ, аналітичний огляд науково-технічної літератури, технологічна частина, техніко-економічне обґрунтування, організація контролю якості продукції, екологічна безпека, охорона праці, висновки, список використаної літератури

5. Перелік графічного матеріалу

Лист 1 Принципова-технологічна схема, формат аркушу А1

Лист 2. Апаратурно-технологічна схема, формат аркушу А1

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

6. Консультанти розділів роботи

Розділ	Прізвище, ініціали та посада консультанта	Підпис, дата	
		завдання видав	завдання прийняв
Технологічна частина	Житнецький І.В., доцент, к.т.н.		

7. Дата видачі завдання 15.04.2025

КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

№	Назва етапів виконання кваліфікаційної роботи	Строк виконання етапів роботи	Примітка
1	ВСТУП	15.04.2025	
2	РОЗДІЛ 1 АНАЛІТИЧНИЙ ОГЛЯД НАУКОВ – ТЕХНІЧНОЇ ЛІТЕРАТУРИ	16.04.2025 - 21.04.2025	
3	РОЗДІЛ 2 ТЕХНОЛОГІЧНА ЧАСТИНА	22.04.2025-05.05.2025	
4	РОЗДІЛ 3 ТЕХНІКО – ЕКОНОМІЧНЕ ОГРУНТУВАННЯ	06.05.2025-08.05.2025	
5	РОЗДІЛ 4 ОРГАНІЗАЦІЯ КОНТРОЛЮ ЯКОСТІ ПРОДУКЦІЇ	09.05.2025-11.05.2025	
6	РОЗДІЛ 5 ЕКОЛОГІЧНА ЧАСТИНА ТА ОХОРОНА ПРАЦІ	12.05.2025-14.05.2025	
7	ВИСНОВКИ	15.05.2025	
8	СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ	16.05.2025-26.05.2025	
9	ГРАФІЧНИЙ МАТЕРІАЛ. ТЕХНОЛОГІЧНІ СХЕМИ	27.05.2025-06.06.2025	
10	ГРАФІЧНИЙ МАТЕРІАЛ. ЗАГАЛЬНИЙ ВИГЛЯД АПАРАТУ	07.06.2025-13.06.2025	
11	ПЕРЕДЗАХИСТ, ПЕРЕВІРКА НА АКАДЕМПЛАГІАТ, РЕЦЕНЗУВАННЯ КР	14.06.2025-24.06.2025	

Здобувачка

_____ (підпис)

Ангеліна ЛАВРЕНЧУК

(Ім'я ПРІЗВИЩЕ)

Керівник роботи

_____ (підпис)

Галина БІЛА

(Ім'я ПРІЗВИЩЕ)

РЕФЕРАТ

Лавренчук А.С. Удосконалення технології виробництва фосфату кальцію
ЗАПИСКА ПОЯСНЮВАЛЬНА: 76 С., 11 РИС., 17 ТАБЛ., 56 ДЖЕРЕЛ.

В даній кваліфікаційній роботі наведено огляд науково-технічної літературний та узагальнено інформацію про шляхи удосконалення технології отримання фосфату кальцію.

Описано основні джерела сировинних матеріалів для виробництва фосфату кальцію. Удосконалено технологію виробництва фосфату кальцію та на базі отриманих даних розроблено принципову та апаратурно-технологічну схеми одержання.

Наведено детальний опис розроблених схем.

Підібрано основне технологічне обладнання відповідно до виробничої лінії.

Наведено розрахунок основного апарату та проведено тепловий розрахунок для стадії сушіння.

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

Наведено екологічну частину та охорону праці для даного підприємства.

КЛЮЧОВІ СЛОВА: ХАРЧОВА ДОБАВКА, ФОСФАТ КАЛЬЦІЮ ,
E341, ТЕХНОЛОГІЧНА СХЕМА, АПАРАТУРНА СХЕМА, МАТЕРІАЛЬНИЙ
БАЛАНС, ЗАСТОСУВАННЯ, ЕКОНОМІЧНА ЕФЕКТИВНІСТЬ.

ABSTRACT

Lavrenchuk A.S. Improvement of calcium phosphate production technology

EXPLANATORY NOTE: 76 P., 11 FIGS., 17 TABLES, 56 SOURCES.

In this qualification work, the literature analysis is carried out and information on the improvement of calcium phosphate production technology is summarized.

The main raw materials for the production of calcium phosphate are described. The technology of calcium phosphate production has been improved, and on the basis of the data obtained, the basic and hardware-technological schemes of production have been developed.

A detailed description of the developed schemes was carried out.

The main technological equipment is selected in accordance with the production line.

The calculation of the main apparatus is given and the thermal calculation for the drying stage is carried out.

The material balance of the chemical and technological process is calculated, and the feasibility study of the proposed production method is presented.

The ecological part and labor protection for this enterprise are presented.

KEYWORDS: FOOD ADDITIVE, CALCIUM PHOSPHATE, E341, TECHNOLOGICAL SCHEME, HARDWARE SCHEME, MATERIAL BALANCE, APPLICATION, ECONOMIC EFFICIENCY.

ЗМІСТ

ВСТУП.....	7
РОЗДІЛ I АНАЛІТИЧНИЙ ОГЛЯД НАУКОВО-ТЕХНОЛОГІЧНОЇ ЛІТЕРАТУРИ	9
1.1 Основні відомості про фосфат кальцію.....	9
1.2 Галузі використання фосфату кальцію	15
1.3 Сировинна база для виробництва фосфату кальцію.....	20
1.4 Аналіз існуючих технологій виробництва фосфату кальцію	28
РОЗДІЛ II ТЕХНОЛОГІЧНА ЧАСТИНА.....	32
2.1 Характеристика вихідної сировини	32
2.2 Удосконалення технології виробництва фосфату кальцію.....	35
2.3 Опис принципової технологічної схеми виробництва Фосфату кальцію Е34137	38
2.4 Розрахунок матеріального балансу відділення (цеху) виробництва фосфату кальцію	38
2.5 Підбір та опис основного технологічного обладнання	42
2.6 Опис апаратурно-технологічної схеми виробництва фосфату кальцію.....	45
2.7 Розрахунок барабанної сушильної установки.....	47
РОЗДІЛ III ТЕХНІКО – ЕКОНОМІЧНЕ ОБГРУНТУВАННЯ.....	55
РОЗДІЛ IV ОРГАНІЗАЦІЯ КОНТРОЛЮ ЯКОСТІ ПРОДУКЦІЇ.....	60
РОЗДІЛ V ЕКОЛОГІЧНА ЧАСТИНА ТА ОХОРОНА ПРАЦІ.....	64
ВИСНОВКИ.....	69
СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ.....	70

<i>Відповідальна організація</i> НУХТ, каф. ТЖХТ	<i>Технічне узгодження</i> Біла Г.М.	<i>Вид документа</i> Пояснювальна записка	<i>Статус документа</i>			
<i>Власник документа</i> НУХТ	<i>Розробник документа</i> Лавречнук А.С..	<i>Назва, додаткова назва</i> ЗМІСТ	<i>ННІХТ.ХТ-4-</i> <i>14.025.161.006.КР.ПЗ</i>			
	<i>Документ затверджено</i> Носенко Т.Т.		<i>Інд. змін.</i>	<i>Дата видання</i> 15.04.2025	<i>Мова</i> ua	<i>Аркуш</i> 6/76

ВСТУП

Харчові добавки відіграють важливу роль у сучасній харчовій промисловості, покращуючи якість, структуру, забезпечуючи стабілізацію продуктів, подовженням терміну придатності та підвищенням харчової цінності. Однією з важливих харчових добавок серед їх широкого спектру є фосфати кальцію E341, які застосовуються у виробництві молочних продуктів, випічки, кондитерських виробів, напоїв, сухих сумішей та багато інших продуктів. Використовуються не лише як регулятори кислотності, а й стабілізатори, емульгатори, антизлежувачами та поліпшувачами тіста.

Актуальність роботи зумовлена широким використанням фосфатів кальцію E341 в харчовій промисловості та необхідністю забезпечення якісного та безпечного виробництва і полягає в удосконаленні технології виготовлення фосфату кальцію, що зумовлена необхідністю пошуку ефективних та екологічно безпечних методів виробництва.

Мета роботи: обґрунтування технологічних рішень щодо удосконалення виробництва фосфату кальцію

Предмет дослідження: технологія виробництва фосфату кальцію.

Об'єкт дослідження: фосфат кальцію.

Для досягнення поставленої мети необхідно вирішити наступні **завдання:**

1. Провести аналітичний огляд науково – технічної літератури, щодо фосфату кальцію та вивчити існуючі технології отримання харчової добавки.
2. Вивчити технологічну частину роботи, а саме надати характеристику сировини для отримання фосфату кальцію, розробити технологічні схеми удосконалення технології, розрахувати матеріальний баланс виробництва фосфату кальцію, провести підбір обладнання,
3. Надати техніко-економічне обґрунтування технології отримання фосфату кальцію.

<i>Відповідальна організація</i> НУХТ, каф. ТЖХТ	<i>Технічне узгодження</i> Біла Г.М..	<i>Вид документа</i> Пояснювальна записка	<i>Статус документа</i>			
<i>Власник документа</i> НУХТ	<i>Розробник документа</i> Лавренчук А.С..	<i>Назва, додаткова назва</i> ВСТУП	<i>ННІХТ.ХТ-4- 14.025.161.008.КР.ПЗ</i>			
	<i>Документ затверджено</i> Носенко Т.Т.		<i>Інд. змін.</i>	<i>Дата видання</i> 15.04.2025	<i>Мова</i> ца	<i>Аркуш</i> 7/76

4. Розробити організацію контролю якості фосфату кальцію на підприємстві.
5. Вивчити екологічну частину та охорону праці на підприємстві.

РОЗДІЛ І АНАЛІТИЧНИЙ ОГЛЯД НАУКОВО-ТЕХНОЛОГІЧНОЇ ЛІТЕРАТУРИ

1.1 Основні відомості про фосфат кальцію

Фосфат кальцію E341 – це харчова добавка, яка слугує регулятором кислотності в харчових продуктах[1].

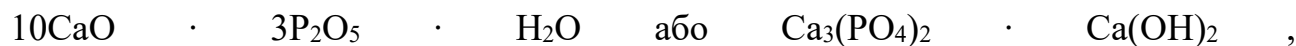
Речовина є аморфним білим порошком (рис.1.1), який практично не розчиняється у воді, але добре розчиняється в кислоті. Зі збільшенням температури фосфати, на відміну від інших хімічних речовин, стають менш розчинними[2].



Рисунок. 1.1 – Фосфат кальцію

Фосфати кальцію поділяються на ортофосфат кальцію однозаміщений E341(i), ортофосфат кальцію двозаміщений E341(ii) та ортофосфат тризаміщений E341(iii).

За будовою ортофосфат кальцію є складною сумішшю різних за структурою фосфатів з формулою:



де основною речовиною є $\text{Ca}_3(\text{PO}_4)_2$.

Ортофосфат кальцію (E341 I) отримують обробкою фосфориту або апатиту сірчаною кислотою або монокислотного фосфату кальцію CO_2 і водяною парою при підвищеній температурі.

Відповідальна організація НУХТ, каф. ТЖХТ	Технічне узгодження Біла Г.М..	Вид документа Пояснювальна записка		Статус документа		
Власник документа НУХТ	Розробник документа Лавренчук А.С..	Назва, додаткова назва РОЗДІЛ І. АНАЛІТИЧНИЙ ОГЛЯД НАУКОВО – ТЕХНІЧНОЇ ЛІТЕРАТУРИ		ННІХТ.ХТ-4- 14.025.161.010.КР.ПЗ		
	Документ затверджено Носенко Т.Т.			Інд. змін.	Дата видання 15.04.2025	Мова ua

Дикальцію ортофосфат (Е341 ІІ) отримують у безводній формі і має неочищену формулу CaHPO_4 і $M=136,06$ г/моль, а також у гідратованому вигляді з неочищеною формулою $\text{CaHPO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ і $M=172,09$ г/моль.

Трикальцій ортофосфат (Е341 ІІІ) широко поширений у ґрунті, кістках, а також у фосфоритах, апатитах, гуано тощо. Має бруutto-формулу $\text{Ca}_3(\text{PO}_4)_2$ і $M=310,17$ г/моль [16].

Добавка Е341 (І) має синоніми: одноосновний фосфат кальцію, монокальцій ортофосфат. Його хімічна назва - дигідрофосфат кальцію, дигідроортофосфат монокальцію або дигідромонофосфат монокальцію. Зустрічається в безводній формі з неочищеною формулою $\text{Ca}(\text{H}_2\text{PO}_4)_2$ з $M=234,05$ г/моль і моногідратом $\text{Ca}(\text{H}_2\text{PO}_4)_2 \cdot \text{H}_2\text{O}$ з $M=252,09$ г/моль.

Добавка має форму безбарвних кристалів, що розчиняються у воді та кислотах.

При нагріванні до 109°C він втрачає кристалізаційну воду, а при 203°C розкладається до метафосфату. Е343 (І) повинен мати мінімальний вміст 95% активної речовини до безводної речовини. Втрати при сушінні повинні бути не більше 14% після сушіння при 105°C протягом чотирьох годин (безводний) і не більше 17,5% після нагрівання при 800°C протягом 30 хвилин (безводний). Вміст P_2O_5 має становити від 55,5% до 61,1%, а вміст CaO - від 23% до 27% для безводних зразків.

Дикальцію ортофосфат Е341 (ІІ) – двоосновний фосфат кальцію, двокальцій ортофосфат, а його хімічна назва – моногідрофосфат кальцію, гідроортофосфат кальцію, вторинний фосфат кальцію або дикальцій фосфат.

Дикальцій ортофосфат випускається у формі кристалів, гранул, гранульованого порошку або білого порошку.

Він нерозчинний у воді та етанолі, але розчинний у кислотах. При прожарюванні розкладається до пірофосфату. Дикальційфосфат після сушіння при 200°C протягом трьох годин повинен містити мінімум 98% і максимум 102% CaHPO_4 .

Втрати при прожарюванні при 800°C протягом 30 хвилин не повинні перевищувати максимум 8,5% (для безводного) і 26,5% (для дигідрату). Вміст P_2O_5 в добавці становить від 50,0% до 52,5% (безводний).

Трикальцію ортофосфат (E341 III) – триосновний фосфат кальцію, ортофосфат кальцію, трикальцій фосфат, а хімічна назва – трикальцій дифосфат.

Це білий аморфний порошок без запаху та смаку, стійкий на повітрі. Він нерозчинний у воді, етанолі, але розчинний у розбавлених кислотах (HCl, HNO₃). Він має температуру плавлення 1670°C. Вміст P_2O_5 для безводної речовини становить від 38,5% до 48,0%. Втрати при прожарюванні при 800°C до постійної ваги не більше 8% [17].

Фосфат кальцію білий стабільний порошок з температурою плавлення 1670°C, який практично не розчиняється у воді, не розчиняється в етанолі, але розчиняється у розведених мінеральних кислотах (HCl, HNO₃) [3].

Ортофосфати кальцію є основними мінеральними компонентами кісток і зубів, і існує великий інтерес до розуміння фізичних механізмів, які лежать в основі їхнього росту, розчинення та фазової стабільності. [4]

Ортофосфат існує у двох кристалічних формах: α -модифікації, що стабільна при високих температурах, та β -модифікації, яка є стабільною за нижчих температур. Перетворення однієї форми в іншу відбувається при температурі 1180 °C[5].

Ортофосфат кальцію ($Ca_3(PO_4)_2$), або трикальційфосфат, є неорганічною речовиною білого кольору, що за звичайних умов має вигляд однорідного кристалічного порошку. Він є стабільним і твердим матеріалом, практично нерозчинним у воді (приблизно 0,1 г/л при температурі 25 °C), що обумовлює його широке використання у харчовій промисловості, медицині, фармації, сільському господарстві та лабораторній практиці.

Молекулярна маса ортофосфату кальцію становить 310,17 г/моль, щільність – 3,14 г/см³.

Речовина є термостійкою: температура її плавлення досягає 1670°C.

У деяких джерелах вказано нижчу температуру (450°C), що може свідчити про фазові переходи або зміни у структурі кристалічної форми. Ортофосфат кальцію не є горючим і не має температури спалаху. Його коефіцієнт заломлення становить 1,63, а водні розчини мають нейтральне або слаболужне середовище – рН не менше 7.

У звичайних умовах ортофосфат кальцію зберігається при кімнатній температурі (приблизно +20°C) у сухому, захищеному від вологи середовищі.

Для тривалого зберігання рекомендується прохолодне та сухе місце.

Транспортується без необхідності спеціального температурного режиму.

Упаковується зазвичай у пластикові контейнери, що герметично закриваються, запобігаючи потраплянню вологи та сторонніх домішок.

Ортофосфат кальцію відзначається високою чистотою – до 98%, що дозволяє використовувати його у чутливих хімічних процесах. Його хімічна інертність у нейтральному середовищі забезпечує стабільність під час зберігання і транспортування. Проте у кислому середовищі він може вступати в реакції з утворенням розчинних фосфатів та вивільненням іонів кальцію, що має значення, зокрема, у біологічних та агрохімічних процесах [18].

Харчові фосфати кальцію позначаються кодом E341 (i, ii, iii) і виконують низку технологічних функцій у харчовій промисловості. Зокрема, вони застосовуються як стабілізатори, регулятори кислотності, емульгуючі солі, розпушувачі, антизлежувальні агенти, фіксатори кольору, речовини, що утримують вологу, синергісти антиоксидантів і ущільнювачі тканин рослинного походження.

