

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

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

«До захисту в ЕК»

Директор інституту ННІХТ

_____ Оксана КОЧУБЕЙ-ЛИТВИНЕНКО
(підпис) (Ім'я, ПРІЗВИЩЕ)

«__» червня 2025 р.

«До захисту допущено»

Завідувач кафедри ТЖХТ

_____ Тамара НОСЕНКО
(підпис) (Ім'я, ПРІЗВИЩЕ)

«__» червня 2025 р.

**КВАЛІФІКАЦІЙНА РОБОТА
НА ЗДОБУТТЯ ОСВІТНЬОГО СТУПЕНЯ БАКАЛАВРА**

зі спеціальності 161 Хімічні технології та інженерія
(код та назва спеціальності)

освітньо-професійної програми Хімічна технологія
на тему: Удосконалення технології виробництва яблучної кислоти

Виконав: здобувач 4 курсу, групи ХТ-4-14
_____ СИНЧУК Станіслав Андрійович
(прізвище, ім'я та по батькові повністю) (підпис)

Керівник РОМАНОВА Олеся Олександрівна, к.х.н., доцент
(прізвище, ім'я та по батькові повністю) (підпис)

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

_____ (Ім'я ПРІЗВИЩЕ) (підпис)

_____ (Ім'я ПРІЗВИЩЕ) (підпис)

Рецензент Світлана КОВАЛЬОВА
(Ім'я ПРІЗВИЩЕ) (підпис)

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

Здобувач _____
(підпис)

Київ – 2025 р.

НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ ХАРЧОВИХ ТЕХНОЛОГІЙ

Інститут Навчально-науковий інститут харчових технологій

Кафедра технології жирів, хімічних технологій харчових добавок та косметичних засобів

Освітній ступінь бакалавр

Спеціальність 161 Хімічні технології та інженерія

(код і назва)

Освітньо-професійна програма Хімічна технологія

(назва)

ЗАТВЕРДЖУЮ

Завідувач кафедри ТЖХТ

Тамара НОСЕНКО

“ ” _____ 2025 року

ЗАВДАННЯ

НА КВАЛІФІКАЦІЙНУ РОБОТУ ЗДОБУВАЧА

Синчукка Станіслава Андрійовича

(прізвище, ім'я, по батькові)

1. Тема роботи Удосконалення технології виробництва яблучної кислоти

керівник роботи Романова Олеся Олександрівна,

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

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

2. Строк подання здобувачем роботи 01.06.2025 р.

3. Вихідні дані до роботи: продуктивність виробництва яблочної кислоти становить 1250 кг/добу

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

5. Перелік графічного матеріалу

Лист 1. Принципова-технологічна схема, формат аркушу А1

Лист 2. Апаратурно-технологічна схема, формат аркушу А1

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

6. Консультанти розділів роботи

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

7. Дата видачі завдання 15 квітня 2025 р.

КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

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

Здобувач

(підпис)

Станіслав СИНЧУК

(Ім'я ПРІЗВИЩЕ)

Керівник роботи

(підпис)

Олеся РОМАНОВА

(Ім'я ПРІЗВИЩЕ)

РЕФЕРАТ

Синчук С.А. Удосконалення технології виробництва пірофосфату натрію продуктивністю 1250 кг/добу.

ПОЯСНЮВАЛЬНА ЗАПИСКА: 79 С., 3 РИС., 29 ТАБЛ., 3 АРКУШІ ГРАФІЧНОГО МАТЕРІАЛУ, 26 ЛІТЕРАТУРНІ ДЖЕРЕЛА.

У кваліфікаційній роботі проведено літературний аналіз та узагальнено інформацію про технологію отримання яблучної кислоти E296.

Описано основні та додаткові сировинні матеріали для виробництва яблучної кислоти $C_4H_6O_5$.

Вивчено технологію виробництва яблучної кислоти та на базі отриманих даних розроблено принципovu і апаратурно-технологічну схему.

Проведений детальний опис розроблених схем.

Підібрано основне технологічне обладнання відповідно до виробничої лінії.

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

Запропоновано метод удосконалення технології виробництва цільового продукту E296.

КЛЮЧОВІ СЛОВА: E296, УДОСКОНАЛЕННЯ, ЯБЛУЧНА КИСЛОТА, ТЕХНОЛОГІЯ, ВИРОБНИЦТВО, ХАРЧОВА ДОБАВКА, ХАРЧОВІ ПРОДУКТИ, ОКИСЛЮВАЧ.

ABSTRACT

Synchuk S.A. Improvement of sodium pyrophosphate production technology with a capacity of 1250 kg/day.

EXPLANATORY NOTE: 79 P., 8 FIGS., 29 TABLES, 3 SHEETS OF GRAPHIC MATERIAL, 26 REFERENCES.

In the qualification work, the literature analysis was carried out and information on the technology of producing malic acid E296 was summarized.

The main and additional raw materials for the production of malic acid $C_4H_6O_5$ are described.

The technology of malic acid production has been studied and, based on the data obtained, a schematic and hardware-technological diagram has 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 material balance of the chemical-technological process is calculated, and a feasibility study of the proposed production method is provided.

A method for improving the production technology of the target product E296 is proposed.

KEYWORDS: E296, IMPROVEMENT, MALIC ACID, TECHNOLOGY, PRODUCTION, FOOD ADDITIVE, FOOD PRODUCTS, OXIDIZER.

ЗМІСТ

ВСТУП	7
РОЗДІЛ 1 АНАЛІТИЧНИЙ ОГЛЯД НАУКОВО-ТЕХНІЧНОЇ ЛІТЕРАТУРИ	10
1.1 Характеристика сировини	10
1.2 Галузі використання.....	17
1.3 Аналіз існуючих технологій виробництва.....	19
1.4 Зменшення затрат на виробництво як об'єкт удосконалення технології	24
1.5 Обґрунтування вибору технології	24
РОЗДІЛ 2 ТЕХНОЛОГІЧНА ЧАСТИНА.....	25
2.1 Характеристика вихідної сировини.....	255
2.2 Опис принципової технологічної схеми	26
2.3 Розрахунок матеріального балансу відділення (цеху).....	31
2.4 Підбір основного технологічного обладнання	39
2.5 Опис апаратурно-технологічної схеми	49
2.6 Розрахунок барабанної сушарки.....	52
РОЗДІЛ 3 ТЕХНІКО-ЕКОНОМІЧНЕ ОБґРУНТУВАННЯ	56
РОЗДІЛ 4 ОРГАНІЗАЦІЯ КОНТРОЛЮ ЯКОСТІ ПРОДУКЦІЇ	61
РОЗДІЛ 5 ЕКОЛОГІЧНА ЧАСТИНА	699
РОЗДІЛ 6 ОХОРОНА ПРАЦІ	72
ВИСНОВКИ.....	76
СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ	77

<i>Відповідальна організація</i> НУХТ, каф. ТЖХТ	<i>Технічне узгодження</i> Романова О.О.	<i>Вид документа</i> Пояснювальна записка	<i>Статус документа</i>			
НУХТ	<i>Розробник документа</i> Синчук С.А.	ЗМІСТ	<i>ННІХТ.ХТ-4-14.025.161.006.КР.ПЗ</i>			
	<i>Документ затверджено</i> Носенко Т.Т.		<i>Інд. змін.</i>	<i>Дата видання</i> 01.05.2025	<i>Мова</i> ua	<i>Аркуш</i> 6/79

ВСТУП

Харчові добавки широко використовуються у сучасному світі. Наразі неможливо уявити виробництво сучасних продуктів харчування без застосування харчових добавок. Кожен продукт на ринку містить принаймні декілька харчових добавок. Існує багато добавок, які належать до різних функціональних класів. Кожна добавка виконує свою певну функцію у рецептурі харчового продукту.

Серед широкого спектру харчових добавок особливе місце займають регулятори кислотності, які відіграють важливу роль у формуванні органолептичних властивостей продуктів та забезпеченні їх мікробіологічної стабільності. Однією з найпоширеніших і найбезпечніших добавок цієї групи є яблучна кислота (E296).

Яблучна кислота ($C_4H_6O_5$) являє собою безбарвні кристали, які добре розчиняються у воді і етиловому спирті та плавляться при температурі $100^{\circ}C$. Вперше яблучна кислота була отримана в 1785 році шведським хіміком Карлом Вільгельмом Шееле з незрілих яблук [1]. Ця двоосновна оксикислота має характерний кислий смак, а її солі називаються малатами.

Яблучна кислота широко поширена в природі і є одним з найважливіших проміжних продуктів обміну речовин у живих організмах. У природі яблучна кислота міститься в незрілих яблуках, винограді, барбарисі, малині, горобині, ревені і інших кислих рослинах [1]. Із загального вмісту кислоти в яблуці більше 90% становить саме яблучна кислота [2]. У вигляді малата, який утворюється в циклі трикарбонових кислот при глюконеогенезі, бере участь в обміні речовин [1].