На жаль на сьогоднішній день в Україні не налагоджено власне виробництво харчових фосфатів, що зумовлює актуальність розробки технологій їх синтезу для розвитку хімічної та харчової промисловості.

Методи отримання ортофосфатів кальцію умовно поділяються на дві основні групи.

До першої відносяться твердофазні способи, при яких змішують вихідні речовини з кальцієм і фосфором у заданому молярному співвідношенні (Ca/P), після чого піддають їх термічній обробці.

Ці методи, хоч і ефективні, характеризуються високою енерговитратністю та тривалим процесом.

Альтернативу становлять так звані «мокрі» методи, які передбачають синтез у розчині шляхом хімічного осадження, гідротермального впливу або гідролізу інших форм фосфатів кальцію.

Основною перевагою «мокрих» методів є зниження енерговитрат, однак вони вимагають ретельного контролю умов осадження. Навіть незначні відхилення можуть призвести до утворення продуктів із порушеною стехіометрією.

Науково обґрунтовано, що в системі Ca(OH) - HPO₄ - H₂O можливе формування восьми індивідуальних ортофосфатів кальцію з різним співвідношенням Ca/P у діапазоні від 0,5 до 1,67.

До таких сполук належать: Ca(H₂PO₄)-H₂O, Ca(H₂PO₄)₂, CaHPO₄ x 2H₂O, CaHPO₄, α-Ca₃(PO₄)₂, β-Ca₃(PO₄)₂, Ca₈(HPO₄)₂(PO₄)₄ x 5H₂O та Ca₁₀(PO₄)₆(OH)₂.

Крім того, до переліку індивідуальних речовин доцільно додати фосфати змінного складу, зокрема аморфні форми кальційфосфатів, які описуються загальною формулою Ca_xH_y(PO₄)_z x nH₂O. Дослідження показали, що у таких сполуках відношення Ca/P може змінюватися в межах від 1,2 до 2,2. Аморфні кальцієві фосфати зазвичай є першими осадженими твердими фазами, які утворюються при швидкому змішуванні водних розчинів солей кальцію та ортофосфорної кислоти. Такі осади мають низьку термодинамічну стабільність і в розчині з часом самовільно перетворюються на кристалічні форми ортофосфатів кальцію [19].

Фосфат кальцію *E-341* дозволений у харчовій промисловості в Україні, а максимальна кількість для прийому всередину не повинна перевищувати 70 мг/кг на добу.

Регулює кислотність продуктів, стабілізує їх колір і консистенцію, у тому числі ущільнює тканину овочів і фруктів, перешкоджає стіканню продуктів і появі сухих сумішей з грудками, покращує властивості борошна, діє як розпушувач. Фосфати кальцію використовуються в багатьох молочних продуктах, в різноманітних сухих сумішах (сніданки, супи, концентрати), в хлібобулочних і макаронних виробках, у виробках з фруктів і картоплі, м'ясних і рибних продуктах, напоях, спортивному харчуванні, БАДах [20].

Фосфати кальцію, що класифікуються як харчова добавка E341, є неорганічними сполуками, які широко застосовуються в харчовій промисловості завдяки своїм функціональним властивостям.

Іонні взаємодії у водному середовищі: дослідження, проведене з використанням фемтосекундної інфрачервоної спектроскопії та молекулярного моделювання, виявило, що у водному середовищі фосфатні групи утворюють контактні іонні пари з іонами кальцію (Ca^{2+}). Ці взаємодії мають значний вплив на стабільність фосфатних структур, що є важливим для розуміння їхньої поведінки в біологічних системах та харчових продуктах [21].

Механізми розчинення натрій-кальцій-фосфатних стекел, показало, що процес розчинення має двостадійний характер: початкову дифузійну стадію та подальшу стадію, обмежену реакцією. Швидкість розчинення залежить від складу матеріалу та рН середовища, що має важливе значення для контролю стабільності фосфатів кальцію в різних умовах [22].

Дослідження мезопористих стекел, допованих іонами, виявило, що присутність оксиду фосфору (P_2O_5) сприяє утворенню впорядкованої мезопористої структури. Це покращує механічні властивості матеріалу та його біоактивність, що є перспективним для застосування у виробництві харчових добавок та біоматеріалів [23].

Сучасні дослідження розширюють розуміння фізико-хімічних властивостей фосфатів кальцію (E341),

підкреслюючи їхню складну поведінку у водному середовищі, залежність розчинності від умов середовища та вплив на структурні характеристики матеріалів. Ці знання є важливими для оптимізації використання фосфатів кальцію в харчовій промисловості та фармацевтиці.

1.2 Галузі використання фосфату кальцію

Фосфат кальцію (E341) є неорганічною сполукою, що широко застосовується в різних галузях промисловості завдяки своїм фізико-хімічним властивостям. Існує три основні форми E341: монокальцій фосфат (E341 i), дикальцій фосфат (E341 ii) та трикальцій фосфат (E341 iii).

Однією з основних галузей застосування фосфату кальцію є харчова промисловість, де широко використовується як антислежувач, що запобігає злипанню сипучих продуктів, таких як сухе молоко, борошно, цукрова пудра, розчинні какао-напої та суміші спецій. Крім того, фосфат кальцію відіграє роль регулятора кислотності та буферної речовини, стабілізуючи рівень рН у продуктах. Це сприяє збереженню кольору, текстури та смакових характеристик харчових виробів, особливо у випічці та кондитерських виробках. Важливим напрямом є також використання фосфату кальцію як джерела кальцію та фосфору. Його додають до дитячого харчування, збагаченого молока, рослинних альтернатив молочним продуктам та сухих сніданків, що дозволяє задовольняти добову потребу організму у мінералах, необхідних для формування та підтримки міцності кісток і зубів [24].

У фармацевтичній галузі фосфат кальцію застосовується насамперед як наповнювач у виробництві таблеток. Завдяки інертності до активних фармацевтичних інгредієнтів, він дозволяє створювати стабільні лікарські форми, які не взаємодіють із діючими речовинами. До того ж, завдяки добрій пресувальності, фосфат кальцію забезпечує належну міцність таблеток. Ще одним важливим напрямом є його застосування у тканинній інженерії, зокрема у вигляді гідроксиапатиту — біосумісного матеріалу, який є основним мінеральним компонентом кісткової тканини.

Гідроксиапатит на основі кальцій фосфатів використовують для імплантатів, остеокондуктивних матриць та у стоматологічній практиці при заповненні кісткових дефектів [25].

У сільському господарстві фосфат кальцію слугує як мінеральне добриво, що забезпечує рослини доступним фосфором — одним з основних макроелементів, необхідних для фотосинтезу, енергетичного обміну та формування кореневої системи. Трикальцій фосфат особливо активно використовується в удобренні ґрунтів, виснажених внаслідок інтенсивного землеробства. Крім того, фосфати кальцію є важливою кормовою добавкою у тваринництві. Вони забезпечують тваринам адекватне споживання кальцію і фосфору, що позитивно впливає на формування кісткової тканини, зубів, рогів, а також на лактацію та репродуктивну функцію [26]. Крім того фосфати кальцію є важливою кормовою добавкою у тваринництві. Вони забезпечують тваринам адекватне споживання кальцію і фосфору, що позитивно впливає на формування кісткової тканини, зубів, рогів, а також на лактацію та репродуктивну функцію.

У косметичній промисловості фосфат кальцію використовується як м'який абразив, зокрема в зубних пастах, де він ефективно полірує поверхню емалі, не пошкоджуючи її. Завдяки своїй біосумісності, фосфати кальцію не викликають подразнень і є безпечними для щоденного використання. Також їх додають у декоративну та доглядову косметику як стабілізатори структури, які покращують консистенцію кремів і пудр, а також регулюють вологість. В останні роки розглядаються перспективи використання наноформ фосфатів кальцію у створенні біоактивної косметики, яка сприятиме регенерації шкіри та уповільненню процесам старіння [27].

Монокальцій фосфат або дигідрофосфат кальцію, харчовий сорт, який зазвичай використовується з бікарбонатом натрію як розпушувач у хлібобулочних виробках. Європейський номер харчової добавки для нього — E 341(I). Як правило, він веганський, не містить глютену та молочних продуктів.

Монокальцій фосфат харчової якості використовується як кислотний компонент у розпушувачі; сорт корму як харчова добавка кальцію і фосфору для тварин і птиці; і як суперфосфатне добриво в сільському господарстві.

Монокальцій фосфат – це розпушувач, який зазвичай зустрічається в хлібобулочних виробках. Його мета – реагувати з харчовою содою, щоб забезпечити аерацію та об'єм, вивільняючи вуглекислий газ у присутності води. Застосування, наприклад, у хлібі, печивах, млинцях, борошні, що самостійно піднімається, розпушувачі одно- та подвійної дії.

Він загально визнаний як безпечний при використанні відповідно до належної виробничої практики може використовуватися як підсилювач тіста, зміцнювач, засіб для обробки борошна, розпушувач, допоміжний засіб для солоду або бродіння, поживна добавка, засіб для контролю рН, секвестрант, стабілізатор або загущувач у харчових продуктах [28].

Дикальцій фосфат (E341(ii)), також відомий як кальцій гідрогенфосфат, є неорганічною сполукою, яка широко застосовується в різних галузях промисловості завдяки своїм фізико-хімічним властивостям.

У харчовій промисловості E341(ii) використовується як харчова добавка та джерело кальцію і фосфору. Його додають до збагаченого борошна, кукурудзяного борошна, макаронних виробів, сніданків та інших зернових продуктів для підвищення їхньої поживної цінності. Крім того, дикальцій фосфат служить буферною речовиною в печиві, сухому молоці, морозиві та інших випічках, стабілізуючи кислотність і покращуючи текстуру продуктів. У безводній формі він виступає як антислежувач, запобігаючи злипанню порошкоподібних продуктів і зберігаючи їхню свіжість.

У фармацевтичній галузі E341(ii) застосовується як наповнювач у таблетках, забезпечуючи стабільність форми та полегшуючи процес виробництва. Також він використовується як джерело кальцію в дієтичних добавках.

У сфері особистої гігієни дикальцій фосфат використовується в зубних пастах як засіб для контролю утворення зубного каменю, а також як наповнювач і диспергент у косметичних засобах.

У сільському господарстві та тваринництві E341(ii) додається до кормів для тварин як джерело кальцію та фосфору, сприяючи здоровому росту та розвитку кісткової системи.

Таким чином, дикальцій фосфат (E341(ii)) є багатofункціональною сполукою, яка знаходить широке застосування в харчовій, фармацевтичній, косметичній та сільськогосподарській галузях [29].

Трикальцій фосфат (E341(iii)) – це неорганічна сполука, яка широко застосовується в різних галузях завдяки своїм фізико-хімічним властивостям. Він використовується як харчова добавка, косметичний інгредієнт та компонент у фармацевтичних препаратах.

У харчовій промисловості трикальцій фосфат служить антислежувачем, запобігаючи злипанню порошкоподібних продуктів, таких як сухе молоко, розчинні напої, вершкові замітники, кухонна сіль та спеції. Це забезпечує легкість у використанні та зберіганні таких продуктів.

Крім того, трикальцій фосфат є джерелом кальцію та фосфору, що робить його корисним для збагачення харчових продуктів, таких як злакові, йогурти та соки. Це особливо важливо для підтримки здоров'я кісток і зубів.

У косметичній промисловості трикальцій фосфат використовується як абразивна речовина в зубних пастах, допомагаючи видаляти зубний наліт та сприяючи ремінералізації емалі. Також він входить до складу дитячої присипки та інших косметичних засобів як антислежувач і маскувальний агент.

У фармацевтичній галузі трикальцій фосфат використовується як наповнювач у таблетках, забезпечуючи стабільність форми та полегшуючи процес виробництва. Його також використовують у складі харчових добавок для забезпечення організму необхідними мінералами.

Трикальцій фосфат (E341(iii)) є безпечним для використання в харчових продуктах, косметиці та фармацевтичних препаратах, коли його застосовують відповідно до встановлених норм і стандартів [30].

У 2023 році в журналі *Nanomaterials* було опубліковано дослідження, яке встановило, що комерційний трикальцій фосфат, позначений як E341(iii), насправді складається з гідроксиапатиту (НА) – форми кальцію, що природно зустрічається в кістковій тканині. Ці частинки мають нанометричні розміри та різноманітні форми, включаючи голкоподібні, стрижневі та псевдосферичні. У водному середовищі при нейтральному рН ці наночастинки утворюють агломерати, які осідають протягом кількох годин. Проте в кислому середовищі (рН < 5) вони поступово розчиняються, повністю зникаючи при рН 2. Це викликає питання щодо їхньої поведінки та можливого впливу в шлунково-кишковому тракті людини [31].

Також у 2019 році Європейське агентство з безпеки харчових продуктів (EFSA) провело переоцінку безпеки фосфатів, включаючи E341. Було встановлено, що ці сполуки мають низьку гостру токсичність при пероральному прийомі та не викликають генотоксичних або канцерогенних ефектів. Однак було зазначено, що в деяких випадках споживання фосфатів може перевищувати встановлений допустимий добовий рівень, особливо серед дітей та підлітків, що споживають продукти з високим вмістом фосфатів або харчові добавки [32].

Отож, харчова добавка E341 широко застосовується в харчовій промисловості завдяки своїм стабілізуючим, кислоторегулюючим, розпушувальним властивостям, а також здатності фіксувати колір. Ортофосфати кальцію входять до складу емульгуючих солей, які використовуються при виготовленні плавлених сирів. У продуктах на зразок сухого молока та вершків ця добавка виконує функцію антислежувача та речовини, що запобігає злипанню. Водночас, у згущеному молоці фосфати кальцію діють як антикристалізатор, а під час консервування фруктів та овочів – як ущільнювач рослинних тканин.

Найчастіше E341 використовують у виробництві хлібобулочних виробів, спеціалізованих напоїв (зокрема спортивного призначення), концентрованого та сухого молока, згущеного молока, морозива, м'ясних і рибних фаршів, алкогольних напоїв, чаїв (сухого та трав'яного), напівфабрикатів, сухих сніданків, швидкорозчинних продуктів, кондитерських виробів, розпушувачів для тіста, плавлених сирів, біологічно активних добавок, консервованих овочів і фруктів.

Окрім харчової промисловості, ортофосфати кальцію застосовуються також у виробництві мінеральних добрив і кормових добавок для тварин, а також як інгредієнт у зубних пастах і порошках. Їх використовують у виготовленні скла, кераміки та м'яких абразивних матеріалів [33].

1.3 Сировинна база для виробництва фосфату кальцію

Фосфат кальцію (харчова добавка E341) отримують шляхом хімічної взаємодії неорганічних джерел фосфору та кальцію. Основною сировиною для його виробництва є ортофосфорна кислота (H_3PO_4), яку промислово добувають шляхом обробки природних фосфатвмісних мінералів, таких як апатити або фосфорити, сірчаною кислотою. У результаті цієї реакції утворюється фосфорна кислота технічної або харчової чистоти, яка далі використовується як основа для синтезу різних форм фосфатів кальцію.

Джерелом кальцію у виробництві E341 зазвичай виступають сполуки кальцію, зокрема гашене вапно ($\text{Ca}(\text{OH})_2$), карбонат кальцію (CaCO_3) або оксид кальцію (CaO). Вибір кальцієвмісного компонента залежить від бажаної форми фосфату кальцію: для синтезу монокальцій фосфату використовують надлишок ортофосфорної кислоти, а для трикальцій фосфату — надлишок кальцію. Наприклад, при отриманні трикальцій фосфату реакція проходить за схемою: $2\text{H}_3\text{PO}_4 + 3\text{CaCO}_3 \rightarrow \text{Ca}_3(\text{PO}_4)_2 + 3\text{CO}_2 + 3\text{H}_2\text{O}$.

Фосфати кальцію (E341) синтезуються шляхом взаємодії ортофосфорної кислоти (H_3PO_4) з кальцієвмісними сполуками, такими як гашене вапно ($\text{Ca}(\text{OH})_2$), карбонат кальцію (CaCO_3), оксид кальцію (CaO) або хлорид кальцію (CaCl_2).

Ці реагенти переважно походять з мінеральних джерел, зокрема вапняку та фосфоритів, що робить їх придатними для використання у веганських продуктах [34].

Існують альтернативні джерела кальцію, наприклад, кальцій з відходів мушель моллюсків, які можуть бути використані для синтезу трикальцій фосфату (ТСП). Проте, в харчовій промисловості перевага надається мінеральним джерелам через їх стабільність, доступність та відповідність стандартам безпеки.

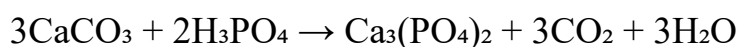
Залежно від співвідношення реагентів, можна отримати різні форми фосфатів кальцію:

Монокальцій фосфат (E341(i)): $\text{Ca}(\text{H}_2\text{PO}_4)_2$

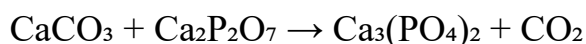
Дикальцій фосфат (E341(ii)): CaHPO_4

Трикальцій фосфат (E341(iii)): $\text{Ca}_3(\text{PO}_4)_2$

Наприклад, синтез трикальцій фосфату може бути здійснений за реакцією:



Або альтернативно:



Ці реакції проводяться у водному середовищі з контролем температури та рН для отримання продукту з бажаними властивостями [35].

Отримані фосфати кальцію використовуються в харчовій промисловості як антислежувачі, джерела кальцію та фосфору, а також у фармацевтичних препаратах і косметичних засобах. Вони відповідають вимогам безпеки та якості, встановленим міжнародними стандартами, такими як Codex Alimentarius та Регламент ЄС № 231/2012.

Якщо потрібно, я можу надати додаткову інформацію про специфікації кожної форми E341, їх застосування або вплив на здоров'я.

Виробництво фосфатів кальцію регламентується як на національному, так і на міжнародному рівні. Зокрема, в Україні діє ДСТУ 4534:2006, який визначає класифікацію та технічні вимоги до харчових добавок.

На міжнародному рівні безпеність і допустимі умови використання E341 регулюються Codex Alimentarius (FAO/WHO) та Регламентом ЄС № 231/2012. Європейське агентство з безпеки харчових продуктів (EFSA) у своїх публікаціях 2019 і 2023 років підтверджує, що при дотриманні встановлених норм фосфати кальцію, включаючи їх наноформи, є безпечними для здоров'я споживачів [36, 37].

Таблиця 1.1 – Технологічні основи отримання та використання ортофосфатів кальцію як харчової добавки E341

Сировина	Форма фосфату кальцію (E341)	Хімічне рівняння	Галузь застосування
Ортофосфорна кислота (H_3PO_4) + $CaCO_3$	Монокальцій фосфат (E341(i))	$H_3PO_4 + CaCO_3 \rightarrow Ca(H_2PO_4)_2 + CO_2 \uparrow$	Харчова промисловість: розпушувач, підкислювач; сільське господарство — добрива
Ортофосфорна кислота (H_3PO_4) + $Ca(OH)_2$	Дикальцій фосфат (E341(ii))	$H_3PO_4 + Ca(OH)_2 \rightarrow CaHPO_4 + 2H_2O$	Кормова добавка для тварин, фармацевтика (наповнювач у таблетках), харчова промисловість
Ортофосфорна кислота (H_3PO_4) + CaO (надлишок кальцію)	Трикальцій фосфат (E341(iii))	$2H_3PO_4 + 3CaO \rightarrow Ca_3(PO_4)_2 + 3H_2O$	Харчова промисловість: антислежувач, збагачення кальцієм; зубна паста, біодобавки

Подрібнені апатити або фосфорити + H ₂ SO ₄	Технічна H ₃ PO ₄ для подальшого синтезу	Ca ₅ (PO ₄) ₃ F + 5H ₂ SO ₄ → 3H ₃ PO ₄ + 5CaSO ₄ ↓ + HF	Джерело фосфорної кислоти для синтезу E341 усіх форм; промислова хімія, добрива
---	--	---	---

Виробництво харчових фосфатів є важливою складовою харчової промисловості, оскільки ці сполуки широко використовуються як добавки для покращення властивостей продуктів, таких як стабільність, текстура та збереження вологи. Основними сировинними джерелами для виробництва харчових фосфатів є природні мінерали та синтетичні хімічні сполуки. Розрізняються ці джерела за походженням, методами отримання та екологічними наслідками. Природні джерела фосфатів включають фосфатні мінерали, які видобуваються з надр Землі та обробляються для отримання фосфорної кислоти, що є основою для синтезу фосфатів. Синтетичні джерела, у свою чергу, отримуються в результаті хімічних процесів у лабораторних умовах, що дозволяє точніше контролювати склад і властивості кінцевого продукту. Порівняння природних та синтетичних джерел сировини для виробництва харчових фосфатів є важливим аспектом для розуміння якості кінцевих продуктів, екологічних та економічних аспектів, а також їх впливу на здоров'я людини та навколишнє середовище.

Природні джерела включають фосфатні мінерали, такі як апатит, які видобуваються з надр Землі. Ці мінерали обробляються в промислових умовах, де фосфорна кислота отримується шляхом реакції з сірчаною кислотою або через термічну обробку з використанням коксів. Отримана фосфорна кислота використовується для синтезу харчових фосфатів, таких як E338–341. Природні джерела мають переваги в тому, що вони вимагають меншої кількості обробки та зберігають природні властивості фосфатів.

Також вони менш схильні до шкідливих домішок, якщо сировина проходить належну очистку. Однак, видобуток та обробка мінералів може

бути енергоємним процесом, і це може мати негативний вплив на навколишнє середовище через екологічні наслідки, пов'язані з видобутком і утилізацією відходів.

Синтетичні джерела фосфатів включають хімічно синтезовані сполуки, які отримуються через хімічні реакції в лабораторних умовах. Вони використовуються в харчовій промисловості для покращення текстури, збереження вологи та стабільності продуктів. Перевагою синтетичних джерел є можливість точного контролю складу та властивостей фосфатів. Також вони дозволяють зменшити залежність від природних ресурсів. Однак синтетичні джерела можуть потребувати використання хімічних реагентів, що може бути шкідливим для здоров'я, а також вимагати додаткових етапів очищення та контролю якості.

Вибір між природними та синтетичними джерелами сировини залежить від вимог до якості продукту, економічних факторів та екологічних міркувань [38].

У сучасному виробництві харчової добавки E341 (фосфати кальцію) використовуються як природні, так і синтетичні джерела сировини. Природні джерела включають фосфорити та апатити, які добуваються з надр землі. Ці мінерали містять фосфор у формі, придатній для подальшої хімічної обробки.

Однак природні фосфорити можуть містити домішки важких металів, таких як кадмій, що потребує додаткових стадій очищення. До того ж, запаси високоякісних фосфатних руд обмежені, а їх видобуток має значний екологічний вплив [39].

Синтетичні джерела сировини передбачають використання вторинних ресурсів, зокрема відходів виробництва, таких як шлами, золи після спалювання осадів стічних вод, а також відходи хімічної промисловості.

Наприклад, дослідження показали, що відходи, утворені під час виробництва поліолів, можуть містити значну кількість фосфатів, придатних

для подальшого використання.

Використання таких вторинних ресурсів дозволяє зменшити залежність від природних джерел фосфору та сприяє зниженню екологічного навантаження [40].

Сучасні технології, такі як процеси EcoPhos та GetMoreP, дозволяють ефективно вилучати фосфор із низькоякісних фосфатних руд та вторинних матеріалів, забезпечуючи високу чистоту кінцевого продукту. Ці методи сприяють підвищенню ресурсоефективності та сталому розвитку фосфатної промисловості.

Таким чином, вибір між природними та синтетичними джерелами сировини для виробництва E341 залежить від доступності ресурсів, економічної доцільності та екологічних міркувань. Інтеграція вторинних ресурсів у виробничі процеси є перспективним напрямом для забезпечення сталого розвитку та зменшення екологічного впливу фосфатної промисловості.

Харчова добавка E341, що представлена фосфатами кальцію (мо-, ди- та трикальційфосфати), широко використовується в харчовій промисловості як регулятор кислотності, стабілізатор, антислежувальний агент та джерело кальцію. Для її виробництва застосовуються як природні, так і синтетичні джерела сировини, а також дедалі більше уваги приділяється можливості використання вторинних ресурсів, що відповідає сучасним вимогам сталого виробництва.

Природними джерелами для виробництва E341 є фосфатні мінерали, зокрема апатити та фосфорити, які видобуваються у великих обсягах у США, Китаї, Марокко, Казахстані та інших країнах. Також використовуються продукти тваринного походження, наприклад, оброблені кістки. Основною перевагою таких джерел є відносна дешевизна та доступність.

Проте вони можуть містити домішки важких металів або органічних залишків, що вимагає багатоетапної очистки та контролю якості, особливо для використання у харчовій промисловості [41]

Синтетичні джерела фосфатів кальцію одержують шляхом взаємодії очищеної ортофосфатної кислоти з вапняком (CaCO_3) або гашеним вапном ($\text{Ca}(\text{OH})_2$). Такий підхід забезпечує контрольований склад і високу чистоту кінцевого продукту, що є критично важливим для харчового застосування. Синтетичні фосфати також мають стабільніші властивості, кращу розчинність та дозволяють стандартизувати технологічні процеси, що особливо важливо для масового виробництва [42].

Останнім часом зростає інтерес до застосування вторинних ресурсів, зокрема, відходів від виробництва фосфорної кислоти, побічних продуктів переробки тваринної сировини та навіть фосфатовмісних стічних вод, як джерел сировини для виробництва харчових фосфатів. Такі підходи мають значний потенціал зменшити собівартість виробництва, знизити навантаження на природні ресурси та екологічний вплив. Проте для впровадження подібних рішень у харчову промисловість необхідні суворі регламенти очищення, стандартизації та перевірки безпечності продукту [39].

З економічної точки зору, ціни на природні фосфати, особливо на фоні геополітичної нестабільності та обмеженості родовищ, демонструють тенденцію до зростання. Водночас витрати на синтетичне виробництво фосфатів стають більш передбачуваними, особливо при наявності локального доступу до вапняку та ортофосфатної кислоти. Порівняльний аналіз вартості показує, що синтетичні джерела є вигіднішими у довгостроковій перспективі завдяки нижчим витратам на очищення та логістику [41, 42].

Таким чином, стан сировинної бази для виробництва E341 демонструє наявність кількох напрямків постачання – природного, синтетичного та вторинного.

Вибір джерела сировини залежить від конкретних економічних умов, доступності ресурсів, екологічних вимог та вимог до якості продукції. В умовах сучасної економіки найбільш перспективним є розвиток синтетичних та вторинних джерел як більш сталих і контрольованих.

В умовах зростаючого попиту на безпечні та якісні харчові добавки вітчизняне виробництво фосфату кальцію (E341) може стати перспективним напрямом розвитку хімічної та харчової промисловості України. Національні запаси фосфорвмісної сировини, зокрема апатитових і фосфоритних руд, а також відходів від виробництва мінеральних добрив і переробки органічних відходів, творять потенціал для формування власної сировинної бази. За даними геологічних досліджень, Україна має низку перспективних родовищ фосфоритів (Івано-Франківська, Рівненська та Кіровоградська області), які можуть слугувати джерелом для добування фосфатів у довгостроковій перспективі.

Ще одним важливим фактором є наявність розвиненої хімічної інфраструктури, зокрема підприємств, що спеціалізуються на виробництві мінеральних добрив, які потенційно можуть бути переорієнтовані або модернізовані для виготовлення харчових фосфатів. Крім того, у світлі глобальних тенденцій до циркулярної економіки та скорочення техногенного навантаження на довкілля, в Україні актуальним є питання утилізації вторинних ресурсів — зокрема, фосфогіпсу та інших побічних продуктів, які можуть бути використані як вторинна сировина для синтезу.

Економічні переваги локалізації виробництва харчової добавки E341 включають зменшення залежності від імпорту, скорочення витрат на логістику та забезпечення більшого контролю за якістю продукції відповідно до українських і європейських стандартів. Крім того, внутрішнє виробництво створює додаткові можливості для експорту, особливо з урахуванням зростання попиту на харчові фосфати в країнах ЄС, Близького Сходу та Північної Африки.

Однак для реалізації цього потенціалу необхідне вирішення низки проблем, зокрема вдосконалення нормативно-правової бази, стимулювання інвестицій у дослідження та інноваційні технології очищення, сертифікація продукту відповідно до міжнародних стандартів (наприклад, Codex

Alimentarius та ISO), а також кадрове забезпечення галузі.

Україна має реальні передумови для організації виробництва харчової добавки E341 на основі як природної, так і вторинної сировини. За належної підтримки з боку держави та приватного сектору цей напрям може стати стратегічно важливим для забезпечення продовольчої безпеки, розвитку промисловості та підвищення експортного потенціалу країни [42].

1.4 Аналіз існуючих технологій виробництва фосфату кальцію

Фосфат кальцію одержують із водних розчинів солей його компонентів, застосовуючи різні методи синтезу – твердофазний, осаджувальний, золь-гель, кріохімічний, розпилювально-сушильний або гідротермальний. Після первинного етапу утворення прекурсорів, матеріал піддається термічному обробленню (прожарюванню) для досягнення необхідних властивостей. Ще в 1966 році розпочалися наукові дослідження, присвячені дегідратації суперфосфатів і створенню конденсованих форм фосфатів кальцію з контрольованим ступенем розчинності в ґрунтах. Запропоновано технологію одержання дегідратованих фосфорних добрив, яка дозволяє значно підвищити ефективність розкладу фосфатної сировини та збільшити вміст поживних компонентів. Було досліджено склад, ступінь розчинності та гідролітичне розщеплення таких сполук, отриманих при низькотемпературній дегідратації одинарного та подвійного суперфосфатів. Ця методика була захищена авторським правом і успішно протестована на виробництві, зокрема на Одеському суперфосфатному заводі.

Залежно від обраного методу синтезу, кінцевий продукт може мати відмінну кристалічну структуру, морфологію, стехіометрію, а також різнитися фазовою стабільністю та розчинністю. Особливо перспективними є нанорозмірні фосфати кальцію, які демонструють значно вищу реакційну здатність порівняно з їхніми субмікронними чи мікронними аналогами.

Виробничий процес включає подрібнення кальційвмісної сировини, зокрема вапнякового каменю, його змішування з очищеною фосфорною кислотою, нагрітою до температури 80–85 °С, утворення напівпродукту,

подальше його витримання до стабілізації та закінчення дроблення

готового продукту. Технологічна лінія складається з послідовно розміщених елементів: приймального бункера, подрібнювача, бункера-накопичувача пилу, горизонтального змішувача з повітряним середовищем, бункера для витримки напівпродукту та подрібнювача кінцевого продукту. Такий підхід дає змогу знизити енергоспоживання під час виробництва трикальційфосфату та підвищити його концентрацію у готовому кормовому засобі.

У промислових умовах ортофосфат кальцію отримують шляхом взаємодії ортофосфатної кислоти з суспензією гідроксиду кальцію (гашеного вапна). Після реакції продукт піддається фільтрації, сушінню та подрібненню. Через наявність залишків вапна у складі кінцевий продукт за структурою наближений до гідроксифосфату $\text{Ca}_3(\text{OH})(\text{PO}_4)_2$. Співвідношення кальцію до фосфору (Ca:P) залежить від параметрів нейтралізації і може варіювати в межах від 1,3 до 2,0. Для отримання чистого ортофосфату кальцію зі співвідношенням 3:2 (тобто 1,5) необхідне додаткове кальцинування за температури близько 900 °C.

Альтернативний спосіб синтезу передбачає реакцію між солями кальцію (наприклад, хлоридом або нітратом кальцію) та гідрофосфатами у присутності аміаку, що також дозволяє отримати ортофосфат кальцію [41].

Для отримання фосфату кальцію використовують різноманітні методи синтезу, кожен з яких має свої особливості та призначення. Одним із таких способів є метод сумісного осадження, який дозволяє отримувати аморфний фосфат кальцію шляхом реакції між розчинами солей кальцію та магнію. Цей метод передбачає осадження фосфату кальцію при контрольованих умовах рН і температури, що дозволяє отримати матеріали з визначеними фізико-хімічними властивостями.

Іншим широко використовуваним методом є твердофазний синтез, який базується на механічному перемішуванні вихідних речовин та подальшому їх відпалі при високих температурах. Це дозволяє отримати кальцій-магній фосфат із заданими характеристиками, зокрема, при визначеному співвідношенні кальцію, магнію та фосфору в матеріалі. Метод

твердофазного синтезу є універсальним, однак потребує ретельного контролю температури та часу обробки для досягнення необхідної якості продукції.

Методи виробництва подвійного суперфосфату включають різні способи отримання фосфатів і їх обробку для отримання готового продукту. Подвійний суперфосфат містить 42-50% засвоєного P_2O_5 , з яких 37-42% знаходиться у водорозчинній формі, що вдвічі або втричі більше, ніж у простому суперфосфаті. Він має подібний вигляд і фазовий склад до простого суперфосфату, однак тверда фаза практично не містить сульфату кальцію, що є основним баластом у простому суперфосфаті.

Гігроскопічність подвійного суперфосфату залежить від вмісту вільної фосфорної кислоти та вологості продукту. Якщо вміст вільної кислоти складає 1,5-2,0% P_2O_5 , продукт можна висушувати до стабільної вологості 3-4%. Подвійний суперфосфат виготовляється у гранульованому вигляді, що дозволяє його добре розсіювати після нейтралізації вапняком або аміаком.

Основним компонентом, що входить до складу осаду, є двухводний дикальційфосфат ($CaHPO_4 \cdot 2H_2O$), який містить 46% засвоюваного P_2O_5 у цитратнорозчинній формі. Дикальційфосфат може існувати у вигляді безводної солі монетіта ($CaHPO_4$) і двухводного брушита ($CaHPO_4 \cdot 2H_2O$), причому брушит майже повністю розчиняється в цитратному розчині. В умовах виробництва брушит осаджується як метастабільна фаза при температурі 40-50 °С, а підвищення температури сприяє виділенню монетіту, що зменшує вміст цитратнорозчинного P_2O_5 .

Процес осадження полягає у нейтралізації фосфорної кислоти вапняком або вапняним молоком, що призводить до утворення монокальційфосфату, який з часом розкладається в дикальційфосфат. Розкладаючись, монокальційфосфат утворює осад дикальційфосфату, який у подальшому відокремлюється від розчину.