У промисловості яблучну кислоту отримують різними способами. У промисловості добавку E 296 добувають шляхом гідратації малеїнової або фумарової кислот при температурі до $200^{\circ}C$ [1].

<i>Відповідальна організація</i> НУХТ, каф. ТЖХТ	<i>Технічне узгодження</i> Романова О.О.	<i>Вид документа</i> Пояснювальна записка	<i>Статус документа</i>			
<i>Власник документа</i> НУХТ	<i>Розробник документа</i> Синчук С.А.	<i>Назва, додаткова назва</i> ВСТУП	ННІХТ.ХТ-4-14.025.161.007.КР.ПЗ			
	<i>Документ затверджено</i> Носенко Т.Т.		<i>Інд. змін.</i>	<i>Дата видання</i> 01.05.2025	<i>Мова</i> ua	<i>Аркуш</i> 7/79

Альтернативним методом є біотехнологічне виробництво з використанням мікроорганізмів, що забезпечує отримання екологічно чистого продукту [2].

У харчовій промисловості добавку Е 296 використовують в якості регулятора кислотності, або як смакову добавку при виготовленні вин, кондитерських виробів і фруктових вод [1]. Основні сфери застосування включають виноробство для регулювання кислотності вин та покращення смакових характеристик, кондитерську промисловість у виробництві мармеладу, желе, пастили, морозива, виробництво напоїв у фруктових водах та напоях з фруктовим смаком, а також хлібопекарську промисловість як регулятор кислотності тіста [1,2].

Важливим аспектом використання будь-якої харчової добавки є питання її безпеки для здоров'я споживачів. Численні дослідження підтверджують безпечність яблучної кислоти для споживання людиною. Згідно з дослідженням, опублікованим у 2001 році в журналі International Journal of Toxicology, яблучна кислота виявилася відносно нетоксичною в дослідженнях гострої токсичності на тваринах. У хронічних дослідженнях на щурах годування яблучною кислотою призводило лише до незначних змін у наборі ваги та споживанні корму [3]. Експертна комісія з безпеки косметичних інгредієнтів переглянула безпеку яблучної кислоти в 2014 році і визнала її безпечною для використання [3].

Крім харчової промисловості, яблучна кислота знаходить застосування в медицині та косметології. Інші застосування яблучної кислоти: в медицині, для виробництва проносного і ліків від хрипоті; як один з компонентів косметичних препаратів [1]. У косметології вона використовується у засобах для пілінгу завдяки своїм відбілюючим і протизапальним властивостям [4].

Добавка Е 296 дозволена для застосування в харчовій промисловості України та РФ [1], а також у більшості країн світу, включаючи країни Європейського Союзу та США. Це свідчить про високий рівень безпеки даної добавки та її важливість для сучасної харчової промисловості.

Враховуючи широке застосування яблучної кислоти у харчовій промисловості, її природне походження та безпечність для здоров'я людини, актуальним є детальне вивчення властивостей цієї харчової добавки, методів її

отримання, технологічних аспектів застосування та впливу на якість готових продуктів. Це дозволить оптимізувати використання яблучної кислоти у виробництві харчових продуктів та забезпечити їх високу якість і безпеку для споживачів. становила групову допустиму добову норму споживання (ДДН) для фосфатів, виражену через Фосфор, у 40 мг/кг маси тіла людини на добу [3].

Предметом дослідження є яблучна кислота.

Об'єктом дослідження є технологія виробництва яблучної кислоти.

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

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

Завдання роботи:

1. Проаналізувати літературні джерела щодо виробництва яблучної кислоти $C_4H_6O_5$.
2. Аналіз можливих методів отримання яблучної кислоти, складання принципово-технологічної схеми.
3. Запропонувати метод удосконалення технології виробництва харчової добавки яблучної кислоти.
4. Розрахувати матеріальний баланс кожної стадії виробництва.
5. Розрахувати техніко-економічні показники.
6. Зробити підбір обладнання та розробити апаратурно-технологічну схему виробництва.

РОЗДІЛ 1 АНАЛІТИЧНИЙ ОГЛЯД НАУКОВО-ТЕХНІЧНОЇ ЛІТЕРАТУРИ

1.1 ХАРАКТЕРИСТИКА СИРОВИНИ

Характеристика основної сировини - малеїнового ангідриду

Малеїновий ангідрид ($C_4H_2O_3$) є основною сировиною для промислового виробництва яблучної кислоти [5,6]. Це безбарвна кристалічна речовина з характерним різким запахом, яка легко розчиняється у воді з утворенням малеїнової кислоти [7]. Молекула малеїнового ангідриду має планарну структуру з п'ятичленим циклом, що містить дві карбонільні групи та одну етерну групу.

Таблиця 1.1 – Фізико-хімічні властивості малеїнового ангідриду

Властивість	Значення
Молекулярна формула	$C_4H_2O_3$
Молярна маса	98,06 г/моль
Густина	1,59 г/см ³ (20°C)
Температура плавлення	52,8°C
Температура кипіння	202°C
Розчинність у воді	Гідролізується

Структурні особливості малеїнового ангідриду

Малеїновий ангідрид має унікальну молекулярну структуру, що визначає його високу реакційну здатність. Молекула містить:

- П'ятичленний ангідридний цикл з напруженими зв'язками
- Два електрофільні карбонільні центри

Відповідальна організація НУХТ, каф. ТЖХТ	Технічне узгодження Романова О.О.	Вид документа Пояснювальна записка	Статус документа			
Власник документа НУХТ	Розробник документа Синчук С.А.	Назва, додаткова назва	ННІХТ.ХТ-4-14.025.161.010.КР.ПЗ			
	Документ затверджено Носенко Т.Т.	РОЗДІЛ 1 АНАЛІТИЧНИЙ ОГЛЯД НАУКОВО- ТЕХНІЧНОЇ ЛІТЕРАТУРИ	Інд. змін.	Дата видання 01.05.2025	Мова ua	Аркуш 10/79

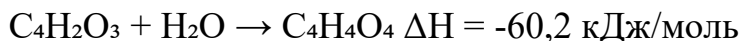
- Подвійний зв'язок C=C в α -положенні до карбонільних груп

Така структура обумовлює легкість розкриття циклу при взаємодії з нуклеофілами, зокрема з водою.

Хімічні властивості малеїнового ангідриду

Реакція гідролізу

Найважливішою реакцією для виробництва яблучної кислоти є гідроліз малеїнового ангідриду:



Гідроліз є екзотермічною реакцією, що потребує контролю температури для запобігання небажаним побічним процесам. Швидкість гідролізу залежить від температури, рН середовища та концентрації реагентів.

Кінетика гідролізу:

Реакція гідролізу описується кінетичним рівнянням першого порядку:

$$r = k_1[\text{МА}][\text{H}_2\text{O}] - k_2[\text{МАС}]$$

де: r - швидкість реакції, k_1 та k_2 - константи швидкості прямої та зворотної реакцій, $[\text{МА}]$ - концентрація малеїнового ангідриду, $[\text{МАС}]$ - концентрація малеїнової кислоти.

Таблиця 1.2 – Кінетичні параметри гідролізу малеїнового ангідриду

Температура, °С	k_1 , л/(моль·с)	k_2 , с ⁻¹	Час півперетворення, хв	Константа рівноваги
20	0,15	0,001	4,6	150
40	0,45	0,003	1,5	150
60	1,20	0,008	0,6	150
80	2,80	0,018	0,25	156
100	6,20	0,038	0,11	163

Побічні реакції

При високих температурах можливі наступні побічні процеси:

- Полімеризація малеїнового ангідриду
- Утворення сукцинового ангідриду

- Розкладання з виділенням CO₂

Промислове виробництво малеїнового ангідриду

Малеїновий ангідрид промислово виробляється методом парофазного окислення н-бутану або бензолу киснем повітря при високих температурах [8,9]. Основною є технологія окислення н-бутану, яка становить понад 90% світового виробництва.

Виробництво з н-бутану

Окислення н-бутану до малеїнового ангідриду відбувається згідно з реакцією:



Процес проводиться при температурі 400-450°C та тиску 1,5-2,5 атм у псевдозрідженому шарі каталізатора. Теоретичний вихід малеїнового ангідриду становить 1,225 кг на 1 кг н-бутану, однак практичний вихід через побічні реакції складає 0,95-1,05 кг/кг.

Таблиця 1.3 – Технологічні параметри виробництва малеїнового ангідриду

Параметр	Значення	Одиниці виміру
Температура реакції	400-450	°C
Тиск	1,5-2,5	атм
Час контакту	2-4	с
Концентрація н-бутану	1,5-2,0	об.%
Селективність	65-75	%
Конверсія н-бутану	95-98	%
Вихід МА	60-70	%
Продуктивність	0,8-1,2	кг/(м ³ ·год)

Побічні продукти окислення

При окисленні н-бутану утворюються наступні побічні продукти:

- CO та CO₂ (20-25% від маси продуктів)
- Оцтова кислота (3-5%)
- Формальдегід та ацетальдегід (2-3%)

- Водяна пара (значна кількість)

Транспортування та зберігання малеїнового ангідриду

Умови зберігання

- Температура: 15-25°C
- Відносна вологість: <50%
- Захист від світла та вологи
- Герметичне упакування
- Термін зберігання: 12 місяців

Упакування

- Мішки з поліетилену з вкладишами: 25 кг
- Барабани сталеві: 200 кг
- Контейнери: 1000 кг
- Спеціальні герметичні контейнери для морських перевезень

Безпека при поводженні

Малеїновий ангідрид належить до речовин 3 класу небезпеки:

- Подразнювальна дія на шкіру та слизові
- Необхідність використання засобів індивідуального захисту
- Заборона контакту з водою під час зберігання
- Вентиляція робочих приміщень

Утворення малеїнової кислоти

Процес гідролізу малеїнового ангідриду

Малеїнова кислота ($C_4H_4O_4$) є проміжним продуктом у синтезі яблучної кислоти. В промисловості малеїнова кислота отримується гідролізом малеїнового ангідриду [10].

Таблиця 1.4 – Властивості малеїнової кислоти

Властивість	Значення	Методика
Молекулярна формула	C ₄ H ₄ O ₄	-
Молярна маса	116,07 г/моль	Розрахункова
Температура плавлення	130-131°C	DSC
Температура розкладу	>150°C	TGA
Розчинність у воді	788 г/л (25°C)	Гравіметрія
Розчинність в етанолі	392 г/л (25°C)	Гравіметрія
Коефіцієнт дифузії у воді	1,2×10 ⁻⁹ м ² /с	НМР
Теплоємність	1,85 кДж/(кг·К)	Калориметрія

Стереохімія малеїнової кислоти

Малеїнова кислота існує у цис-конфігурації, що робить її менш стабільною порівняно з транс-ізомером (фумаровою кислотою). Ця особливість структури впливає на реакційну здатність при подальшій гідратації до яблучної кислоти.

Порівняння ізомерів:

- Малеїнова кислота (цис): менш стабільна, більш розчинна
- Фумарова кислота (транс): більш стабільна, менш розчинна

Термодинамічний аналіз гідролізу

Таблиця 1.5 – Термодинамічні параметри гідролізу

Температура, К	ΔH, кДж/моль	ΔG, кДж/моль	ΔS, Дж/(моль·К)	Keq
298	-60,2	-45,8	-48,3	3,2×10 ⁸
323	-59,8	-44,2	-48,3	1,8×10 ⁸
348	-59,4	-42,6	-48,3	1,1×10 ⁸
373	-59,0	-41,0	-48,3	6,8×10 ⁷

Характеристика цільового продукту - яблучної кислоти

Загальна характеристика яблучної кислоти

Яблучна кислота (гідроксибутандіова кислота, $\text{HOOCCH}(\text{OH})\text{CH}_2\text{COOH}$) виробляється гідратацією fumarової або maleїнової кислоти [11]. Це природна органічна кислота, що міститься в зелених яблуках та інших незрілих фруктах [12]. Молекула яблучної кислоти містить хіральний центр, що призводить до існування двох енантіомерів: L-яблучної кислоти (природна форма) та D-яблучної кислоти.

Таблиця 1.6 – Фізико-хімічні властивості яблучної кислоти

Властивість	Значення	Методика визначення
Молекулярна формула	$\text{C}_4\text{H}_6\text{O}_5$	-
Молярна маса	134,09 г/моль	Розрахункова
Густина	1,595 г/см ³	Пікнометрія
Температура плавлення	100°C (L-форма), 101°C (DL-суміш)	DSC
Температура розкладу	140°C	TGA
Розчинність у воді	558 г/л (20°C)	Гравіметрія
Розчинність в етанолі	189 г/л (20°C)	Гравіметрія
pKa ₁	3,40	Потенціометрія
pKa ₂	5,11	Потенціометрія
Показник заломлення	1,4451 (20°C)	Рефрактометрія
В'язкість 50% розчину	3,2 сП (20°C)	Віскозиметрія
Теплоємність	1,67 кДж/(кг·К)	Калориметрія

Сtereoхімічні властивості

У 2004 році яблучна кислота була визначена як один з потенційних ключових будівельних блоків для біоекономіки [13]. В даний час більшість яблучної кислоти виробляється хімічним синтезом з maleїнового ангідриду, що призводить до утворення рацемічної dl-яблучної кислоти [14].

Таблиця 1.7 – Порівняння енантіомерів яблучної кислоти

Властивість	L-яблучна кислота	D-яблучна кислота	DL-яблучна кислота
Температура плавлення	100°C	100°C	101°C
Розчинність у воді	558 г/л	558 г/л	558 г/л
Біологічна активність	Висока	Низька	Середня
Смакові властивості	Кисла, гладка	Гірка	Проміжна
Ціна, \$/кг	8-12	8-12	2-3

Термічна стабільність

Яблучна кислота має обмежену термічну стабільність. При нагріванні вище 140°C відбувається дегідратація з утворенням fumarової та maleїнової кислот:



Якісні характеристики яблучної кислоти

Таблиця 1.8 – Стандарти якості яблучної кислоти

Показник	Харчова якість	Фармацевтична якість	Технічна якість
Чистота, %	≥99,5	≥99,8	≥98,0
Вміст важких металів, мг/кг	≤10	≤5	≤50
Залишкова вологість, %	≤0,5	≤0,2	≤1,0
pH 0,1 М розчину	2,1-2,3	2,1-2,3	2,0-2,5
Сульфатна зола, %	≤0,05	≤0,02	≤0,1
Мікробіологічна чистота	Відповідає	Стерильна	-
Оптична густина (420 нм)	≤0,02	≤0,01	≤0,05
Хлориди (як Cl), мг/кг	≤50	≤10	≤100

1.2 Галузі використання яблучної кислоти

Яблучна кислота має широкий спектр застосування в різних галузях промисловості [15]. Світовий ринок яблучної кислоти оцінюється в 230 млн доларів США (2023 рік) з прогнозованим щорічним зростанням 5,2%.

Харчова промисловість

Харчова промисловість споживає близько 65% світового виробництва яблучної кислоти:

Основні застосування:

- Підкислювач та ароматизатор у напоях та кондитерських виробках
- Консервант та антиоксидант
- Регулятор кислотності у фруктових продуктах
- Покращувач смаку у низькокалорійних продуктах
- Буферний агент у молочних продуктах
- Хелатуючий агент для запобігання окисленню

Таблиця 1.9 – Використання яблучної кислоти в харчовій промисловості

Продукт	Концентрація, %	Функція	Регулювання
Газовані напої	0,05-0,15	Підкислювач, ароматизатор	E296
Фруктові соки	0,1-0,4	Регулятор кислотності	E296
Кондитерські вироби	0,2-0,8	Смакова добавка	E296
Молочні продукти	0,05-0,2	Консервант	E296
Хлібобулочні вироби	0,1-0,3	Покращувач тіста	E296
Желейні продукти	0,3-0,6	Гелеутворювач	E296
Вина	0,1-0,5	Регулятор кислотності	Дозволено

Фармацевтична промисловість

Фармацевтична галузь споживає 20% світового виробництва:

- Буферний агент у лікарських препаратах
- Хелатуєчий агент для підвищення біодоступності
- Компонент дієтичних добавок
- Розчинник для активних фармацевтичних інгредієнтів
- Стабілізатор у рідких лікарських формах
- Компонент пролонгованих лікарських форм

Таблиця 1.10 – Застосування в фармацевтиці

Лікарська форма	Концентрація, %	Призначення	Фармакопея
Таблетки	0,5-2,0	Дезінтегрант, буфер	USP, Ph.Eur
Сиропи	0,1-0,5	pH-регулятор	USP
Ін'єкційні розчини	0,05-0,2	Буферний агент	USP, Ph.Eur
Мазі та креми	0,2-1,0	Стабілізатор	Ph.Eur
Дієтичні добавки	5-20	Активний інгредієнт	FDA

Косметична промисловість

Косметична галузь споживає 10% світового виробництва:

- pH-регулятор у косметичних засобах
- Ексфоліант у засобах для догляду за шкірою
- Антиоксидант у антивікових кремах
- Зволожувач у кремах та лосьйонах
- Консервант у натуральній косметиці

Промислове використання

Решта 5% використовується в технічних цілях:

- Виробництво полімерів та смол
- Металообробка (травлення, пасивація)
- Текстильна промисловість (протрава)
- Очищення та детергенти

Таблиця 1.11 – Регіональний розподіл споживання яблучної кислоти (2023 р.)

Регіон	Споживання, тис. тонн	Частка ринку, %	Основні галузі
Північна Америка	18,5	28	Харчова, фармацевтична
Європа	16,2	25	Харчова, косметична
Азіатсько-Тихоокеанський	24,8	38	Харчова, промислова
Латинська Америка	3,9	6	Харчова
Інші регіони	1,9	3	Технічна

1.3 Аналіз існуючих технологій виробництва

Хімічний синтез з малеїнового ангідриду

Загальний процес гідратації передбачає поєднання малеїнової кислоти, яка може бути додана у формі ангідриду з подальшою гідратацією *in situ*, з водою та нагрівання для досягнення бажаної гідратації [16].