Різні методи осадження залежно від концентрації P_2O_5 в вихідних

<i>ННІХТ.ХТ-4-14.025.161.017.КР.ПЗ</i>	Інд. змін.	Дата видання 20.01.2025	Мова ua	Аркуш 30/76
--	------------	----------------------------	------------	----------------

розчинах, а також від типу осаджувача. При використанні вапняку або вапняного молока осадження йде з високою швидкістю. Вапняк є дешевшим матеріалом порівняно з вапном, але надлишок вапняку може призвести до втрати цитратнорозчинного P_2O_5 .

Для одержання осаду з фосфорних розчинів знижують вміст вапняку або застосовують вапно, щоб уникнути утворення непотрібних домішок. Осадження з соляними розчинами дає більш високий вихід продукту, а регенерація кислоти дозволяє повернути її до процесу, знижуючи витрати на кислоту сировину.

Виробництво осадження включає стадії отримання фосфорних розчинів і подальшого осадження дикальційфосфату. Відмінності у методах осадження залежать від концентрації P_2O_5 , виду осаджувача і бажаного призначення готового продукту [42].

РОЗДІЛ II ТЕХНОЛОГІЧНА ЧАСТИНА

У цьому розділі детально розглянуто усі аспекти виробництва фосфату кальцію, а саме розроблено та описано принципову та апаратурно-технологічну схему, виконано розрахунки матеріального балансу та економічної ефективності виробництва.

2.1 Характеристика вихідної сировини

Ортофосфорна (фосфорна або фосфатна) кислота є однією із найважливіших **кислот** в неорганічній хімії. Її молекулярна формула: H_3PO_4 . За своїми фізичними властивостями це – тверда, кристалічна речовина без кольору та смаку (рис.2.1). Вона добре розчинна у воді та інших рідинах. Фосфорна кислота середньої сили дії і проявляє всі властивості характерні для кислот. Також, вона є гарним електролітом. Зазвичай купити ортофосфору (фосфору) кислоту можна у вигляді 85% або 75% водного розчину. [43]



Рисунок. 2.1 – Ортофосфорна кислота

При нормальних умовах ортофосфатна кислота являє собою безбарвну й розпливчасту на повітрі кристалічну сполуку із температурою плавлення $42^{\circ}C$. У твердому стані й у розчині молекули ортофосфатної кислоти асоційовані за рахунок водневих зв'язків, і тому концентровані розчини мають високу в'язкість.

Відповідальна організація НУХТ, каф. ТЖХТ	Технічне узгодження Біла Г.М.	Вид документа Пояснювальна записка	Статус документа			
Власник документа НУХТ	Розробник документа Лавренчук А.С.	Назва, додаткова назва РОЗДІЛ II ТЕХНОЛОГІЧНА ЧАСТИНА	ННІХТ.ХТ-4- 14.025.161.026.КР.ПЗ			
	Документ затверджено Носенко Т.Т.		Інд. змін.	Дата видання 15.04.2025	Мова ua	Аркуш 32/76

Фосфатна кислота добре розчиняється у воді (до 80 % за масою). Її водні розчини – гарні електроліти (найвища електропровідність спостерігається тоді, коли концентрація кислоти становить 48 %).

На відміну від багатьох сполук фосфору, фосфатна кислота не отруйна. У воді розчиняється дуже добре й у водному розчині є кислотою середньої сили.

Основним споживачем ортофосфорної кислоти є виробництво фосфатних і комбінованих добрив.

Велику кількість H_2PO_4 використовує харчова промисловість. Справа в тому, що на смак розбавлена ортофосфорна кислота дуже приємна і невеликі добавки в мармелад, лимонади і сиропи помітно покращують їх смакові якості. Цю властивість також мають і деякі молі ортофосфорної кислоти. Наприклад, гідроортофосфати кальцію з давніх пір входять до складу хлібопекарських порошоків, покращуючи смак булочок і хліба.

Цікаві і інші шляхи використання ортофосфорної кислоти в промисловості. Наприклад, було помічено, що обробка деревини кислотою або її солями робити дерево негорючим. На цій основі зараз виготовляють вогнезахисті фарби, негорючі фосфодеревні плити, негорючий фосфатний пінопласт та інші будівельні матеріали[44].

Крейда – це природний мінерал, що займає близько 4 % складу земної кори (рис.2.2). До нього входять різні мікроелементи, але основа – це незмінно карбонат кальцію (91-98 %). Промисловість використовує крейду у роздробленому вигляді. Залежно від виробничого варіанту, бувають різні сорти та марки, що підходять для тих чи інших цілей. Якщо природна сировина видобувається в екологічно чистих місцях, обробляється винятково механічним способом і не містить шкідливих хімічних добавок, вона підходить для харчового вживання й для згодовування тваринам[45].



Рисунок. 2.2 – Крейда

Карбонат кальцію (CaCO_3), відомий також як "крейда", є природним неорганічним з'єднанням, яке широко використовується як харчовий барвник (харчова добавка E170). Ця сполука є стабільною, не потребує спеціальної обробки для збереження своїх властивостей і виконує кілька додаткових функцій, зокрема як регулятор кислотності, антислежувач (запобігає злипанню продуктів) і стабілізатор (підтримує рівномірний розподіл компонентів у продуктах).

Харчова добавка виготовляється шляхом очищення і переробки крейдяних відкладень, добутих із вапняку, мармуру або осадових шарів морських раковин. У харчовій промисловості використовується у формі білого кристалічного або аморфного порошку, що не має запаху і смаку, і є практично нерозчинним у воді та етанолі.

Основні характеристики крейди:

- Колір: білий.
- Форма: кристалічний або аморфний порошок.
- Запах і смак: відсутні.
- Розчинність: практично нерозчинний у воді й органічних розчинниках.

- Походження: природне, з вапняку, мармуру або морських відкладень.

2.2 Удосконалення технології виробництва фосфату кальцію

Запропонована раніше схема включала в себе використання крейди з масовою часткою 95%, тому було запропоновано обрати інше родовище крейди з масовою часткою 98%, задня отримання більш чистого продукту та покращеної якості отриманого фосфату кальцію

Колір крейди переважно білий. Вона містить значно менше домішок і м'якша за вапняк. Крейда зустрічається у багатьох місцях і утворює великі поклади. Родовища цієї гірської породи розробляють на Донбасі, у Придніпров'ї, Придністров'ї та в інших районах України.

При виборі родовища крейди було розглянуто багато варіантів та обрано Заруцьке крейдяне родовище (рис 2.3,2.4), яке знаходиться у десятці найбільших родовищ крейди в Україні. Крейдяні поклади характеризуються високою якістю крейди (частка карбонату кальцію становить від 97,64 до 99,00% і належить до класу «А»)[46].



Рисунок. 2.3 – Заруцьке родовище



Рисунок. 2.4 – Кар'єр

Заруцьке родовище територіально знаходиться в Сумській області, в Глухівському районі (рис.2.4).

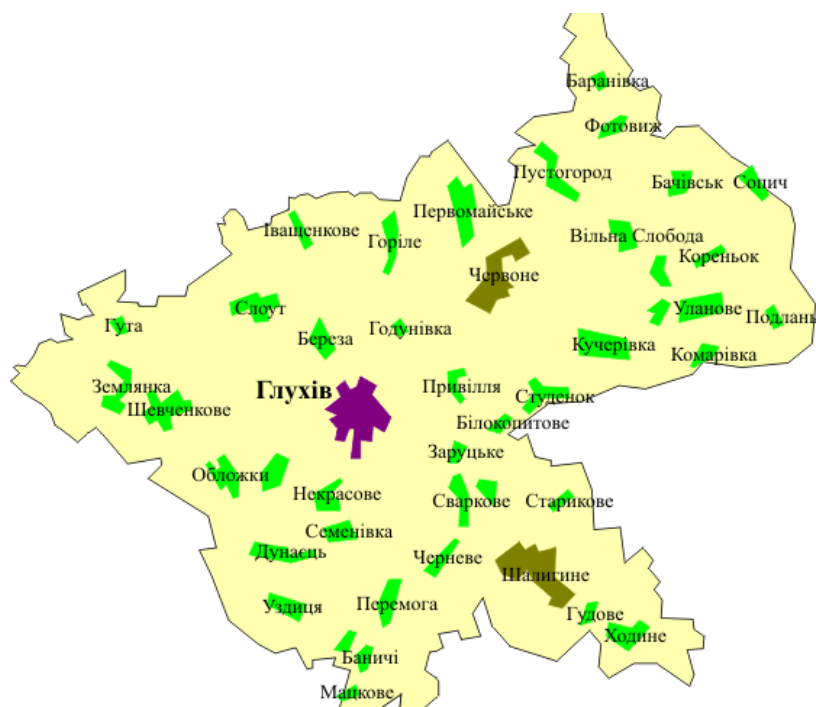


Рисунок. 2.5.– Карта Глухівського району

В таблиці 2.1 наведено порівняння якості та домішок крейди з Заруцького родовища та з Новгород-Сіверського родовища.

Таблиця 2.1 – Порівняльна таблиця якості українських родовищ крейди

Показник	Заруцьке родовище	Новгород-Сіверське родовище
CaCO₃ (карбонат кальцію)	97–99%	93–95%
SiO₂ (діоксид кремнію)	0.3–0.6%	1.5–2.5%
Al₂O₃ (оксид алюмінію)	0.1–0.3%	0.5–0.8%
Fe₂O₃ (оксид заліза)	0.05–0.2%	0.3–0.6%
MgCO₃ (карбонат магнію)	0.2–0.5%	1.0–1.3%
Волога	1.0–1.5%	1.5–2.0%
Колір	Білий, дуже світлий	Білий з сірим відтінком

Якість	Висока (дуже чиста крейда)	Середня (більше домішок)
---------------	----------------------------	--------------------------

2.3 Опис принципової технологічної схеми виробництва Фосфату кальцію E341

Технологія отримання фосфату кальцію E341 передбачає такі основні стадії:

1. **Нагрівання:** Першою стадією є нагрівання рідкої ортофосфорної кислоти до температури 80 °C для подальшого осадження
2. **Змішування:** На цьому етапі змішуються концентрована рідка ортофосфорна кислота та крейда з масовою часткою CaCO₃ 98%.
3. **Осадження:** Реакція відбувається при температурі 50–60 °C протягом 40–50 хвилин. У результаті взаємодії утворюється осад фосфату кальцію Ca₃(PO₄)₂ та виділяється вуглекислий газ
4. **Центрифугування:** Після завершення осадження утворений осад направляється на стадію центрифугування для механічного видалення надлишкової вологи. Центрифуга працює при частоті обертання 3000 об/хв, що забезпечує ефективне відокремлення твердої фази від рідкої.
5. **Сушіння:** Відцентрований осад надходить на сушіння при температурі 115 °C протягом 2 годин. Вологість продукту знижується з 18% до 4%
6. **Просіювання:** Висушений продукт направляється на просіювання для досягнення однорідності. Частинки, що не проходять через сито, можуть повертатися у виробничий цикл.
7. **Фасування:** Після просіювання сухий фосфат кальцію фасується у відповідну тару.

Готова продукція зберігається на складі або транспортується споживачам.

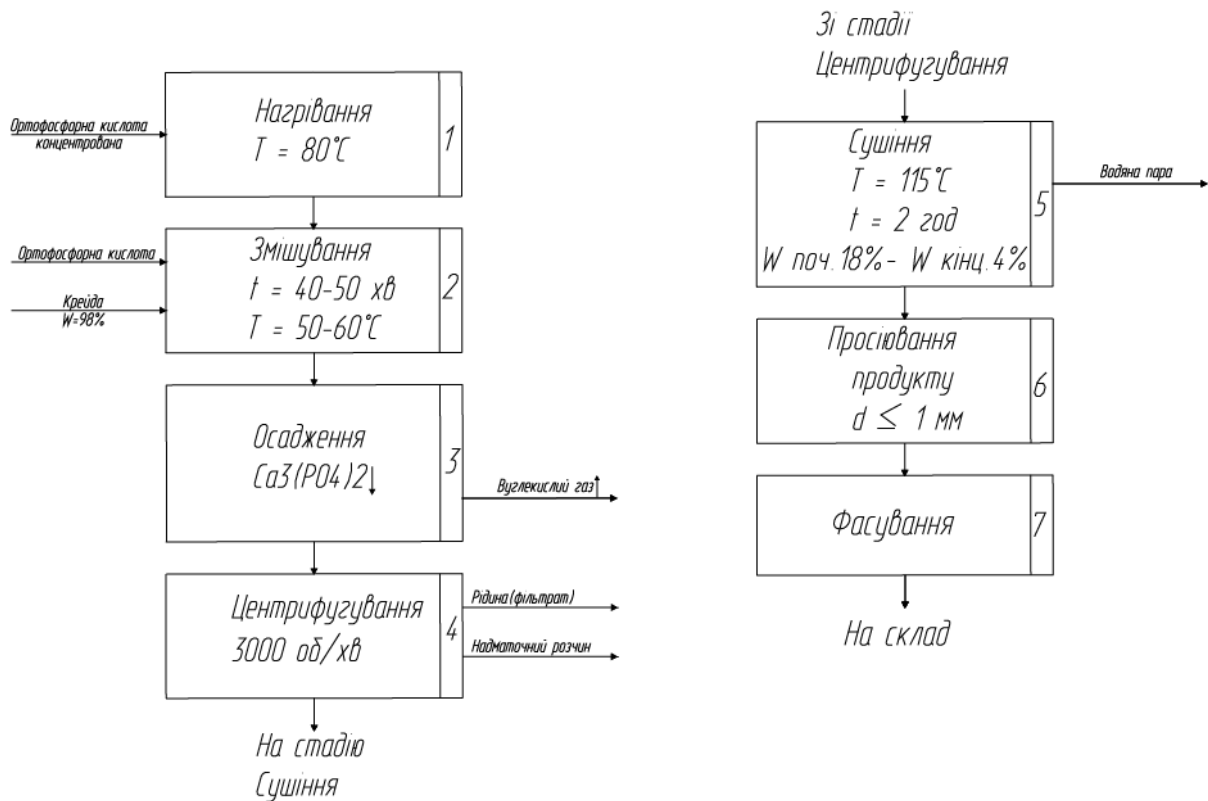
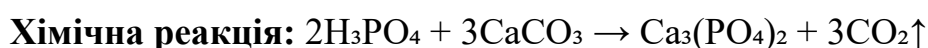


Рисунок. 2.5 - Принципова технологічна схема виробництва фосфату кальцію Е341

2.4 Розрахунок матеріального балансу відділення (цеху) виробництва фосфату кальцію Е341

Даний розрахунок проводиться на 1000 кг/добу готового фосфату кальцію. Для виробництва потрібно: фосфорна кислота, крейда(карбонат кальцію). Маса фосфорної кислоти складає 571,06 кг, крейди -- 601,56 кг.



Для розрахунку першої стадії змішування потрібно розрахувати молярну масу та кількість молів рециклу, щоб знайти масу, необхідну для розрахунку матеріального балансу стадії, враховуючи, що відношення молей рециклу до молей готового продукту складає 0,58:1

Розрахунки:

$$M(\text{рецикл}) = 136 \text{ г/моль} = 0,136 \text{ кг/моль}$$

$$M(\text{Фосфату кальцію}) = 172 \text{ г/моль} = 0,172 \text{ кг/моль}$$

$$n(\text{фосфату кальцію}) = m/M = 1000\text{кг}/0,172 \text{ кг/моль} = 5813,95 \text{ моль}$$

$$n(\text{рецикл}) = 5813,95 \text{ моль} \cdot 0,7 = 4069,77 \text{ моль}$$

$$m (\text{рецикл}) = n \cdot M = 4069,77 \text{ моль} \cdot 0,136 \text{ кг/моль} = 553,49 \text{ кг}$$

Для знаходження маси утворених продуктів необхідно брати до уваги, що до утвореної суміші складають: 80% -- кальцію фосфат, 15% -- вода, 5% -- вуглекислий газ:

$$m (\text{сум}) = 553,49 \text{ кг} + 601,56 \text{ кг} + 571,06 \text{ кг} = 1726,11 \text{ кг}$$

$$m (\text{фосфату кальцію}) = m (\text{сум}) \cdot 0,8 = 1726,11 \text{ кг} \cdot 0,8 = 1380,9 \text{ кг}$$

$$m (\text{води}) = m (\text{сум}) \cdot 0,15 = 1726,11 \text{ кг} \cdot 0,15 = 258,92 \text{ кг}$$

$$m (\text{вуглекислого газу}) = m (\text{сум}) \cdot 0,05 = 1726,11 \text{ кг} \cdot 0,05 = 86,29 \text{ кг}$$

Таблиця 2.2 -- Матеріальний баланс стадії змішування

Прихід		Витрата	
Речовина	Маса, кг	Речовина	Маса, кг
Фосфорна кислота	571,06	Суміш фосфату кальцію	1380,9
Крейда	601,56	Вода	258,92
Рецикл	553,49	Вуглекислий газ	86,29
Всього	1726,11	Всього	1726,11

На стадії центрифугування відбувається поділ суміші на осад фосфату кальцію та рідину. Врахуємо, що осад містить залишкову вологу 25%, а рідина містить розчинені речовини.