Технологічний процес включає наступні основні стадії:

1. Гідроліз малеїнового ангідриду: $C_4H_2O_3 + H_2O \rightarrow C_4H_4O_4$ $\Delta H = -60,2$ кДж/моль

2. Каталітична гідратація малеїнової кислоти: $C_4H_4O_4 + H_2O \rightarrow C_4H_6O_5$ $\Delta H = -23,8$ кДж/моль

3. Очищення та кристалізація продукту

Малеїновий ангідрид ймовірно гідролізується до малеїнової кислоти, а потім гідроксилується до яблучної кислоти [17].

1.5.1.1 Термодинамічний аналіз процесу

Таблиця 1.12 – Термодинамічні параметри реакцій

Реакція	ΔH°_{298} , кДж/моль	ΔG°_{298} , кДж/моль	ΔS°_{298} , Дж/(моль·К)	K_{eq} (25°C)
Гідроліз МА	-60,2	-45,8	-48,3	$-3,2 \times 10^8$
Гідратація МК	-23,8	-8,4	-51,8	-29,1
Загальна реакція	-84,0	-54,2	-100,1	$9,3 \times 10^9$

Механізм гідратації малеїнової кислоти

Гідратація малеїнової кислоти відбувається через утворення проміжного карбкатиону:

1. Протонування подвійного зв'язку
2. Нуклеофільна атака води
3. Депротонування з утворенням яблучної кислоти

Альтернативні методи виробництва

Біотехнологічне виробництво

Біотехнологічні процеси виробництва з використанням мікроорганізмів розвиваються як альтернатива хімічному синтезу [18]:

Мікроорганізми-продуценти:

- *Aspergillus oryzae*: продуктивність 120-150 г/л
- *Rhizopus oryzae*: продуктивність 80-100 г/л
- *Saccharomyces cerevisiae*: продуктивність 60-80 г/л
- *Pichia pastoris*: продуктивність 90-110 г/л

Субстрати для ферментації:

- Глюкоза: найбільш ефективний, але дорогий
- Сахароза: середня ефективність, доступний
- Крохмаль: потребує попередньої обробки
- Целюлоза: перспективний, але складний в обробці

Таблиця 1.13 – Порівняння біотехнологічних процесів

Мікроорганізм	Субстрат	Продуктивність, г/(л·год)	Вихід, %	Час ферментації, год	Температура, °C
<i>Aspergillus oryzae</i>	Глюкоза	2,5-3,1	85-92	48-60	30-35
<i>Rhizopus oryzae</i>	Сахароза	1,8-2,2	75-85	60-72	28-32
<i>Saccharomyces cerevisiae</i>	Глюкоза	1,2-1,8	65-75	72-96	28-30
<i>Pichia pastoris</i>	Метанол	2,0-2,6	80-88	48-72	25-30

Переваги біотехнологічного методу:

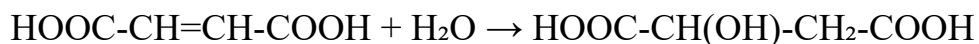
- Отримання оптично активної L-яблучної кислоти
- Екологічна безпечність процесу
- Можливість використання відновлюваної сировини
- Менша енергоємність

Недоліки біотехнологічного методу:

- Вища собівартість продукції
- Складність контролю процесу
- Необхідність стерилізації обладнання
- Обмежена продуктивність

Ферментативний синтез

Ферментативний синтез використовує фермент фумаратгідратазу для каталізу реакції гідратації фумарової кислоти:



Характеристики ферментативного процесу:

Температура: 35-40°C

pH: 7,0-8,5

Час реакції: 4-8 годин

Селективність: >95% L-форми

Конверсія: 85-92%

Таблиця 1.14 – Порівняння методів виробництва яблучної кислоти

Критерій	Хімічний синтез	Біотехнологічний	Ферментативний
Собівартість, \$/кг	2,0-2,5	4,5-6,0	8,0-12,0
Продуктивність, кг/(м ³ ·год)	15-25	2-4	1-2
Оптична чистота	Рацемат	>95% L-форма	>98% L-форма
Екологічність	Низька	Висока	Висока
Енергоспоживання, кВт·год/кг	8-12	15-20	5-8
Складність процесу	Середня	Висока	Дуже висока

Промислові технології

Технологія компанії Bartek Ingredients

Компанія Bartek Ingredients (Канада) є найбільшим світовим виробником яблучної кислоти з потужністю 25 000 тонн на рік. Технологія базується на гідратації малеїнової кислоти у присутності сірчаної кислоти як каталізатора.

Основні стадії процесу:

Гідроліз малеїнового ангідриду при 80-90°C

Каталітична гідратація при 110-130°C, 2-3 атм

Нейтралізація та очищення

Кристалізація та сушіння

Технологічні показники:

Конверсія малеїнової кислоти: 88-92%

Вихід яблучної кислоти: 85-88%

Чистота продукту: 99,5-99,8%

Технологія компанії Thirumalai Chemicals

Індійська компанія Thirumalai Chemicals розробила модифікований процес з використанням гетерогенного каталізатора на основі іонообмінних смол.

Особливості технології:

Використання катіонообмінної смоли Amberlyst-15

Температура процесу: 100-120°C

Тиск: 1,5-2,0 атм

Час контакту: 2-4 години

Переваги:

Легкість регенерації каталізатора

Відсутність корозійних продуктів

Можливість безперервного процесу

Китайські технології

Китайські виробники (Changmao Biochemical, Jindan Lactic Acid) використовують комбіновані технології:

Двостадійний процес:

Гідроліз малеїнового ангідриду в автоклаві

Каталітична гідратація в реакторі з мішалкою

Характеристики:

Загальна потужність в Китаї: ~15 000 тонн/рік

Середня чистота продукту: 98,5-99,2%

Собівартість: 1,8-2,2 \$/кг

Економічні аспекти виробництва

Структура витрат

Таблиця 1.15 – Структура витрат на виробництво яблучної кислоти

Стаття витрат	Хімічний синтез, %	Біотехнологічний, %
Сировина	65-70	40-45
Енергоносії	12-15	25-30
Каталізатори/ферменти	3-5	15-20
Трудові витрати	8-10	10-12
Амортизація	6-8	8-10
Накладні витрати	4-6	5-8
Прибуток	15-20	25-30

Ринкова ситуація

Світові ціни на яблучну кислоту (2024 р.):

DL-яблучна кислота (технічна): 2,2-2,8 \$/кг

DL-яблучна кислота (харчова): 2,8-3,2 \$/кг

L-яблучна кислота: 8,0-12,0 \$/кг

Основні виробники:

- Bartek Ingredients (Канада) - 25 000 т/рік
- Thirumalai Chemicals (Індія) - 8 000 т/рік
- Changmao Biochemical (Китай) - 6 000 т/рік
- Jindan Lactic Acid (Китай) - 4 500 т/рік
- Polynt (Італія) - 3 500 т/рік

1.4 Оптимізація процесу як об'єкт удосконалення технології

Удосконалення технології буде полягати в заміні центрифуги на модель PALADIN 1600 D, що дозволить автоматизувати виробництво та скоротити витрати електроенергії.

Аргументація даного провадження зумовлена малою ефективністю виробництва та великою кількістю ручної праці, заміна центрифуги допоможе зменшити витрати на електроенергію, час виробництва та затрати на зарплатню.

На весь цикл виробництва за звичайною схемою виробництва яблучної кислоти за допомогою малеїнового ангідриду в середньому витрачається 38,6 год. якщо замінити центрифугу на запропоновану це скоротить цикли 2-гого центригування та сушіння, що в свою чергу скоротить час виробництва на 3,5 год та енергозатрати на 10-12% .

1.5 Обґрунтування вибору технології

Для виробництва цільового продукту – яблучної кислоти був вибраний метод гідратації малеїнового ангідриду, оскільки це процес можна зробити безперервним та він не залежить від сезону.

РОЗДІЛ 2 ТЕХНОЛОГІЧНА ЧАСТИНА

2.1 Характеристика вихідної сировини

Для виробництва харчової яблучної кислоти використовують наступну сировину:

- малеїновий ангідрид
- вода [19].

За фізико-хімічними показниками технічний малеїновий ангідрид повинен відповідати нормам, зазначеним у таблиці 2.1[20].

Таблиця 2.1 вимоги до малеїнового ангідриду

Найменування показників	Норми згідно ГОСТ 11153-53
1. Зовнішній вигляд	Кристалічний продукт білого кольору
2. Масова частка суми малеїнового ангідриду і вільних кислот, % не менше	99,7
3. Температура кристалізації, °С, не нижче	40,3
4. Масова частка золи, % не більше	0,001

Малеїновий ангідрид - тверда речовина з різким запахом що складається з безбарвних ромбічних кристалів. Обмежено розчинний в ацетоні, бензолі, ксилолі, етилацетаті, хлороформі, толуолі. Інші назви: ангідрид малеїнової кислоти, 2,5-фурандіон.

Малеїновий ангідрид (МА) - це багатофункціональний базовий хімікат, який застосовується практично у всіх галузях промислової хімії. Зокрема, близько 57% обсягу світового виробництва малеїнового ангідриду застосовується для отримання ненасичених полієфірних смол.

Для синтезу яблучної кислоти найбільше значення мають перші дві реакції: гідроліз ангідриду та подальша гідратація утвореної малеїнової кислоти. Важливо зазначити, що в процесі синтезу можливе утворення побічного продукту – фумарової кислоти, яка є транс-ізомером малеїнової кислоти.

Відповідальна організація НУХТ, каф. ТЖХТ	Технічне узгодження Романова О.О.	Вид документа Пояснювальна записка	Статус документа			
Власник документа НУХТ	Розробник документа Синчук С.А.	Назва, додаткова назва РОЗДІЛ 2 ТЕХНОЛОГІЧНА ЧАСТИНА	ННІХТ.ХТ-4-14.025.161.027.КР.ПЗ			
	Документ затверджено Носенко Т.Т.		Інд. змін.	Дата видання 01.05.2025	Мова ua	Аркуш 25/79

Ізомеризація малеїнової кислоти у фумарову відбувається за підвищених температур, тому контроль температурного режиму має важливе значення для підвищення виходу цільового продукту [21].

При промисловому синтезі E296 реакцію проводять у водному середовищі при підвищеній температурі та тиску, що сприяє утворенню саме яблучної кислоти, а не її ізомерів або інших побічних продуктів. Типові умови процесу: температура 150-180°C і тиск 250-350 кПа. За таких умов досягається високий ступінь конверсії малеїнового ангідриду в яблучну кислоту.

Вода, що використовується у виробництві яблучної кислоти, повинна відповідати вимогам ДСТУ 7405:2014 "Вода питна. Вимоги та методи контролювання якості" та ДСанПіН 2.2.4-171-10 "Гігієнічні вимоги до води питної, призначеної для споживання людиною".

Таблиця 2.2 вимоги до води

Показник	Норматив ДСТУ 7405:2014
Водневий показник (рН)	6,5-8,5
Загальна жорсткість (ммоль/дм ³)	Не більше 7,0
Сухий залишок (мг/дм ³)	Не більше 1000
Вміст заліза (мг/дм ³)	Не більше 0,2
Вміст марганцю (мг/дм ³)	Не більше 0,05
Вміст сульфатів (мг/дм ³)	Не більше 250
Загальне мікробне число при 37 °С	Не більше 100 КУО/см ³
Загальні коліформи	Відсутність у 100 см ³

2.2 Опис принципової технологічної схеми

1. Підготовка малеїнового ангідриду і води.

При виконанні операції підготовки малеїнового ангідриду необхідно строго дотримуватися санітарно-гігієнічних вимог для того, щоб виключити додаткове забруднення мікрофлорою і запобігти забрудненню продукта.

Малеїновий ангідрид необхідно зберігати в сухих, чистих, добре вентильованих приміщеннях при температурі не вище 15 °С і відносній вологості повітря не більше 75%.

Підготовка води для виробничих процесів буває дуже різною в залежності від наявності домішок у воді і вимог виробництва. Вимоги виробництва виражаються в тому, щоб вода не утримувала шкідливих для реакції речовин, не викликала корозію апаратури, не утворювала накипу, шламу. Основними операціями водопідготовки являються: очищення від зважених домішок і зм'якшення, у деяких випадках нейтралізація, знесолення, дегазація і знезаражування. Фільтрується вода звичайно через шар піску і гравію.

Для дозування малеїнового ангідриду і води. використовуємо ваговий спосіб дозування, який заснований на вимірюванні ваги продукту і відмірювання його за даним критерієм з використанням стандартних величин ваги - кілограм і грам. Отже, відважуємо 1855 кг малеїнового ангідриду і стільки ж води.

2. Змішування

На спеціально підготовленому обладнанні, ймовірно, в реакторі зі змішувачем, здійснюється завантаження 1855 кг малеїнового ангідриду. Після цього додається 1855 кг води, підтримуючи гідромодуль 1:1. Суміш інтенсивно перемішується. Під час перемішування відбувається екзотермічна реакція гідратації, в результаті якої утворюється малеїнова кислота. Важливо контролювати рН розчину для забезпечення оптимальних умов реакції.

3. Синтез

На цьому ключовому етапі відбувається ізомеризація малеїнової кислоти в яблучну. Розчин малеїнової кислоти з попередньої стадії перекачується в реактор синтезу. Далі розчин нагрівається до температури 150°C. Цей температурний режим є критично важливим для протікання реакції ізомеризації. Реакційна суміш витримується при цій температурі протягом 4.0 годин, забезпечуючи достатній час для конверсії малеїнової кислоти в яблучну. Після завершення реакції, суміш охолоджується до 100°C, готуючи її до наступних операцій розділення. Загальний час цього етапу становить 7.0 годин.

4. Випаровування (I стадія)

Розчин з попередньої стадії подається у випарний апарат. Процес випаровування відбувається під вакуумом, що дозволяє знизити температуру

кипіння та зберегти властивості продукту. Концентрування розчину відбувається до досягнення густини 1.26 г/см³. У процесі відганяється значна частина води, що сприяє подальшій кристалізації небажаних компонентів. Цей етап триває 3.0 години.

5. Кристалізація (I стадія)

Після першого випаровування концентрований розчин перекачується у кристалізатор. На цьому етапі відбувається охолодження розчину до 20°C. При цій температурі розчинність залишків побічних продуктів, таких як фумарова кислота, а також незреагованої малеїнової кислоти, значно знижується. Це призводить до їх кристалізації. Ціль цього етапу – видалення основних органічних домішок, що містяться в розчині. Час охолодження та кристалізації становить 1.5 години.

6. Центрифугування (I стадія)

На цьому етапі відбувається механічне розділення кристалічних домішок від рідкої фази, що містить яблучну кислоту. Кристалічна суспензія з кристалізатора подається на центрифугу. Завдяки відцентровій силі, тверді частинки фумарової та малеїнової кислот відокремлюються від розчину яблучної кислоти. Цей етап включає також ручне вивантаження відокремлених домішок. Час на центрифугування домішок становить 1.5 години, а час центрифугування фумарової кислоти – 2.0 години. Розчин яблучної кислоти, що залишився, направляється на подальшу обробку.

7. Випаровування (II стадія)

Очищений розчин яблучної кислоти після першої стадії центрифугування направляється у випарний апарат для другого концентрування. Процес випаровування знову відбувається під вакуумом для збереження термочутливих властивостей яблучної кислоти. На цій стадії розчин концентрується до більш високої густини (приблизно 1.35-1.40 г/см³), що необхідно для ефективної кристалізації цільового продукту. Температура процесу підтримується на рівні 60-70°C завдяки використанню вакууму.

Цей етап триває 2.5 години. В результаті отримується високо

концентрований розчин яблучної кислоти, готовий до кристалізації

8. Кристалізація (II стадія)

Це ключова стадія для отримання товарної форми яблучної кислоти. Концентрований розчин з другого випаровування перекачується в кристалізатор. Тут відбувається контрольоване охолодження розчину до температури, оптимальної для кристалізації саме яблучної кислоти. Процес витримування для повної кристалізації продукту займає 3.0 години. В результаті утворюються чисті кристали яблучної кислоти у вигляді суспензії.