Таблиця 2.3 -- Матеріальний баланс стадії центрифугування

Прихід		Витрата	
Речовина	Маса, кг	Речовина	Маса, кг
Суміш фосфату кальцію	1380,9	Осад фосфату кальцію (вологий)	1140,75
Вода	258,92	- у т.ч. сухий фосфат кальцію	855,56

		- у т.ч. волога в осаді	285,19
		Рідина (фільтрат)	499,07
		- у т.ч. вода	234,73
		- у т.ч. розчинені речовини	264,34
Всього	1639,82	Всього	1639,82

На стадії осадження потрібно брати до уваги, що кальцію фосфат на 6% складається з монокальцій фосфату, 21% води, 10% домішок та гідрофосфату кальцію:

$$m(\text{фосфат монокальцію}) = 855,56 \text{ кг} \cdot 0,06 = 51,33 \text{ кг}$$

$$m(\text{домішки}) = 855,56 \text{ кг} \cdot 0,1 = 85,56 \text{ кг}$$

$$m(\text{води}) = 855,56 \text{ кг} \cdot 0,21 = 179,67 \text{ кг}$$

$$m(\text{гідрофосфат кальцію}) = 855,56 - 51,33 - 85,56 - 179,67 = 539,00 \text{ кг}$$

Таблиця 2.4 -- Матеріальний баланс стадії осадження

Прихід		Витрата	
Речовина	Маса, кг	Речовина	Маса, кг
Осад фосфату кальцію	855,56	Кальцію фосфат, в т.ч.:	855,56
Волога з осаду	285,19	- Монокальцій фосфат	51,33
		- Домішки	85,56
		- Гідрофосфат кальцію	539,00
		- Вода	179,67
		Випарена вода	285,19
Всього	1140,75	Всього	1140,75

При розрахунку стадії сушіння необхідно врахувати той факт, що залишкова волога в продукті становить 3%, а кальцію фосфат містить 18% води, а втрати складають 2%:

$$m(\text{фосфат монокальцію сухий}) = 51,33 \text{ кг} \cdot 0,82 = 42,09 \text{ кг}$$

$$m(\text{води з монофосфату}) = 51,33 \text{ кг} \cdot 0,18 = 9,24 \text{ кг}$$

Таблиця 2.5 -- Матеріальний баланс стадії сушіння

Прихід		Витрата	
Речовина	Маса, кг	Речовина	Маса, кг
Монокальцій фосфат, в т.ч.:	51,33	Вода, в т.ч.:	368,10
- чистий	42,09	- залишкова волога	9,24
- Вода	9,24	- Випарена вода	358,86
Домішки	85,56	Гідрофосфат кальцію	527,40
Вода з осадження	179,67	Чистий монофосфат кальцію	41,25
Вода випарена	285,19	Домішки	83,85
Гідрофосфат кальцію	539,00	Втрати	22,28
Всього	1149,75	Всього	1149,75

Таблиця 2.6 -- Матеріальний баланс стадії просіювання

Втрати на стадії просіювання становлять 0,5%.

Прихід		Витрата	
Речовина	Маса, кг	Речовина	Маса, кг
Гідрофосфат кальцію	522,13	Гідрофосфат кальцію	519,52
Чистий монофосфат кальцію	40,84	Чистий монофосфат кальцію	40,64
Домішки	83,01	Домішки	82,60
Залишкова волога	9,15	Залишкова волога	9,10
		Втрати	3,28
Всього	655,13	Всього	655,13

Таблиця 2.7 -- Зведений матеріальний баланс виробництва E341

Прихід		Витрата	
Речовина	Маса, кг	Речовина	Маса, кг
Ортофосфорна кислота	571,06	Гідрофосфат кальцію	519,52
Крейда	601,56	Чистий кальцію монофосфат	40,64
Рецикл	553,49	Вуглекислий газ	86,29
		Вода	644,76
		Домішки	82,60
		Рідина (фільтрат)	499,07
		Втрати	32,17
Всього	1726,11	Всього	1726,11

2.5 Підбір та опис основного технологічного обладнання

На основі складеного та розрахованого матеріального проведено підбір основного технологічного обладнання (таблиця 2.8) для кожної стадії виробництва фосфату кальцію E341.

Таблиця 2.8 Основне технологічне обладнання для виробництва фосфату кальцію.

Обладнання	Призначення	Кількість
Конвеєр	Транспортування сировини або готового продукту між різними вузлами виробництва	1
Фасувальний апарат	Автоматичне або напівавтоматичне фасування готового продукту в мішки, контейнери чи іншу тару перед відправкою на склад.	1
Пневматичний насос	Переміщення рідких за допомогою стисненого повітря або газу (перекачування ортофосфорної кислоти).	3
Просіювач	Розділення матеріалу за розміром частинок; виділення фракцій, що відповідають вимогам, та повернення ретурну на повторне	1

	подрібнення.									
Вентилятор	Забезпечення подачі повітря або відсмоктування парів/газів у сушильних установках, циклонах, сепараторах тощо.	1								
Розділювальна центрифуга	Відокремлення твердих і рідких фаз у суспензіях за допомогою відцентрової сили.	1								
Циклон	Очищення газів або повітря від твердих частинок за допомогою відцентрової сили. Наприклад, для відлову пилу після сушіння або подрібнення.	1								
Барабанна сушарка	Сушіння вологого матеріалу за допомогою обертання в барабані й подачі гарячого повітря або газів. Забезпечує рівномірне випаровування вологи.	1								
Кулачковий насос	Перекачування густих рідин руйнування їх структури.	3								
Стерилізатор	Змішування та осадження	1								
Дозатор	Точне відмірювання заданої кількості сировини або продукту, наприклад, для змішування чи фасування.	2								
Регулятор температури	Автоматичне підтримання необхідної температури в апаратах (наприклад, у сушарці чи стерилізаторі) шляхом керування подачею тепла.	1								
Ротаметр	Вимірювання витрати рідин або газів у трубопроводах. Використовується для контролю подачі повітря, пари, води тощо.	1								
Відцентровий насос	Перекачування великих об'ємів рідин (наприклад, ортофосфорної кислоти або води) за рахунок відцентрової сили.	2								
Збірник	Тимчасове накопичення продукту чи сировини перед наступним етапом обробки або фасуванням.	3								
<i>ННІХТ.ХТ-4-14.025.161.028.КР.ПЗ</i>		<table border="1"> <tr> <td>Инд. змін.</td> <td>Дата видання</td> <td>Мова</td> <td>Аркуш</td> </tr> <tr> <td></td> <td>15.04.2025</td> <td>ua</td> <td>43/76</td> </tr> </table>	Инд. змін.	Дата видання	Мова	Аркуш		15.04.2025	ua	43/76
Инд. змін.	Дата видання	Мова	Аркуш							
	15.04.2025	ua	43/76							



а



б



в

Рисунок. 2.6 – Насоси: а – відцентровий, б – гвинтовий, в – пневматичний

Принцип роботи барабанної сушарки (рис.2.7) заснований на принципі провідності, коли тепло передається від поверхні барабана до матеріалу, який сушиться.

Барабанна сушильна машина також використовує принцип масообміну, коли Волога передається від матеріалу до навколишнього повітря. Процес сушіння контролюється регулюванням температури, вологості та циркуляції повітря всередині барабана[47].



Рисунок. 2.7 – Барабанна сушарка

2.6 Опис апаратурно-технологічної схеми виробництва фосфату кальцію

На рисунку 2.8 наведена одна із можливих технологічних схем отримання фосфату кальцію.

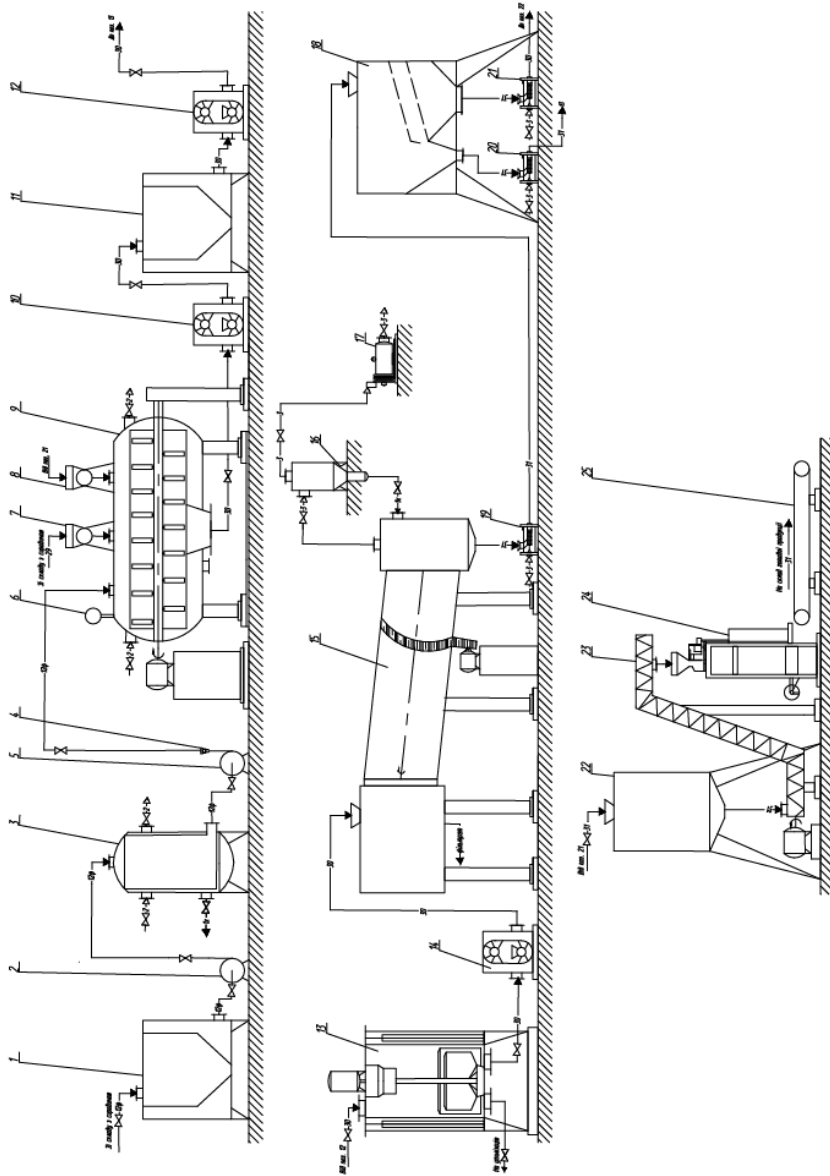


Рисунок. 2.8 – Апаратурно-технологічна схема виробництва фосфату кальцію

Рідка ортофосфорна кислота надходить у збірник 1, з якого за допомогою відцентрового насоса 2 транспортується до напірного бака 3. Подача кислоти контролюється за допомогою ротометра 4. Далі підігріта до температури 80 °С ортофосфорна кислота подається відцентровим насосом 5 у стерилізатор 9.

Одночасно в стерилізатор через дозатори **7** і **8** подається попередньо висушена і подрібнена крейда. У стерилізаторі відбувається змішування реагентів і проходить реакція утворення фосфату кальцію з виділенням вуглекислого газу. Для його безпечного відведення передбачена система газовідведення. Підтримання температурного режиму здійснюється подачею гарячої води в сорочку апарата, завдяки чому температура всередині стерилізатора тримається в межах 50–60 °С.

Отримана суспензія перекачується кулачковим насосом **10** у накопичувальний збірник **11**. З нього іншим кулачковим насосом **12** отримана суміш надходить до розділювальної центрифуги **13**, де відділяється тверда фаза (фосфат кальцію) від фільтрату. Твердий продукт направляється кулачковим насосом **14** в барабанну сушарку **15**, де висушується до необхідного рівня вологості. Повітря, що виходить із сушарки, проходить очищення в циклоні **16** та за допомогою вентилятора **17** може бути спрямоване на утилізацію або подальше використання.

Висушений продукт подається пневматичним насосом **19** у просіювач **18**.

Частинки, що перевищують допустимий розмір, повертаються на центрифугування, а фракція з необхідними характеристиками відправляється до збірника **22**.

На етапі фасування продукт потрапляє у збірник **22** який виконує роль проміжного накопичувача, далі продукт шнековим транспортером **23** відправляється до фасувального апарата **24**, де розфасовується у чотиришарові крафт-мішки по 25 кг . Після фасування готовий продукт транспортується на склад через конвеєр **25** для подальшого зберігання і реалізації.

2.7 Розрахунок барабанної сушильної установки

Вихідні дані:

1. Продуктивність сушарки по вологому матеріалу $G_1 = 150$ кг/год
2. Питома теплоємність абсолютно сухого матеріалу $c_{с.м.} = 2278$ Дж/(кг·К)
3. Вміст води в продукті:
 - початковий $w_1 = 18\%$
 - кінцевий $w_2 = 4\%$
4. Температура продукту, що надходить в сушильну камеру $\theta_1 = 60^\circ\text{C}$
5. Температура сухого продукту, що виходить із сушильної камери $\theta_2 = 50^\circ\text{C}$
6. Температура зовнішнього повітря $t_0 = 22^\circ\text{C}$
7. Температура повітря після калорифера $t_1 = 115^\circ\text{C}$
8. Температура відпрацьованого повітря $t_2 = 80^\circ\text{C}$
9. Відносна вологість свіжого повітря $f_0 = 65\%$
10. Напруження об'єму камери сушарки по волозі $A = 100$ кг/(м³·год)

1. Матеріальний розрахунок

1.1. Масова витрата видаленої води (W)

$$W = G_1 \cdot (w_1 - w_2)/(100 - w_2) = 150 \cdot (18 - 4)/(100 - 4) = 150 \cdot 14/96 = 21,875 \text{ кг/год} \\ = 0,00608 \text{ кг/с}$$

1.2. Продуктивність сушарки по сухому продукту (G_2)

$$G_2 = G_1 \cdot (100 - w_1)/(100 - w_2) = 150 \cdot (100 - 18)/(100 - 4) = 150 \cdot 82/96 = 128,125 \\ \text{кг/год} = 0,0356 \text{ кг/с}$$

1.3. Перевірка по витраті віддаленої води (W)

$$W = G_1 - G_2 = 150 - 128,125 = 21,875 \text{ кг/год} = 0,00608 \text{ кг/с} \checkmark$$

1.4. Визначення вологовмісту повітря за І-х діаграмою Рамзина

Використовуючи І-х діаграму для вологого повітря при заданих параметрах:

Початковий вологовміст повітря: $x_0 = 0,01$ кг/кг

Кінцевий вологовміст повітря: $x_1 = 0,022$ кг/кг

Початкова ентальпія: $I_0 = 22$ кДж/кг

Ентальпія після калорифера: $I_1 = 33$ кДж/кг

1.5. Теоретична питома витрата повітря

$$\ell_0 = 1/(x_1 - x_0) = 1/(0,022 - 0,01) = 83,33 \text{ кг/кг}$$

1.6. Теоретична абсолютна витрата повітря

$$L = \ell_0 \cdot W = 83,33 \cdot 0,00608 = 0,507 \text{ кг/с} = 1825 \text{ кг/год}$$

2. Тепловий розрахунок

2.1. Рівняння теплового балансу для сушильної камери

$$L \cdot I_1 + G_1 \cdot c_1 \cdot \theta_1 = L \cdot I_2 + G_2 \cdot c_2 \cdot \theta_2 + Q_{\text{п}}$$

2.2. Теплові втрати

$$Q_{\text{п}} = 0,05 \cdot L \cdot I_1 = 0,05 \cdot 0,507 \cdot 33 = 0,836 \text{ кВт}$$

2.3. Теплоємності для гідрофосфату кальцію

$$c_1 = 2473 \text{ Дж/(кг} \cdot \text{град)}$$

$$c_2 = 2278 \text{ Дж/(кг} \cdot \text{град)}$$

2.4. Розрахунок суми теплот

$$\begin{aligned} \sum Q &= G_2 \cdot c_2 \cdot \theta_2 - G_1 \cdot c_1 \cdot \theta_1 + Q_{\text{п}} \\ \sum Q &= 0,0356 \cdot 2,278 \cdot 50 - 0,0417 \cdot 2,473 \cdot 60 + 0,836 \\ &= 0,863 \text{ кВт} \end{aligned}$$

2.5. Теплова поправка

$$\Delta = \sum Q / W = 0,863 / 0,00608 = 141,94 \text{ кДж/кг}$$

2.6. Визначення I_2

$$I_2 = I_1 + \Delta/\ell_0 = 33 + (141,94/83,33) = 34,70 \text{ кДж/кг}$$

2.7. Коригування витрати повітря

За діаграмою Рамзіна знаходимо дійсний вологовміст повітря на виході: $x_2 = 0,025 \text{ кг/кг}$

$$\text{Дійсна питома витрата повітря: } \ell = 1/(x_2 - x_0) = 1/(0,025 - 0,01) = 66,67 \text{ кг/кг}$$

2.8. Дійсна абсолютна витрата повітря

$$L = \ell \cdot W = 66,67 \cdot 0,00608 = 0,405 \text{ кг/с} = 1458 \text{ кг/год}$$

3. Конструктивний розрахунок

3.1. Час сушіння продукту

$$\tau = 120 \cdot (\beta \cdot \rho_1/A) \cdot (w_1 - w_2)/(200 - (w_1 + w_2))$$

Де:

$$\beta = 0,2 \text{ (коефіцієнт заповнення для підйомно-лопатевої насадки)}$$

$$\rho_1 = 2473 \text{ кг/м}^3 \text{ (насіпна густина вологого матеріалу)}$$

$$\tau = 120 \cdot (0,2 \cdot 2473/100) \cdot (18 - 4)/(200 - (18 + 4)) = 39,25 \text{ хв}$$