9. Центрифугування (II стадія)

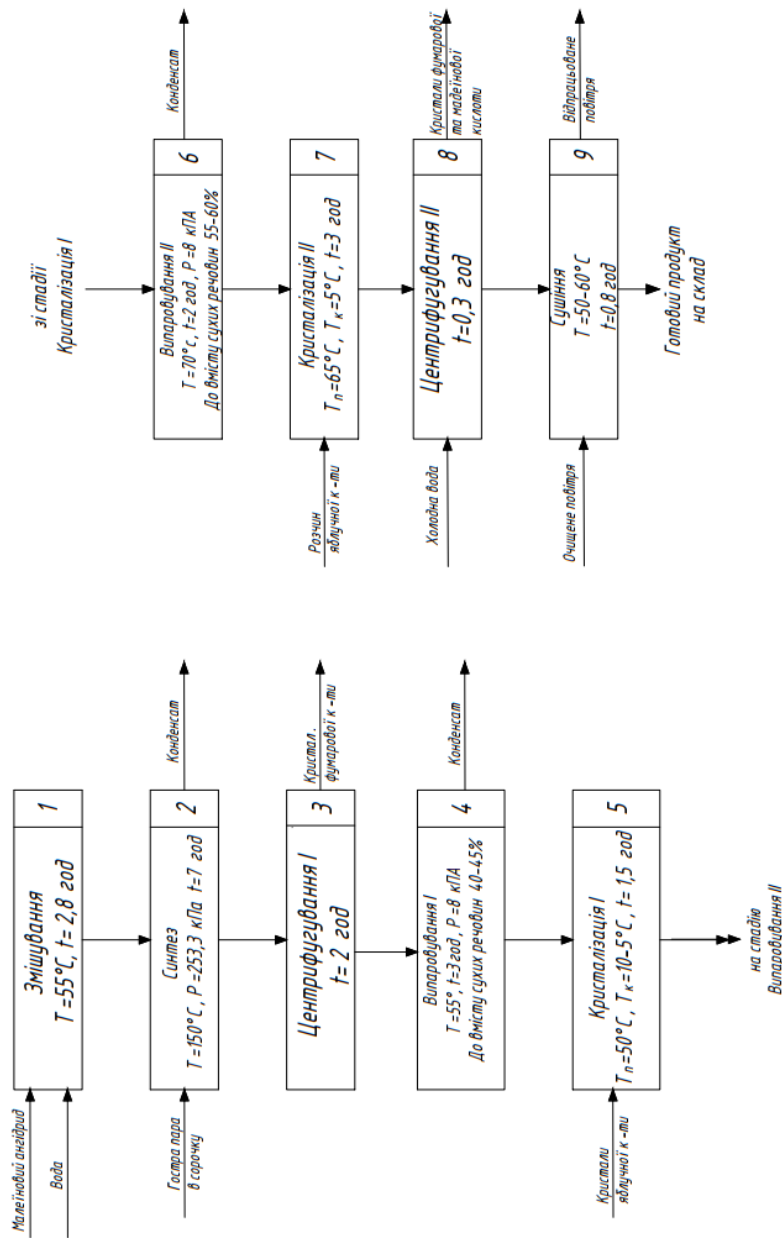
На цьому етапі відбувається відділення готових кристалів яблучної кислоти від маточного розчину. Завдяки модернізації, для цієї операції використовується автоматична центрифуга Andritz P1600. Це значно прискорює процес – центрифугування тепер займає всього 1.2 години (порівняно з 3.5 годинами на старій схемі). Автоматизація дозволяє отримати вологі кристали яблучної кислоти зі значно нижчою вологістю – 10% (проти 22% раніше). Це не тільки економить час, але й покращує якість продукту та зменшує навантаження на наступну стадію сушіння. Маточний розчин, що містить залишкові домішки, збирається для подальшої утилізації. Після центрифугування, вологі кристали швидко транспортуються на сушіння за 0.3 години.

10. Сушіння

Вологі кристали яблучної кислоти, отримані після модернізованого центрифугування, надходять у барабанну сушарку. Завдяки тому, що початкова вологість кристалів вже значно нижча (10% замість 18-25%), час сушіння скорочується до 3.2 годин (раніше 4.0 години). Це дозволяє ефективніше досягти кінцевої вологості продукту – 5%. Після сушіння відбувається охолодження та пакування готової яблучної кислоти у пакети по 1 кг, що займає 0.8 години.

11. Зберігання та упакування

Після сушіння кристали кислоти охолоджують, просіюють і упаковують. Яблучну кислоту випускають в упакованому вигляді, для реалізації через оптову торгівлю кислоту фасують по 1кг в пакети з поліетиленової плівки.



2.3 Розрахунок матеріального балансу відділення (цеху)

СТАДІЯ 1: ЗМІШУВАННЯ

Хімізм реакції: $C_4H_2O_3 + H_2O \rightarrow C_4H_4O_4$

Таблиця 2.3: Матеріальний баланс по стадії змішування

ПРИХІД	Кількість, кг	ВИТРАТА	Кількість, кг
Малеїновий ангідрид ($C_4H_2O_3$)	1855,0	Малеїнова кислота ($C_4H_4O_4$)	2197,8
Дистильована вода (H_2O)	1855,0	Надлишок води	1485,0
		Втрати при перемішуванні	27,2
ВСЬОГО	3710,0	ВСЬОГО	3710,0

СТАДІЯ 2: СИНТЕЗ

Хімізм реакції: $C_4H_4O_4$ (малеїнова) \rightleftharpoons $C_4H_4O_4$ (фумарова) + $C_4H_6O_5$ (яблучна)

Таблиця 2.4: Матеріальний баланс по стадії синтезу

ПРИХІД	Кількість, кг	ВИТРАТА	Кількість, кг
Малеїнова кислота (з стадії 1)	2197,8	Яблучна кислота ($C_4H_6O_5$)	1205,6
Надлишок води	1485,0	Фумарова кислота ($C_4H_4O_4$)	637,1
		Незпрореагована малеїнова кислота	351,7
		Вода загальна	1485,0
		Втрати при нагріванні (пари)	3,4
ВСЬОГО	3682,8	ВСЬОГО	3682,8

СТАДІЯ 3: ЦЕНТРИФУГУВАННЯ I

Технологічна операція: Відділення кристалів фумарової кислоти

Таблиця 2.5: Матеріальний баланс по стадії центрифугування I

ПРИХІД	Кількість, кг	ВИТРАТА	Кількість, кг
Реакційна суміш (з стадії 2)	3679,4	Фумарова кислота (відокремлена)	620,2
		Розчин яблучної кислоти	3041,3
		Втрати при центрифугуванні	17,9
ВСЬОГО	3679,4	ВСЬОГО	3679,4

СТАДІЯ 4: ВИПАРОВУВАННЯ I

Таблиця 2.6: Матеріальний баланс по стадії випаровування I

ПРИХІД	Кількість, кг	ВИТРАТА	Кількість, кг
Розчин яблучної кислоти (з стадії 3)	3041,3	Концентрований розчин	1574,1
		Випарена вода	1467,2
ВСЬОГО	3041,3	ВСЬОГО	3041,3

СТАДІЯ 5: КРИСТАЛІЗАЦІЯ I

Таблиця 2.7: Матеріальний баланс по стадії кристалізація I

ПРИХІД	Кількість, кг	ВИТРАТА	Кількість, кг
Концентрований розчин (з стадії 4)	1574,1	Вологі кристали (вологість 15%)	1350,2
		Маточний розчин	219,4
		Втрати при кристалізації	4,5
ВСЬОГО	1574,1	ВСЬОГО	1574,1

СТАДІЯ 6: ВИПАРОВУВАННЯ ІІ

Таблиця 2.8: Матеріальний баланс по стадії випаровування ІІ

ПРИХІД	Кількість, кг	ВИТРАТА	Кількість, кг
Розчин яблучної кислоти (з стадії 5)	1515,5	Концентрований розчин	1168,0
		Випарена вода	168,9
ВСЬОГО	1515,5	ВСЬОГО	1515,5

СТАДІЯ 7: КРИСТАЛІЗАЦІЯ 2

Таблиця 2.9: Матеріальний баланс по стадії кристалізація ІІ

ПРИХІД	Кількість, кг	ВИТРАТА	Кількість, кг
Концентрований розчин (з стадії 6)	1346,9	Вологі кристали яблучної кислоти (вологість 12%)	1342,4
		Втрати при кристалізації	4,5
ВСЬОГО	1346,9	ВСЬОГО	1346,9

СТАДІЯ 8: ЦЕНТРИФУГУВАННЯ 2 (МОДЕРНІЗОВАНЕ - Andritz P1600)

Технологічна операція: Автоматичне відділення кристалів

ПРИХІД	Кількість, кг	ВИТРАТА	Кількість, кг
Вологі кристали ЯК (з стадії 7)	1342,4	Вологі кристали ЯК (на сушіння)	1342,4
ВСЬОГО	1342,4	ВСЬОГО	1342,4

СТАДІЯ 9: СУШІННЯ

Технологічна операція: Сушіння до вологості 5%

ПРИХІД	Кількість, кг	ВИТРАТА	Кількість, кг
Вологі кристали ЯК (з стадії 8)	1342,4	Готова яблучна кислота (вологість 5%)	1275,3
		Випарена вода при сушінні	67,1
ВСЬОГО	1342,4	ВСЬОГО	1342,4

ЗВЕДЕНА ТАБЛИЦЯ МАТЕРІАЛЬНОГО БАЛАНСУ

ПРИХІД (ЗАГАЛЬНИЙ)	Кількість, кг	ВИТРАТА (ЗАГАЛЬНИЙ)	Кількість, кг
ПОЧАТКОВА СИРОВИНА:		ОСНОВНА ПРОДУКЦІЯ:	
Малеїновий ангідрид	1855,0	Готова яблучна кислота (5% вологість)	1275,3
Дистильована вода	1855,0	ПОБІЧНА ПРОДУКЦІЯ:	
		Фумарова кислота (відокремлена)	620,2
		ВИПАРЕНА ВОДА:	
		Випарена вода (стадія 4)	1520,6
		Випарена вода (стадія 6)	168,9
		Випарена вода (сушіння)	67,1
		ВТРАТИ:	
		Втрати при перемішуванні	27,2
		Втрати при нагріванні	3,4
		Втрати при центрифугуванні	23,1
		Втрати при кристалізації	4,5

ПРИХІД (ЗАГАЛЬНИЙ)	Кількість, кг	ВИТРАТА (ЗАГАЛЬНИЙ)	Кількість, кг
ВСЬОГО ПРИХОДУ	3710,0	ВСЬОГО ВИТРАТ	3710

Матеріальний баланс удосконаленої технології

На весь цикл виробництва за звичайною схемою виробництва яблучної кислоти за допомогою малеїнового ангідриду в середньому витрачається 38,6 год. якщо замінити центрифугу на запропоновану це скоротить цикли 2 центригування та сушіння, що в свою чергу скоротить час виробництва на 3,5 год та енергозатрати на 10-12%

Розрахунок часу виробництва за оригінальною схемою

Таблиця 2.13: Синтез малеїнової кислоти

Операція	Час (год)	Обґрунтування
Завантаження малеїнового ангідриду (1855 кг)	0,5	Механізоване завантаження
Додавання води (1855 кг, гідромодуль 1:1)	0,3	Подача через трубопровід
Перемішування до утворення малеїнової кислоти	2,0	Повільне перемішування, контроль рН
Підсумок стадії 1	2,8	

Таблиця 2.14: Синтез яблучної кислоти

Операція	Час (год)	Обґрунтування
Перекачування в реактор синтезу 3	0,5	Насос 2, об'єм ~3,7 м ³

Операція	Час (год)	Обґрунтування
Нагрівання до 150°C	1,5	Швидкість нагрівання ~100°C/год
Реакція синтезу при 150°C	4,0	Час завершення реакції
Охолодження до 100°C	1,0	Підготовка до перекачування
Підсумок стадії 2	7,0	

Таблиця 2.15: Відділення фумарової кислоти (оригінальна схема)

Операція	Час (год)	Обґрунтування
Перекачування в кристалізатор 5	0,5	Насос 4
Охолодження до температури кристалізації	2,0	Повільне охолодження для якісних кристалів
Кристалізація фумарової кислоти	1,5	Витримування для повної кристалізації
Центрифугування (ручне вивантаження)	2,0	Центрифуга 6, включно з ручними операціями
Підсумок стадії 3	6,0	

Таблиця 2.16: Перше випаровування та очищення

Операція	Час (год)	Обґрунтування
Перше випаровування до густини 1,26 г/см ³	3,0	Випарний апарат 9, під вакуумом
Перекачування в кристалізатор 11	0,3	Насос 10
Охолодження до 20°C	1,5	Кристалізація домішок
Центрифугування домішок	1,5	Центрифуга 12 (ручне вивантаження)
Підсумок стадії 4	6,3	

Таблиця 2.17: Друге випаровування та фінальна кристалізація (оригінальна схема)

Операція	Час (год)	Обґрунтування
Друге випаровування до густини 1,3 г/см ³	2,5	Випарний апарат 9, концентрування
Охолодження в кристалізаторі 17	2,0	До температури кристалізації яблучної кислоти
Кристалізація яблучної кислоти	3,0	Повна кристалізація продукту
Центрифугування (ручне, оригінальна схема)	3,5	Центрифуга 18, ручне вивантаження
Транспортування на сушіння	0,5	Шнековий транспортер 16
Підсумок стадії 5 (оригінальна)	11,5	

Таблиця 2.18: Сушіння

Операція	Час (год)	Обґрунтування
Сушіння в барабанній сушарці 17	4,0	До стандартної вологості
Охолодження та пакування	1,0	Фінальні операції
Підсумок стадії 6	5,0	

Розрахунок часу після заміни центрифуги 18 на Andritz P1600

Таблиця 2.19: Друге випаровування та фінальна кристалізація (модернізована схема)

Операція	Час (год)	Обґрунтування
Друге випаровування до густини 1,3	2,5	Без змін

Операція	Час (год)	Обґрунтування
г/см ³		
Охолодження в кристалізаторі 17	2,0	Без змін
Кристалізація яблучної кислоти	3,0	Без змін
Центрифугування (автоматичне, Andritz P1600)	1,2	Автоматичний цикл 12 хв на завантаження
Транспортування на сушіння	0,3	Прискорене завдяки автоматизації
Підсумок стадії 5 (модернізованої)	9,0	

Таблиця 2.20: Сушіння (покрощена)

Операція	Час (год)	Обґрунтування
Сушіння в барабанній сушарці 17	3,2	Менший час завдяки нижчій вологості (8-12% замість 18-25%)
Охолодження та пакування	0,8	Прискорені операції
Підсумок стадії 6 (покрощеної)	4,0	

Таблиця 2.21: Порівняльна характеристика загального часу виробництва


	Оригінальна схема (год)	Модернізована схема (год)	Економія часу (год)	Економія (%)
1. Синтез малеїнової кислоти	2,8	2,8	0	0%
2. Синтез яблучної кислоти	7,0	7,0	0	0%

	Оригінальна схема (год)	Модернізована схема (год)	Економія часу (год)	Економія (%)
3. Відділення фумарової кислоти	6,0	6,0	0	0%
4. Перше випаровування та очищення	6,3	6,3	0	0%
5. Друге випаровування та кристалізація	11,5	9,0	2,5	21,7%
6. Сушіння та пакування	5,0	4,0	1,0	20,0%
ЗАГАЛЬНИЙ ЧАС ВИРОБНИЦТВА	38,6 год	35,1 год	3,5 год	9,1%

2.4 Підбір основного технологічного обладнання

Лінія буде працювати безперервно, тому обладнання буде автоматичне з постійним моніторингом

Підбір основного обладнання

<p>Реактор з нержавіючої сталі 4000 літрів, Pfaudler RE-4000</p>	<p>Об'єм: 4000 л (робочий об'єм 3800 л) Матеріал: нержавіюча сталь 316L з склоемалевим покриттям Температурний режим: 20-80°C Тиск: до 3 бар Мішалка: якірна, 60 об/хв Система обігріву/охолодження: сорочка з теплоносієм Час циклу: 2 години</p>	
--	--	---

Реактор високого тиску з автоклавом Büchi Pilot Plant Reactor 5000

Об'єм: 5000 л
Матеріал: нержавіюча сталь 316L
Температурний режим: 120-180°C
Тиск: до 10 бар
Мішалка: турбінна, 200 об/хв
Система нагрівання: електричні нагрівачі + пар
Система охолодження: внутрішній теплообмінник
Час реакції: 4-6 годин




Центрифуга з фільтрацією Андриц D4LC-1000

Діаметр барабана: 1000 мм
Довжина: 1200 мм
Швидкість обертання: 3000 об/хв
Продуктивність: 1500 кг/год
Ефективність відділення: 97-98%
Вологість осаду: 15-20%
 Матеріал: нержавіюча сталь 316L



<p>Багатокорпусна випарна установка GEA Wiegand Multi-Effect Evaporator ME-4</p>	<p>Кількість корпусів: 4</p> <p>Поверхня теплообміну: 150 м² на корпус</p> <p>Продуктивність по воді: 1500 кг/год</p> <p>Температура: 60-90°C</p> <p>Вакуум: 0,1-0,3 бар</p> <p>Матеріал: нержавіюча сталь 316L</p> <p>Енергоспоживання: 0,25 кг пари/кг води</p> <p>Автоматичне регулювання концентрації</p>				
<p>Кристалізатор з охолодженням Swenson Draft Tube Baffle Crystallizer DTB-1500</p>	<p>Об'єм: 1500 л</p> <p>Матеріал: нержавіюча сталь 316L</p> <p>Температурний режим: 20-80°C</p> <p>Система охолодження: зовнішній теплообмінник</p> <p>Циркуляційний насос: 50 м³/год</p> <p>Час кристалізації: 3-4 години</p> <p>Розмір кристалів: 0,5-2 мм</p>				
<p>ННІХТ.ХТ-4-14.025.161.037.ПП.ПЗ</p>		<p>Інд. змін.</p>	<p>Дата видання 01.05.2025</p>	<p>Мова ua</p>	<p>Аркуш 41/79</p>

<p>Тонкоплівковий випарник Buss-SMS-Canzler Thin Film Evaporator TFE-2000</p>	<p>Діаметр: 800 мм Довжина: 2500 мм Поверхня теплообміну: 15 м² Продуктивність: 400 кг/год Температура: 70-100°C Вакуум: 50-100 мбар Матеріал: нержавіюча сталь 316L Ротор з лопатками</p>	
<p>Кристалізатор з перемішуванням Sulzer Chemtech Crystallizer SC-2000</p>	<p>Об'єм: 2000 л Матеріал: нержавіюча сталь 316L Температурний режим: 15-50°C Мішалка: пропелерна, 80 об/хв Система охолодження: сорочка + внутрішній теплообмінник Час кристалізації: 4-6 годин Контроль пересичення Автоматичне регулювання температури</p>	
<p>Центрифуга високої ефективності Andritz Paladin 1600D</p>	<p>Діаметр барабана: 1600 мм Довжина: 2000 мм Швидкість обертання: 2400 об/хв Продуктивність: 800-1200 кг/год Ефективність відділення: 99% Вологість кристалів: 8-12% Матеріал: нержавіюча сталь 316L Автоматичне управління Система СІР мийки Вібраційна система розвантаження</p>	