3.2. Попередній об'єм сушильного барабана

$$V^6 = W/A = 21,875/100 = 0,219 \text{ м}^3$$

3.3. Визначення діаметра барабана

$$\text{Об'ємні витрати повітря: } V_c = L/\rho_v = 0,405/1,0022 = 0,404 \text{ м}^3/\text{с}$$

$$\text{Середня густина повітря: } \rho_v = 0,5 \cdot \rho_c \cdot (1/T_1 + 1/T_2) = 0,5 \cdot 370,5 \cdot (1/388 + 1/353) = 1,0022 \text{ кг/м}^3$$

З рівняння нерозривності при швидкості повітря $v_b = 0,75$ м/с: $D_b = \sqrt{(4 \cdot V_c / (\pi \cdot v_b \cdot (1 - \beta)))} = \sqrt{(4 \cdot 0,404 / (3,14 \cdot 0,75 \cdot 0,8))} = 0,83$ м

Приймаємо зі стандартного ряду: $D_b = 1000$ мм

3.4. Довжина барабана

При відношенні $L_b/D_b = 3,5$: $L_b = 3,5 \cdot D_b = 3,5 \cdot 1 = 3,5$ м

Приймаємо зі стандартного ряду: $L_b = 3500$ мм

3.5. Об'єм барабана

$V_b = \pi \cdot D_b^2 \cdot L_b / 4 = 3,14 \cdot 1^2 \cdot 3,5 / 4 = 2,75$ м³

3.6. Уточнення часу сушіння

Об'ємна маса вологого продукту: $V_{\text{вол}} = G_1 / (60 \cdot \rho_1) = 150 / (60 \cdot 2473) = 0,00101$ м³/хв

Уточнений час сушіння: $\tau = V_b \cdot \beta / V_{\text{вол}} = 2,75 \cdot 0,2 / 0,00101 = 545$ хв

4. Динамічний розрахунок

4.1. Число обертів барабана

$n = (m \cdot k \cdot L_b) / (\tau \cdot D_b \cdot \text{tg} \alpha)$

Де:

$m = 0,6$ (коефіцієнт типу насадки)

$k = 2,0$ (коефіцієнт характеру руху)

$\text{tg} \alpha = \text{tg} 5^\circ = 0,0875$

$n = (0,6 \cdot 2,0 \cdot 3,5) / (545 \cdot 1 \cdot 0,0875) = 0,088$ об/хв

4.2. Потужність для оберту барабана

$$N = 0,078 \cdot D^3 \cdot L \cdot \rho_n \cdot \sigma \cdot n$$

Де $\sigma = 0,035$ (коефіцієнт потужності)

$$N = 0,078 \cdot 1^3 \cdot 3,5 \cdot 2473 \cdot 0,035 \cdot 0,088 = 2,33 \text{ кВт}$$

4.3. Товщина стінки барабана

$$\delta = 0,008 \cdot D \cdot \rho = 0,008 \cdot 1 = 0,008 \text{ м} = 8 \text{ мм}$$

4.4. Розрахунок ваг

$$\text{Вага барабана: } G_b = \rho \cdot g \cdot \pi \cdot D \cdot L \cdot \delta = 7800 \cdot 9,81 \cdot 3,14 \cdot 1 \cdot 3,5 \cdot 0,008 = 6738 \text{ Н} = 0,674 \text{ т}$$

$$\text{Вага ізоляції: } G_{iz} = \rho_{iz} \cdot g \cdot \pi \cdot D \cdot L \cdot \delta_{iz} = 450 \cdot 9,81 \cdot 3,14 \cdot 1 \cdot 3,5 \cdot 0,035 = 2155 \text{ Н} = 0,215 \text{ т}$$

$$\text{Вага вологого матеріалу: } G_{вол} = 0,785 \cdot D \cdot \rho_1 \cdot g \cdot \pi \cdot L \cdot \beta' = 0,785 \cdot 1 \cdot 2473 \cdot 9,81 \cdot 3,14 \cdot 3,5 \cdot 0,25 = 52318 \text{ Н} = 5,232 \text{ т}$$

4.5. Сумарне навантаження

$$G = G_b + G_{iz} + G_{вол} = 6738 + 2155 + 52318 = 61211 \text{ Н}$$

4.6. Розрахунок на міцність

$$\text{Питоме навантаження: } q = G/L = 61211/3,5 = 17489 \text{ Н/м}$$

$$\text{Вигинальний момент від розподіленого навантаження: } M_1 = q \cdot L^2/8 = 17489 \cdot 3,5^2/8 = 26779 \text{ Н} \cdot \text{м}$$

$$\text{Вигинальний момент від зосередженого навантаження: } M_2 = G_{вен} \cdot L/4 = 1100 \cdot 3,5/4 = 962,5 \text{ Н} \cdot \text{м}$$

$$\text{Сумарний момент: } M_v = M_1 + M_2 = 26779 + 962,5 = 27741,5 \text{ Н} \cdot \text{м}$$

$$\text{Крутний момент: } M_{кр} = 0,5 \cdot f \cdot G \cdot D = 0,5 \cdot 0,15 \cdot 61211 \cdot 1 = 4591 \text{ Н} \cdot \text{м}$$

Розрахунковий момент: $M_{роз} = 0,35 \cdot M_B + 0,65 \cdot \sqrt{(M_B^2 + M_{кр}^2)} = 0,35 \cdot 27741,5 + 0,65 \cdot \sqrt{(27741,5^2 + 4591^2)} = 27809 \text{ Н} \cdot \text{м}$

Момент опору: $W = \pi \cdot D^2 \cdot \delta / 4 = 3,14 \cdot 1^2 \cdot 0,008 / 4 = 0,00628 \text{ м}^3$

Напруження: $\sigma = M_{роз} / W = 27809 / 0,00628 = 4,43 \text{ МПа}$

Перевірка міцності: $\sigma = 4,43 \text{ МПа} < [\sigma] = 736 \text{ МПа} \checkmark$ Умова міцності дотримана

5. Розрахунок калорифера

5.1. Теплове навантаження калорифера

$Q_k = L \cdot (I_2 - I_1) = 0,405 \cdot (34,70 - 33) = 0,689 \text{ кВт}$

5.2. Коефіцієнт теплопередачі

$K = 10 \cdot (\rho \cdot \nu_k)^{0,68} = 10 \cdot 5^{0,68} = 29,97 \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{К})$

5.3. Температура нагріваючої пари

$t_{п} = t_1 + 20 = 115 + 20 = 135^\circ\text{C}$

5.4. Різниці температур

$\Delta t_B = t_{п} - t_0 = 135 - 22 = 113^\circ\text{C}$ $\Delta t_M = t_{п} - t_1 = 135 - 115 = 20^\circ\text{C}$

5.5. Середня логарифмічна різниця температур

$\Delta t = (\Delta t_B - \Delta t_M) / (2,3 \cdot \lg(\Delta t_B / \Delta t_M)) = (113 - 20) / (2,3 \cdot \lg(113/20)) = 53,91^\circ\text{C}$

5.6. Площа теплопередачі калорифера

$F = Q \cdot 10^3 / (K \cdot \Delta t) = 0,689 \cdot 10^3 / (29,97 \cdot 53,91) = 0,426 \text{ м}^2$

6. Ізоляційний розрахунок

6.1. Критерій Грасгофа

$\beta = 1 / (273 + t_0) = 1 / (273 + 22) = 0,00339$ $\Delta t = t_2 - t_{пов} = 80 - 24 = 56^\circ\text{C}$

$Gr = (g \cdot H^3 \cdot \Delta t \cdot \beta) / \nu^2 = (9,81 \cdot 1^3 \cdot 56 \cdot 0,00339) / (15,2^2 \cdot 10^{-12}) = 80,6 \cdot 10^8$

6.2. Число Нуссельта

$$(Gr \cdot Pr) = 80,6 \cdot 10^8 \cdot 0,63 = 50,8 \cdot 10^8$$

$$Nu = 0,154 \cdot (Gr \cdot Pr)^{0,333} = 0,154 \cdot (50,8 \cdot 10^8)^{0,333} = 254,7$$

6.3. Коефіцієнт тепловіддачі

$$\alpha_k = Nu \cdot \lambda / H = 254,7 \cdot 0,026 / 1 = 6,62 \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{К}) \quad \alpha_p = 4,96 \cdot 0,86 = 4,27 \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{К}) \quad \alpha =$$

$$\alpha_k + \alpha_p = 6,62 + 4,27 = 10,89 \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{К})$$

6.4. Товщина ізоляції

$$\delta_2 = \lambda_2 \cdot (1/K - 1/\alpha_2 - \delta/\lambda_3) = 0,098 \cdot (1/3,08 - 1/10,89 - 0,008/0,233) = 0,0115 \text{ м} = 11,5 \text{ мм}$$

Приймаємо: $\delta_2 = 12 \text{ мм}$

7. Розрахунок тепловтрат

7.1. Ізольована бокова поверхня

$$F_{\text{бок}} = \pi \cdot D \cdot h = 3,14 \cdot 1 \cdot 3,5 = 10,99 \text{ м}^2$$

7.2. Втрати тепла з ізольованої поверхні

$$q = \alpha_2 \cdot (t_2 - t_{\text{пов}}) = 10,89 \cdot 56 = 609,84 \text{ Вт}/\text{м}^2 \quad Q_{\text{втр.із}} = q \cdot F = 609,84 \cdot 10,99 = 6702 \text{ Вт}$$

7.3. Втрати з неізольованої поверхні

$$\alpha_n = 9,74 + 0,07 \cdot \Delta t = 9,74 + 0,07 \cdot 56 = 13,66 \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{К}) \quad Q_{\text{втр.н}} = \alpha_n \cdot \pi/4 \cdot (2 \cdot D^2) \cdot (t_2 - t_{\text{пов}}) = 13,66 \cdot 3,14/4 \cdot 2 \cdot 1^2 \cdot 56 = 600,8 \text{ Вт}$$

7.4. Сумарні втрати

$$Q_{\text{втр}} = Q_{\text{втр.із}} + Q_{\text{втр.н}} = 6702 + 600,8 = 7302,8 \text{ Вт}$$

7.5. Відносні втрати

$$Q_{\text{від}} = Q_{\text{втр}}/Q = 7302,8/(0,689 \cdot 10^3) = 10,6\%$$

На рисунку 2.9 зображений загальний вигляд барабанної сушарки

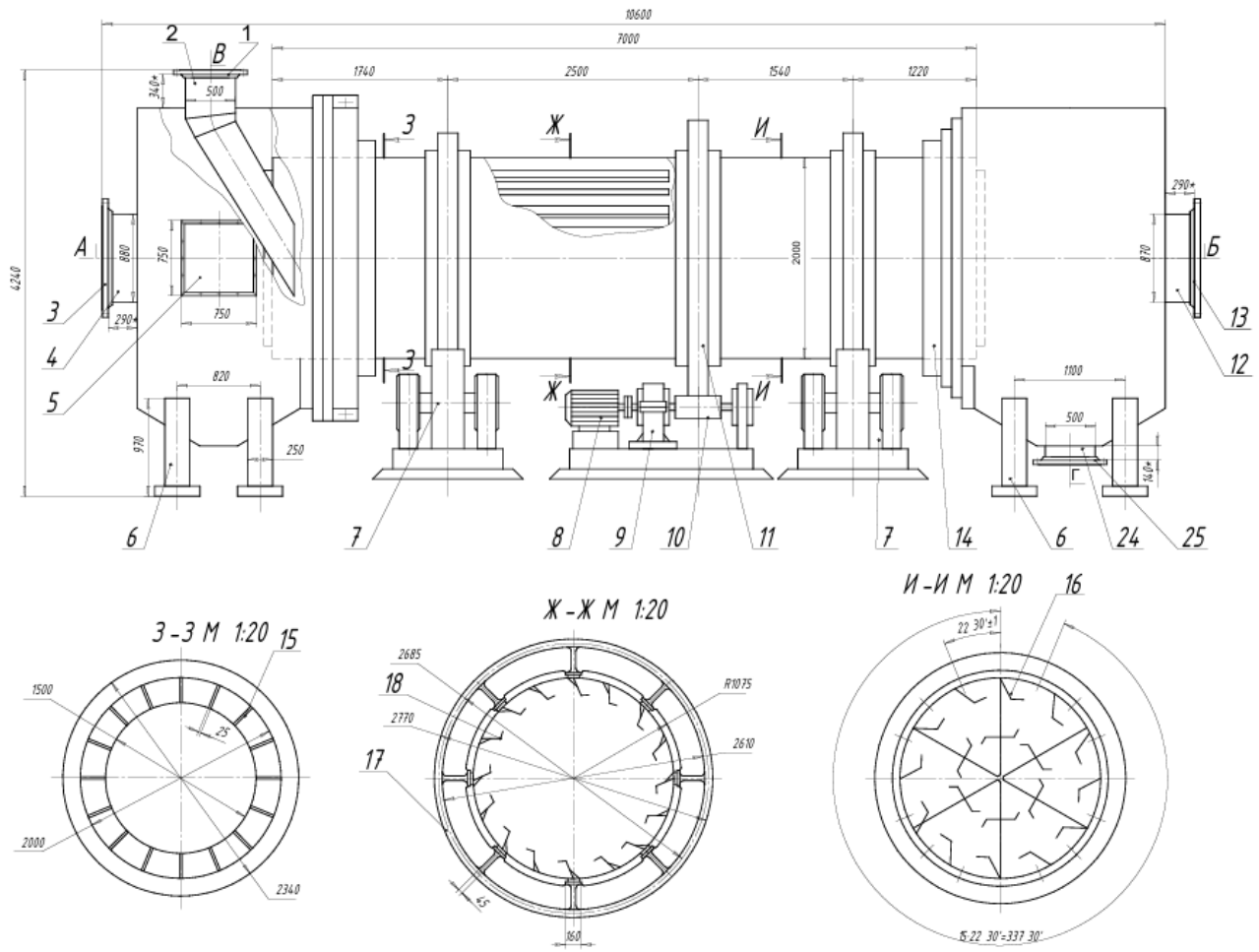


Рисунок 2.11 – Барабанна сушарка

РОЗДІЛ III ТЕХНІКО – ЕКОНОМІЧНЕ ОБГРУНТУВАННЯ
3.1 Собівартість готової продукції за сировиною та матеріалами

Вартість складових компонентів для виробництва речовин Е341

наведений у таблиці 3.1

Таблиця 3.1 – Сировина та основні матеріали для виробництва фосфату кальцію

Сировина та матеріали	Одиниці виміру	Норма витрат, кг	Ціна одиниці сировини, грн./кг	Сума, грн.
Фосфорна кислота	кг	571,06	100	57106
Крейда	кг	601,56	4,8	2887,5
Всього		1172,62		59993,5

Враховуючи транспортні та заготівельні витрати на сировину та основні матеріали, які становлять 5%, розрахуємо повну вартість сировини та матеріалів для матеріалів виробництва Е341:

$$59993,5 + 59993,5 \cdot 0,05 = 62993,18 \text{ грн.}$$

Продукт випускатиметься у мішках по 25 кг, тому на 1 т продукту припадає 40 одиниць.

Розрахуємо допоміжні та таро-пакувальні матеріали для виробництва фосфату кальцію, результати наведені у таблиці 3.2.

Таблиця 3.2- Допоміжні та таро-упаковувальні матеріали для виробництва фосфатів кальцію

Сировина та матеріали	Одиниця виміру	Норми витрат, на 1 т	Ціна одиниці сировини, грн.	Сума, грн.
Мішок поліпропіленовий (25 кг)	шт.	40	5	200
Нитка для зшивання мішка	шт.	1	25	25

Відповідальна організація НУХТ, каф. ТЖХТ	Технічне узгодження Біла Г.М.	Вид документа Пояснювальна записка	Статус документа			
Власник документа НУХТ	Розробник документа Лавренчук А.С.	Назва, додаткова назва РОЗДІЛ III ТЕХНІКО – ЕКОНОМІЧНЕ ОБГРУНТУВАННЯ	ННІХТ.ХТ-4- 14.025.161.054.КР.ПЗ			
	Документ затверджено Носенко Т.Т.		Інд. змін.	Дата видання 15.04.2025	Мова ua	Аркуш 55/76

Продовження таблиці 3.2

Етикетка	шт	40	0,3	12
Миючі засоби для миття обладнання	кг	6	55	330
Всього				567

Враховуючи транспортні витрати у розмірі 5%, визначимо повну вартість таро-пакувальних та допоміжних матеріалів:

$$567 + 567 \cdot 0,05 = 595,35 \text{ грн.}$$

3.2 Потужність виробництва та витрати на енергоресурси

Розрахунок необхідних енергоресурсів для виробництва кальцію фосфату наведений в таблиці 3.3.

Таблиця 3.3 – Калькуляція потреби в енергоресурсах

Енергоресурс	Одиниця вимірювання	Норма витрат	Ціна , грн.	Сума, грн.
Електроенергія	кВт	250	4,32	1080
Всього				1080

Розрахуємо річний обсяг виробництва фосфатів кальцію E341. Обладнання буде працюватиме у 1 зміну по 8 годин. За годину по технічним характеристикам устаткування виготовляється 800 кг продукції.

Добова потужність виробництва:

$$P_{\text{доб}} = P_{\text{г}} \cdot T_{\text{змін}} \cdot K_{\text{змін}} = 0,125 \cdot 8 \cdot 0,8 = 0,8 \text{ т}$$

Фактичний добовий обсяг виробництва:

$$P_{\text{факт}} = P_{\text{доб}} \cdot K_{\text{вик}} = 0,8 \cdot 0,8 = 0,64 \text{ т}$$

Тоді річний обсяг виробництва:

$$O = P_{\text{факт}} \cdot K_{\text{д.р.}} = 0,64 \cdot 365 = 233,6 \text{ т.}$$

3.3 Розрахунок штату та заробітної плати робітників

Посадові оклади для 2-5 тарифних розрядів становлять суми, які розраховується множенням ставки працівників 1-го тарифного ресурсу 23 грн/год на тарифний коефіцієнт. Для працівника 4-го ресурсу він складає 1,54, для II – 1,18.

Результати наведені у таблиці 3.4.

Таблиця 3.4 – Основна заробітна плата робітників.

Професія	Кількість людей на зміну	Тарифний розряд	Годинна тарифна ставка, грн.	Тривалість зміни, год.	Тарифний фонд ЗП, грн.
Головний інженер	1	4	35,42	8	103426,4
Хімік - технолог	1	4	35,42	8	103426,4
Укладальник – пакувальний	3	2	27,14	8	79248,8
Підсобний робітник	1	2	27,14	8	79248,8
Всього	6				365350,4
На 1т продукції					125,12

Витрати на утримання та обслуговування обладнання складає:

$$125,12 \cdot 2 = 250,24 \text{ грн/т}$$

Загальновиробничі витрати:

$$125,12 \cdot 3 = 375,36 \text{ грн/т}$$

Розраховуємо виробничу собівартість виробництва:

$$62993,18 + 595,35 + 1080 + 250,24 + 125,12 + 375,36 = 65419,25$$

грн/т.

Сума адміністративних витрат:

$$65419,25 \cdot 0,025 = 1635,5 \text{ грн}$$

Витрати на збут становлять:

$$65419,25 \cdot 0,03 = 1962,6 \text{ грн}$$

Операційні витрати становлять:

$$64419,25 \cdot 0,01 = 654,2 \text{ грн}$$

Отже повні витрати на виробництво 1 т Е341 становлять:

$$65419,25 + 1635,5 + 1962,6 + 654,2 = 69671,55 \text{ грн/т.}$$

Комунальні послуги від втрати електроенергії на роботу апаратів

Ціна на 1кВт за годину приймемо за постановою №480 від 29.04.2025 встановив для всіх жителів України єдину фіксовану ціну на електроенергію -4,32 грн/кВт·год незалежно від обсягу споживання.

Таблиця 3.5 – Комунальні послуги від втрати електроенергії на роботу апаратів

Назва апарату	Кількість використаної енергії – кВт за годину	Кількість використаної енергії, кВт увесь процес	Загальна вартість, грн.
Просіювач	4	12	52
Розділювальна центрифуга	15	45	180
Барабанна сушарка	32	256	1,102
Стерилізатор	18	72	305
Разом			1639

З урахуванням насосів приймаємо загалом 1500 грн.

Результати розрахунку відпускнуої ціни за одиницю готової продукції наведено у таблиці 3.6.

Отже, 1 т Е341 – це 40 одиниць продукції по 25 кг, тоді ціна за одиницю: $100327 / 25 = 4013$ грн.

Таблиця 3.6– Відпускна ціна фосфату кальцію

№	Показник	Сума, грн
1	Повні витрати, грн./т	69671,55
2	Рентабельність, %	20
3	Прибуток, грн./т	13934,3
4	Відпускна ціна без ПДВ	83605,9
5	ПДВ, 20%	16721,17
6	Відпускна ціна з ПДВ, грн.	100327,07

РОЗДІЛ IV ОРГАНІЗАЦІЯ КОНТРОЛЮ ЯКОСТІ ПРОДУКЦІЇ
 Визначення, ідентифікація, чистота фосфат кальцію згідно регламенту
 Комісії (ЄС) No 231/2012 від 9 березня 2012 року про встановлення
 специфікацій для харчових добавок показана в таблиці 4.1[48].

Таблиця 4.1 – Специфікація для фосфату кальцію

Синоніми	Двоосновний фосфат кальцію; ортофосфат дикальцію
Визначення	
Номер Eіnecс	231-826-1
Хімічна назва	Моногідрофосфат кальцію; гідроортофосфат кальцію; вторинний фосфат кальцію
Хімічна формула	Безводний: CaHPO_4 Дигідрат: $\text{CaHPO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$
Молекулярна маса	136,06 (безводний) 172,09 (дигідрат)
Вміст основної речовини	Після сушіння за температури 200 °С протягом трьох годин фосфат дикальцію містить не менше ніж 98 % та не більше ніж еквівалент 102 % CaHPO_4 Вміст P_2O_5 - 50,0 %-52,5 % у перерахунку на безводну речовину
Опис	Білі кристали або гранули, гранульований порошок або порошок

<i>Відповідальна організація</i> НУХТ, каф. ТЖХТ	<i>Технічне узгодження</i> Біла Г.М.	<i>Вид документа</i> Пояснювальна записка	<i>Статус документа</i>			
<i>Власник документа</i> НУХТ	<i>Розробник документа</i> Лавречнук А.С.	<i>Назва, додаткова назва</i> РОЗДІЛ IV ОРГАНІЗАЦІЯ КОНТРОЛЮ ЯКОСТІ ПРОДУКЦІЇ	<i>ННІХТ.ХТ-4-</i> <i>14.025.161.059.КР.ПЗ</i>			
	<i>Документ затверджено</i> Носенко Т.Т.		<i>Інд. змін.</i>	<i>Дата видання</i> 15.04.2025	<i>Мова</i> ua	<i>Аркуш</i> 60/76

Ідентифікація	
Проба на кальцій	Позитивна
Проба на фосфат	Позитивна
Розчинність	Помірно розчинний у воді. Нерозчинний в етанолі
Чистота	
Втрата при прожарюванні	Не більше ніж 8,5 % (безводний) або 26,5 % (дигідрат) після прожарювання за температури 800 °С ± 25 °С протягом 30 хвилин
Фторид	Не більше ніж 50 мг/кг (виражений як фтор)
Миш'як	Не більше ніж 1 мг/кг
Кадмій	Не більше ніж 1 мг/кг
Свинець	Не більше ніж 1 мг/кг
Ртуть	Не більше ніж 1 мг/кг
Алюміній	Не більше ніж 100 мг/кг для безводної форми та не більше ніж 80 мг/кг для дигідрованої форми (тільки за умови додавання до харчових продуктів для немовлят і дітей раннього віку). Не більше ніж 600 мг/кг для безводної форми та не більше ніж 500 мг/кг для дигідрованої форми (для всіх видів використання, окрім харчових продуктів для немовлят і дітей раннього віку). Застосовується до 31 березня 2015 року. Не більше ніж 200 мг/кг для безводної форми та дигідрованої форми (для всіх видів використання, окрім харчових продуктів для немовлят і дітей раннього віку). Застосовується з 1 квітня 2015 року.

Якість та безпека готової продукції при виробництві фосфату кальцію визначаються комплексом хімічних, фізико-хімічних, токсикологічних і мікробіологічних показників, які регламентуються міжнародними і національними стандартами, зокрема Codex Alimentarius (E341), ДСТУ EN

Показники вихідного контролю отриманої сировини:

- Масова частка основної речовини: Вміст фосфату кальцію
- Масова частка вологи: Повинна відповідати нормативним значенням (4%).
- Вміст фосфору (P) та кальцію (Ca): У відсотковому співвідношенні, оскільки це ключові поживні елементи або компоненти.
- Показник рН: Водної суспензії продукту.
- Розмір частинок (гранулометричний склад): Відповідність встановленим вимогам ($d \leq 1$ мм).
- Розчинність: У відповідних розчинниках (наприклад, у лимонній кислоті для кормових добавок).
- Наявність домішок: Контроль вмісту шкідливих елементів (важкі метали, фториди, миш'як, свинець, кадмій, ртуть) згідно з національними та міжнародними стандартами (наприклад, для харчових добавок E 341 або кормових добавок).
- Органолептичні показники: Зовнішній вигляд (порошок, гранули), колір (білий), запах (без запаху).
- Пакування та маркування: Перевірка відповідності пакування та маркування вимогам стандартів та нормативної документації.

Один із головних показників якості фосфату кальцію — це вміст фосфору у вигляді п'ятиоксиду фосфору (P_2O_5), який має становити не менше 18%. Також контролюється вміст кальцію (Ca), що повинен перебувати в межах від 23 до 40% залежно від форми фосфату (моно-, ди- чи трикальцієвий). Крім того, нормується вологість готового продукту — вона не повинна перевищувати 4%, а реакція середовища має бути нейтральною або слабколужною (рН у межах 6,5–7,5). Важливою характеристикою є також гранулометричний склад: розмір частинок готового продукту не повинен перевищувати 1 мм, що забезпечує його рівномірний розподіл у середовищі застосування (особливо це критично для харчової, фармацевтичної та кормової промисловості).

Щодо безпеки, першочергове значення має контроль вмісту токсичних елементів. У відповідності до міжнародних стандартів встановлено граничнодопустимі концентрації домішок: вміст свинцю не повинен перевищувати 30 мг/кг, кадмію — 1 мг/кг, миш'яку — 3 мг/кг, ртуті — 1 мг/кг, а фторидів — не більше 75 мг/кг. Продукт повинен також бути вільним від барію та інших токсичних сполук, або їхній вміст має бути мінімальним.

Для харчового та фармацевтичного використання фосфату кальцію обов'язковим є підтвердження відсутності радіоактивного забруднення, що особливо актуально при використанні природної сировини фосфатного походження.

Не менш важливими є мікробіологічні показники. У фосфаті кальцію, призначеному для харчової промисловості, мають бути відсутні патогенні мікроорганізми. Загальне мікробне число не повинно перевищувати 100 колонієутворюючих одиниць на грам продукту, а вміст дріжджів і пліснявих грибів — не більше 10 КУО/г.

Фізичні властивості також мають значення для споживчої безпеки: фосфат кальцію повинен мати однорідну структуру, бути сипучим, не утворювати грудок і мати білий або світло-сірий колір. Упакування продукції повинно забезпечувати захист від вологи, пилу і забруднень, а маркування має містити інформацію про виробника, номер партії, дату виробництва, склад, рекомендовані умови зберігання та гігієнічні вимоги до використання.

Таким чином, дотримання вимог до хімічного складу, рівня забруднювачів, мікробіологічної чистоти та фізичних властивостей гарантує високу якість і безпечність фосфату кальцію E341 для споживання людиною або використання в інших промислових галузях.

РОЗДІЛ V ЕКОЛОГІЧНА ЧАСТИНА ТА ОХОРОНА ПРАЦІ

5.1 Охорона праці на підприємстві

Організація охорони праці на підприємстві — це цілісна система прав, обов'язків та повноважень суб'єктів виробничого процесу, процедур, спрямованих на дотримання безпечного рівня виробництва, правил та нормативних вимог, які регулюють питання найманої праці.

Охорона праці на хімічних виробництвах є надзвичайно важливою, оскільки хімічні речовини можуть становити серйозну загрозу для здоров'я та життя працівників. Основні заходи включають в себе: впровадження безпечних технологічних процесів, використання засобів індивідуального захисту, контроль за станом повітряного середовища, навчання та інструктажі працівників, а також створення служби охорони праці

Виробництво фосфату кальцію (E341) включає кілька технологічних стадій, пов'язаних із використанням ортофосфорної кислоти, крейди, а також термічної обробки та механічної обробки твердих матеріалів. Основними шкідливими та небезпечними виробничими факторами є:

- вплив ортофосфорної кислоти, яка є агресивною хімічною речовиною;
- виділення вуглекислого газу при осадженні;
- високі температури на стадії сушіння;
- пил утворення при просіюванні та фасуванні.

Особливу увагу слід звернути на гігієнічні нормативи максимально допустимих концентрацій (ГДК) у повітрі робочої зони:

- ❖ ортофосфорна кислота – 1 мг/м³ (аерозоль) [49];
- ❖ кальцій карбонат (пил) – 6 мг/м³ (загальна фракція пилу) ;
- ❖ вуглекислий газ (CO₂) – 9000 мг/м³ (граничнодопустима концентрація)

Відповідальна організація НУХТ, каф. ТЖХТ	Технічне узгодження Біла Г.М	Вид документа Пояснювальна записка	Статус документа			
Власник документа НУХТ	Розробник документа Лавренчук А.С.	Назва, додаткова назва РОЗДІЛ IV ЕКОЛОГІЧНА ЧАСТИНА ТА ОХОРОНА ПРАЦІ	ННІХТ.ХТ-4- 14.025.161.059.КР.ПЗ			
	Документ затверджено Носенко Т.Т.		Інд. змін.	Дата видання 15.04.2025	Мова ua	Аркуш 64/76

У зонах змішування та осадження необхідно обладнати ефективну місцеву витяжну вентиляцію, яка забезпечує видалення парів кислоти та CO₂. У зонах сушіння рекомендовано застосовувати припливно-витяжну вентиляцію з рекуперацією тепла, щоб запобігти перегріванню повітря [50]

У процесі просіювання утворюється значна кількість пилу, що становить небезпеку для органів дихання. Необхідно впровадити систему аспірації та забезпечити працівників індивідуальними засобами захисту (ІЗЗ):

- респіратори класу FFP2 або аналогічні;
- захисні окуляри;
- комбінезони з антистатичного матеріалу.

Рівень шуму на обладнанні для подрібнення не повинен перевищувати 80 дБА. За необхідності використовуються шумоізолюючі кожухи та амортизуючі підкладки [51].

Електробезпека. Обладнання, що використовується для нагріву кислоти, сушіння та механічної обробки, повинно відповідати вимогам електробезпеки згідно з ДНАОП 0.00-1.21-98 [52]. У приміщеннях з високою вологістю (сушильне відділення) використовуються пристрої захисного відключення (ПЗВ) та заземлення всіх струмопровідних частин.

Пожежна безпека. Виробництво класифікується як пожежонебезпечне за категорією В (наявність пилу, високих температур, дерев'яної тари) [54]. Приміщення мають бути обладнані:

- порошковими вогнегасниками (ВП-5, ВП-9);
- системами пожежної сигналізації;
- пожежними кранами з рукавами;
- евакуаційним освітленням.

Шляхи евакуації повинні бути вільними, позначеними знаками безпеки відповідно до ДСТУ ISO 6309:2007.

Засоби індивідуального захисту та інструктаж. Згідно з НПАОП 0.00-4.12-05, працівники повинні проходити первинний, повторний та цільовий інструктаж.

Забезпечення ІЗЗ здійснюється згідно з Типовими галузевими нормами: кислототривкий фартух і рукавиці для роботи з ортофосфорною кислотою; респіратори для роботи на стадії подрібнення; захисне взуття та окуляри для всіх стадій.

Екологічна безпека. Основними потенційними забруднювачами довкілля є:

- викиди CO_2 в атмосферу;
- дрібнодисперсний пил;
- рідкі відходи від миття обладнання.

Для мінімізації впливу необхідно:

- очищати повітря за допомогою фільтрів;
- здійснювати утилізацію пилю як вторинної сировини;
- нейтралізувати стічні води перед скиданням.

Екологічна безпека має забезпечуватись згідно з Законом України «Про охорону навколишнього природного середовища» [55,56].

5.2 Екологічна безпека технології отримання фосфату кальцію

Виробництво фосфату кальцію, як і будь-яка інша промислова діяльність, має відповідати екологічним стандартам безпеки для захисту навколишнього середовища. Основні принципи включають мінімізацію утворення відходів, впровадження безпечних технологій, повторне використання та утилізацію відходів, а також контроль викидів та скидів.

Основними джерелами забруднення атмосферного повітря на виробництві фосфату кальцію з ортофосфорної кислоти та крейди є викиди вуглекислого газу (CO_2) та пилю.

Вуглекислий газ (CO_2) утворюється в процесі хімічної реакції між крейдою (CaCO_3) та ортофосфорною кислотою (H_3PO_4). Його виділення відбувається під час змішування реагентів та при подальших процесах осадження.

Основними точками надходження CO_2 в атмосферу є технологічне обладнання, де відбувається реакція та осадження.

Пилові викиди можуть утворюватися на стадіях подрібнення крейди (вихідний матеріал), просіювання готового продукту (фосфату кальцію), а також під час його сушіння та фасування.

Викиди вуглекислого газу (CO₂):

- **Природа утворення:** CO₂ утворюється в результаті хімічної реакції між крейдою (карбонатом кальцію, CaCO₃) та ортофосфорною кислотою (H₃PO₄). Ця реакція є ключовою для синтезу фосфату кальцію.

Точки виділення: Основне виділення CO₂ відбувається на стадії змішування крейди з ортофосфорною кислотою. Також, подальше виділення може тривати під час процесу осадження.

- **Вплив на довкілля:** Хоча CO₂ не є безпосередньо токсичним для людини у малих концентраціях, його значні викиди є основним фактором, що сприяє глобальному потеплінню та зміні клімату.

Пилові викиди:

- **Сушіння:** В процесі сушіння продукту при температурі 115°C, де вологість зменшується з 18% до 4%, частинки фосфату кальцію стають більш легкими та можуть легко підніматися в повітря.
- **Просіювання продукту:** На стадії просіювання, де готовий фосфат кальцію сортується за розміром (менше або рівне 1 мм), також можливе утворення пилу.
- **Фасування:** При фасуванні готового продукту для відправки на склад, відбувається пересипання матеріалу, що може спричинити утворення пилу.

Вплив на довкілля та здоров'я: Пилові викиди можуть осідати на навколишніх територіях, забруднюючи ґрунти та рослинність. Вдихання фосфатного пилу може негативно впливати на дихальну систему людини.

Викиди парів ортофосфорної кислоти:

- **Природа утворення:** Ортофосфорна кислота є відносно мало летючою, однак, її пари та аерозолі можуть утворюватися, особливо

при її нагріванні та інтенсивному перемішуванні з крейдою.

- **Точки виділення:** Можливі викиди на стадії нагрівання ортофосфорної кислоти до 80°C та при її змішуванні з крейдою при 50-60°C.
- **Вплив на довкілля та здоров'я:** Пари кислоти можуть спричиняти подразнення дихальних шляхів та слизових оболонок, а також сприяти кислотним дощам у разі значних викидів.

Для мінімізації впливу цих джерел забруднення на атмосферне повітря на підприємстві необхідно впроваджувати відповідні методи та засоби очищення газових викидів, такі як аспіраційні системи з фільтрами для вловлювання пилу та можливі абсорбційні установки для нейтралізації парів кислоти.

ВИСНОВКИ

1. Під час виконання роботи було проведено аналітичний огляд науково – технічної літератури, щодо фосфату кальцію. Вивчено основні відомості про фосфат кальцію, розглянуто фізико-хімічні властивості та сфери застосування.

2. Вивчено технологічну частину роботи, а саме надано характеристику сировини для отримання фосфату кальцію, а також розглянуто різні технології виробництва. В даній роботі для виробництва фосфату кальцію основною сировиною було обрано ортофосфорну кислоту та крейду Заруцького родовища з масовою часткою 98%.

3. Розроблено та удосконалено принципову та апаратурно-технологічну схеми отримання фосфату кальцію. Також був розрахований матеріальний баланс для даної технології та удосконалення технології.

4. Проведено економічний розрахунок собівартості кінцевого продукту та одержано, що 1 мішок на 25 кг фосфату кальцію має вартість 100327 грн., рентабельність виробництва становить 20%.

5. Розраховано барабанну сушарку з продуктивністю 150 кг/год. Розроблено креслення реактора та зазначено його технологічні характеристики.

6. Визначено систему управління якістю фосфату кальцію, що охоплює контроль вихідної сировини, масову частку вологи, наявність домішок та відповідність встановленим вимогам розміру.

7. Виявлено основні шкідники та небезпечні виробничі фактори, а саме, високі температури, виділення вуглекислого газу та утворений пил при просіюванні. Розроблено комплекс заходів з безпеки праці, вентиляції, забезпечення умов освітлення та шумозахисту і пожежної безпеки.

<i>Відповідальна організація</i> НУХТ, каф. ТЖХТ	<i>Технічне узгодження</i> Біла Г.М.	<i>Вид документа</i> Пояснювальна записка	<i>Статус документа</i>			
<i>Власник документа</i> НУХТ	<i>Розробник документа</i> Лавренчук А.С.	<i>Назва, додаткова назва</i> ВИСНОВКИ	<i>ННІХТ.ХТ-4- 14.025.161.077.КР.ПЗ</i>			
	<i>Документ затверджено</i> Носенко Т.Т.		<i>Інд. змін.</i>	<i>Дата видання</i> 15.04.2025	<i>Мова</i> ua	<i>Аркуш</i> 69/76

СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ

1. Codex Alimentarius. Class Names and the International Numbering System for Food Additives. 06.02.2007 .
2. E341 (Ортофосфати кальцію) [Електронний ресурс].- Режим доступу: <https://dukan-menu.com/supplement/e341.htm> (дата звернення 15.03.2025р.)
3. Ластухін О.Ю. Харчові добавки. Е-коди, будова, одержання, властивості м.Львів. 2009. 684-687 с.
4. Wang L., Nancollas G. H. Calcium Orthophosphates: Crystallization and Dissolution. *Chem Rev.*. 2008. Т. 108, вип. 11 : Author Manuscript.
5. Ортофосфат кальцію [Електронний ресурс].- Режим доступу: https://uk.wikipedia.org/wiki/%D0%9E%D1%80%D1%82%D0%BE%D1%84%D0%BE%D1%81%D1%84%D0%B0%D1%82_%D0%BA%D0%B0%D0%BB%D1%8C%D1%86%D1%96%D1%8E (дата звернення 15.03.2025р.)
6. Скурихін І. М., Нечаєв А. П. Все про їжу з точки зору хіміка. 1991. 288с.
7. Robert J. Whitehurst. Emulsifiers in Food Technology / Robert J. Whitehurst. – Northampton, UK: Blackwell PUBLISHING, 2004. – 261 с
8. Robert J. Whitehurst. Emulsifiers in Food Technology / Robert J. Whitehurst. – Northampton, UK: Blackwell PUBLISHING, 2004. – 261 с
9. Малезик І.Ф., Марценюк О.С., Мельник Л.М.. Процеси і апарати харчових виробництв. Курсове проектування. м. Київ. 2012. 543 с
10. Robert J. Whitehurst. Emulsifiers in Food Technology / Robert J. Whitehurst. – Northampton, UK: Blackwell PUBLISHING, 2004. – 261 с.
11. О.Г. Макаренко, І.В. Житнецький. Методичні рекомендації до складання матеріального та енергетичного балансу в хімічній технології для студентів напряму підготовки "Хімічна технологія" денної форми навчання. НУХТ, 2015.

Відповідальна організація НУХТ, каф. ТЖХТ	Технічне узгодження Бойчук Т.М.	Вид документа Пояснювальна записка	Статус документа			
Власник документа НУХТ	Розробник документа Марчук Д.А.	Назва, додаткова назва СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ	ННІХТ.ХТ-4- 14.025.161.078.КР.ПЗ			
	Документ затверджено Носенко Т.Т..		Інд. змін.	Дата видання 15.04.2025	Мова ца	Аркуш 70/76

12. І.М. Бойчик. Економіка підприємства. 2016. 378 с.
13. Elena Oranescu, Food Additives-necessity and risk, SemnE Publishing House, 2005, Bucharest.
14. COMMISSION REGULATION (EU) No 231/2012 of 9 March 2012 laying down specifications for food additives listed in Annexes II and III to Regulation (EC) No 1333/2008 of the European Parliament and of the Council
15. E341 (Calcium orthophosphates) - Ataman Kimya. *Ataman Kimya*. [Електронний ресурс].- Режим доступу: https://www.atamanchemicals.com/e341-calcium-orthophosphates_u27914/ (дата звернення: 06.04.2025).
16. Nikolenko, M., Vasilenko, K., & Dubenko, A. 2022. 10. RATIONAL SYNTHESIS CONDITIONS OF FOOD ADDITIVE E341 (II). *I Міжнародна науково-практична конференція*, 158.
17. E341iii Tricalcium phosphate [Електронний ресурс].- Режим доступу: <http://ingredio-ua.com/en/categories/regulatory-kislотноsti/e341iii-trikalcijfosfat> (дата звернення: 11.04.2025).
18. Aqueous Contact Ion Pairs of Phosphate Groups with Na⁺, Ca²⁺ and Mg²⁺- Structural Discrimination by Femtosecond Infrared Spectroscopy and Molecular Dynamics Simulations. [Електронний ресурс].- Режим доступу: <https://arxiv.org/abs/2003.03578> (дата звернення: 11.04.2025).
19. Non-linear dissolution mechanisms of sodium calcium phosphate glasses as a function of pH in various aqueous media. [Електронний ресурс].- Режим доступу: <https://arxiv.org/abs/2009.05765> (дата звернення: 11.04.2025).
20. Novel ion-doped mesoporous glasses for bone tissue engineering: Study of their structural characteristics influenced by the presence of phosphorous oxide. [Електронний ресурс].- Режим доступу: <https://arxiv.org/abs/2105.10222> (дата звернення: 11.04.2025).

21. Health Views Online. Know about natural preservative Calcium Phosphate E341: uses, side effects, facts [Електронний ресурс]. - Режим доступу: <https://healthviewsonline.com/about-food-preservative-calcium-phosphate-e341-uses-side-effects-facts/>(дата звернення: 15.04.2025).
22. Food Sweeteners. Applications and uses of tricalcium phosphate [Електронний ресурс]. - Режим доступу: <https://www.foodsweeteners.com/applications-and-uses-of-tricalcium-phosphate/> (дата звернення: 15.04.2025).
23. Sobezak-Kupiec, A., Malina, D., Worek, Z. The use of calcium phosphates in cosmetics; state of the art and future perspectives // ResearchGate, 2021 [Електронний ресурс]. - Режим доступу: https://www.researchgate.net/publication/355594745_The_Use_of_Calcium_Phosphates_in_Cosmetics_State_of_the_Art_and_Future_Perspectives (дата звернення: 15.04.2025).
24. What is Monocalcium Phosphate E341(i) in Food: Vegan, Uses, Safety, Side Effects. *FOODADDITIVES*. [Електронний ресурс]. - Режим доступу: <https://foodadditives.net/phosphates/monocalcium-phosphate/> (дата звернення: 15.04.2025).
25. Di Calcium Phosphate [E341(ii)]. [Електронний ресурс]. - Режим доступу: <https://www.ingredientsnetwork.com/di-calcium-phosphate-e341ii-prod1038145.html> (дата звернення: 15.04.2025).
26. What is Tricalcium Phosphate E341(iii) in Food: Uses, Safety, Side Effects. *FOODADDITIVES*. [Електронний ресурс]. - Режим доступу: <https://foodadditives.net/anticaking-agent/tricalcium-phosphate/> (дата звернення: 15.04.2025).
27. The True Nature of Tricalcium Phosphate Used as Food Additive (E341(iii)) - PubMed. *PubMed*. [Електронний ресурс]. - Режим доступу: <https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/37368253/> (дата звернення: 15.04.2025).

28. The True Nature of Tricalcium Phosphate Used as Food Additive (E341(iii)) Y. El Moussaoui та ін. *Nanomaterials*. 2023. Т.13, №12. С.1823. [Електронний ресурс]. - Режим доступу:<https://doi.org/10.3390/nano13121823> (дата звернення: 15.04.2025).
29. E341 - BScanner. *BScanner* - [Електронний ресурс]. - Режим доступу: <https://scanprice.com.ua/additives/e341?srsltid=AfmBOoqz5y9oc0SS3ZRglQrb9F1q3BMAKWqJgLaQSZN5jE84rbYR5mnG> (дата звернення: 15.04.2025).
30. Synthesis and Characterization of Tricalcium Phosphate as Food Additives Derived from Gastropod (*Murex* sp.) Shell Waste | Journal of Fisheries and Environment. *Thai Journals Online (ThaiJO)*. [Електронний ресурс]. - Режим доступу: <https://li01.tci-thaijo.org/index.php/JFE/article/view/262280> (дата звернення: 15.04.2025).
31. TRIBASIC CALCIUM PHOSPHATE - Ataman Кімуа. *Ataman Кімуа*. [Електронний ресурс]. - Режим доступу: https://www.atamanchemicals.com/tribasic-calcium-phosphate_u31957/ (дата звернення: 15.04.2025).
32. **Codex Alimentarius (FAO/WHO)** – *General Standard for Food Additives (GSFA)*
33. Contributors to Wikimedia projects. Phosphoric acid - Wikipedia. *Wikipedia, the free encyclopedia*.
34. The Possibility of Using Waste Phosphates from the Production of Polyols for Fertilizing Purposes - PubMed. *PubMed*. [Електронний ресурс]. - Режим доступу: <https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/36080400/> (дата звернення: 15.04.2025).
35. European Sustainable Phosphorus Platform - ESPP eNews no. 51 - February 2021. *European Sustainable Phosphorus Platform - Home*. [Електронний ресурс]. - Режим доступу: <https://www.phosphorusplatform.eu/scope-in-print/enews/2044-espp-enews-no-51-february-2021> (дата звернення: 15.04.2025).

36. Удосконалення технології виробництва добавки E341 ii. [Електронний ресурс]. - Режим доступу: <https://dspace.nuft.edu.ua/server/api/core/bitstreams/722cb7ae-bf2a-4dce-81ef-306caf768fa6/content> (дата звернення: 15.04.2025).
37. Zhou, M., Chen, J., Tang, Y., Wang, Y., & Zhang, J. (2021). *Natural phosphate sources and their impurities: A review*. *Journal of Environmental Chemical Engineering*, 9(2), 105156. [Електронний ресурс]. - Режим доступу: <https://doi.org/10.1016/j.jece.2020.105156> (дата звернення: 15.04.2025).
38. Rojas, S., Pereira, C., & Amaral, J. S. (2022). *Synthetic calcium phosphate production and food-grade applications: Advances and prospects*. *Food Chemistry*, 367, 130703. [Електронний ресурс]. - Режим доступу: <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2021.130703> (дата звернення: 15.04.2025).
39. Burgos-Aceves, M. A., Cohen-Rengifo, M., & Tzachor, A. (2023). *Recycling phosphorus for food security: Secondary sources and the circular economy*. *Sustainable Chemistry and Pharmacy*, 31, 101019. [Електронний ресурс]. - Режим доступу: <https://doi.org/10.1016/j.scp.2022.101019> (дата звернення: 15.04.2025).
40. Yang, Y., Li, D., Liu, J., & Song, C. (2021). *Economic and environmental assessment of phosphate production systems: A comparative approach*. *Resources, Conservation and Recycling*, 170, 105585. [Електронний ресурс]. - Режим доступу: <https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2021.105585> (дата звернення: 15.04.2025).
41. Kumar, S., & Shukla, A. (2022). *Cost analysis and sustainability of synthetic vs. natural phosphate sources in food additive production*. *Journal of Cleaner Production*, 338, 130488. [Електронний ресурс]. - Режим доступу: <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2022.130488> (дата звернення: 15.04.2025).

42. Prospects for Production and Consumption of Second Generation Biofuels in Ukraine / W. Romaniuk та ін. *Agricultural Engineering*. 2018. Т. 22, № 4. С. 71–79. [Електронний ресурс]. - Режим доступу: <https://doi.org/10.1515/agriceng-2018-0038> (дата звернення: 15.04.2025).
43. Ортофосфорна кислота [Електронний ресурс]. - Режим доступу: https://www.covalent.com.ua/shop/phosphoric_acid/ (дата звернення: 15.04.2025).
44. Властивості ортофосфорної кислоти [Електронний ресурс]. - Режим доступу: <https://disted.edu.vn.ua/courses/learn/241> (дата звернення: 15.04.2025).
45. Крейда кормова [Електронний ресурс]. - Режим доступу: <https://himtrans.com.ua/krejda-kormova/> (дата звернення: 15.04.2025).
46. ДОСЛІДЖЕННЯ КРЕЙДИ ЗАРУЦЬКОГО КРЕЙДЯНОГО РОДОВИЩА [Електронний ресурс].- Режим доступу: https://www.rusnauka.com/8_SNP_2016/Geographia/4_208612.doc.htm (дата звернення 14.05.2025р.)
47. Будова та принцип роботи барабанної сушарки [Електронний ресурс].- Режим доступу: <https://ua.star-drying.com/info/structure-and-principle-of-drum-dryer-93282994.html> (дата звернення 14.05.2025р.)
48. РЕГЛАМЕНТ КОМІСІЇ (ЄС) № 231/2012 [Електронний ресурс].- Режим доступу: https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/984_018-12#Text (дата звернення 14.05.2025р.)
49. Гігієнічні нормативи допустимих концентрацій хімічних речовин у повітрі робочої зони : Затв. наказом МОЗ України від 14.01.2020 № 52. – К. : МОЗ України, 2020. – 78 с.
50. ДБН В.2.5-67:2013. Опалення, вентиляція і кондиціонування : Будівельні норми України. – К. : Мінрегіон України, 2013. – 70 с.
51. ДСН 3.3.6.042-99. Гігієнічна класифікація праці за показниками шкідливості та небезпечності умов праці : Затв. МОЗ України 27.12.1999 № 42. – К. : МОЗ України, 1999. – 12 с.

52. ДСТУ EN 12464-1:2016. Світло та освітлення. Освітлення робочих місць. Частина 1. Робочі місця в приміщеннях. – К. : ДП «УкрНДНЦ», 2016. – 64 с.
53. ДСН 3.3.6.037-99. Санітарні норми виробничого шуму, ультразвуку та інфразвуку : Затв. МОЗ України 01.12.1999 № 37. – К. : МОЗ України, 1999. – 18 с.
54. ДНАОП 0.00-1.21-98. Правила безпечної експлуатації електроустановок споживачів : Затв. наказом Держнаглядохоронпраці України 09.01.98 № 4. – К. : Держнаглядохоронпраці, 1998. – 144 с.
55. ДБН В.1.1-7:2016. Пожежна безпека об'єктів будівництва. Загальні вимоги : Державні будівельні норми України. – К. : Мінрегіонбуд України, 2016. – 75 с.
56. Закон України «Про охорону навколишнього природного середовища» від 25 червня 1991 р. № 1264-XII // Відомості Верховної Ради УРСР. – 1991. – № 41. – Ст. 546.