<p>Барабанна сушарка Allgaier DRUVATHERM Drum Dryer DD-3000</p>	<p>Діаметр барабана: 1500 мм Довжина: 6000 мм Об'єм завантаження: 3000 л Продуктивність: 500 кг/год Температура сушіння: 60-80°C Атмосфера: азот (інертний газ) Вологість на виході: 3-5% Матеріал: нержавіюча сталь 316L Система рекуперації тепла Автоматичне регулювання температури та вологості</p>	
---	---	---

1. Реактор з нержавіючої сталі Pfaudler RE-4000

Технічні характеристики:

- **Об'єм:** 4000 л (робочий об'єм 3800 л)
- **Матеріал:** нержавіюча сталь 316L з склоемалевим покриттям
- **Температурний режим:** 20-80°C
- **Тиск:** до 3 бар
- **Мішалка:** якірна, 60 об/хв

- **Система обігріву/охолодження:** сорочка з теплоносієм
- **Час циклу:** 2 години

Опис: Реактор призначений для проведення хімічних реакцій при контрольованих умовах температури та тиску. Склоемалеве покриття забезпечує високу корозійну стійкість та легкість очищення. Якірна мішалка забезпечує ефективне перемішування в'язких реакційних мас. Система теплообміну через сорочку дозволяє точно контролювати температуру реакційної маси. Реактор обладнаний системами контролю температури, тиску та швидкості обертання мішалки.

Переваги:

- Висока корозійна стійкість
- Легке очищення завдяки склоемалевому покриттю
- Точний контроль процесу
- Надійна система безпеки

2. Реактор високого тиску Büchi Pilot Plant Reactor 5000

Технічні характеристики:

- **Об'єм:** 5000 л
- **Матеріал:** нержавіюча сталь 316L
- **Температурний режим:** 120-180°C
- **Тиск:** до 10 бар
- **Мішалка:** турбінна, 200 об/хв
- **Система нагрівання:** електричні нагрівачі + пар
- **Система охолодження:** внутрішній теплообмінник
- **Час реакції:** 4-6 годин

Опис: Високотемпературний реактор для проведення реакцій під тиском. Турбінна мішалка забезпечує інтенсивне перемішування та високу швидкість масопередачі. Комбінована система нагрівання (електричні нагрівачі + пар) дозволяє швидко досягати робочої температури. Внутрішній теплообмінник забезпечує ефективне охолодження реакційної маси.

Реактор обладнаний системами безпеки для роботи під високим тиском.

Переваги:

- Висока продуктивність
- Можливість роботи при високих температурах та тиску
- Швидкий нагрів і охолодження
- Надійні системи безпеки

3. Центрифуга з фільтрацією Andritz D4LC-1000

Технічні характеристики:

- **Діаметр барабана:** 1000 мм
- **Довжина:** 1200 мм
- **Швидкість обертання:** 3000 об/хв
- **Продуктивність:** 1500 кг/год
- **Ефективність відділення:** 97-98%
- **Вологість осаду:** 15-20%
- **Матеріал:** нержавіюча сталь 316L

Опис: Декантерна центрифуга призначена для безперервного відділення твердих частинок від рідини. Високий ступінь відділення досягається за рахунок великої центрифугальної сили (до 3000 G). Система фільтрації дозволяє додатково очищувати рідку фазу. Автоматичне регулювання швидкості обертання та диференціальної швидкості транспортного шнека забезпечує оптимальну ефективність розділення.

Переваги:

- Високий ступінь відділення
- Безперервна робота
- Автоматичне управління
- Низький вміст вологи в осаді

4. Багатокорпусна випарна установка GEA Wiegand ME-4

Технічні характеристики:

- **Кількість корпусів:** 4
- **Поверхня теплообміну:** 150 м² на корпус
- **Продуктивність по воді:** 1500 кг/год
- **Температура:** 60-90°C
- **Вакуум:** 0,1-0,3 бар
- **Матеріал:** нержавіюча сталь 316L
- **Енергоспоживання:** 0,25 кг пари/кг води

Опис: Багатокорпусна випарна установка призначена для концентрування розчинів шляхом випаровування розчинника.

Чотири корпуси працюють в каскаді, що забезпечує високу енергоефективність. Вакуумна система знижує температуру кипіння, що дозволяє концентрувати термолабільні речовини. Автоматичне регулювання концентрації підтримує постійну якість продукту.

Переваги:

- Високий ступінь концентрування
- Енергоефективність
- Можливість роботи з термолабільними речовинами
- Автоматичне регулювання

5. Кристалізатор Swenson DTB-1500

Технічні характеристики:

- **Об'єм:** 1500 л
- **Матеріал:** нержавіюча сталь 316L
- **Температурний режим:** 20-80°C
- **Система охолодження:** зовнішній теплообмінник
- **Циркуляційний насос:** 50 м³/год
- **Час кристалізації:** 3-4 години
- **Розмір кристалів:** 0,5-2 мм

Опис: Кристалізатор з центральною циркуляційною трубою (Draft Tube Baffle) забезпечує контрольовану кристалізацію.

Конструкція з перегородками створює оптимальну гідродинаміку для росту кристалів. Зовнішній теплообмінник забезпечує точний контроль температури. Циркуляційний насос підтримує необхідну швидкість потоку для забезпечення однорідності кристалів.

Переваги:

Контрольований розмір кристалів

Стабільна гідродинаміка

- Точний температурний контроль

6. Тонкоплівковий випарник Buss-SMS-Canzler TFE-2000

Технічні характеристики:

- **Діаметр:** 800 мм
- **Довжина:** 2500 мм
- **Поверхня теплообміну:** 15 м²
- **Продуктивність:** 400 кг/год
- **Температура:** 70-100°C
- **Вакуум:** 50-100 мбар
- **Матеріал:** нержавіюча сталь 316L

Опис: Тонкоплівковий випарник призначений для концентрування високов'язких розчинів та паст. Ротор з лопатками створює тонкий шар продукту на поверхні теплообміну, що забезпечує ефективне випаровування при низьких температурах. Вакуумна система дозволяє працювати з термочутливими речовинами. Короткий час контакту мінімізує термічну деградацію продукту.

Переваги:

- Робота з високов'язкими продуктами
- Низька температура процесу
- Короткий час контакту
- Високий ступінь концентрування

7. Кристалізатор Sulzer Chemtech SC-2000

Технічні характеристики:

- **Об'єм:** 2000 л
- **Матеріал:** нержавіюча сталь 316L
- **Температурний режим:** 15-50°C
- **Мішалка:** пропелерна, 80 об/хв
- **Система охолодження:** сорочка + внутрішній теплообмінник
- **Час кристалізації:** 4-6 годин

Опис: Кристалізатор з перемішуванням призначений для отримання кристалів заданого розміру та якості. Пропелерна мішалка забезпечує м'яке перемішування без руйнування кристалів. Комбінована система охолодження (сорочка + внутрішній теплообмінник) дозволяє точно контролювати швидкість охолодження. Система контролю пересичення автоматично регулює умови кристалізації.

Переваги:

- Контрольована кристалізація
- М'яке перемішування
- Автоматичне регулювання
- Висока якість кристалів

8. Центрифуга Andritz Paladin 1600D

Технічні характеристики:

- **Діаметр барабана:** 1600 мм
- **Довжина:** 2000 мм
- **Швидкість обертання:** 2400 об/хв
- **Продуктивність:** 800-1200 кг/год
- **Ефективність відділення:** 99%
- **Вологість кристалів:** 8-12%
- **Матеріал:** нержавіюча сталь 316L

Опис: Високоєфективна декантерна центрифуга для розділення кристалів та маточного розчину. Велика довжина барабана забезпечує максимальний час перебування продукту в зоні розділення. Автоматична система управління оптимізує режим роботи залежно від властивостей продукту. Система СІР забезпечує ефективне очищення. Вібраційна система розвантаження запобігає налипанню продукту.

Переваги:

- Висока ефективність розділення
- Низька вологість продукту

- Автоматичне управління
- Система самоочищення

9. Барабанна сушарка Allgaier DRUVATHERM DD-3000

Технічні характеристики:

- **Діаметр барабана:** 1500 мм
- **Довжина:** 6000 мм
- **Об'єм завантаження:** 3000 л
- **Продуктивність:** 300 кг/год
- **Температура сушіння:** 60-80°C
- **Атмосфера:** азот (інертний газ)
- **Вологість на виході:** 3-5%
- **Матеріал:** нержавіюча сталь 316L

Опис: Барабанна сушарка призначена для сушіння кристалічних продуктів в інертній атмосфері. Обертний барабан забезпечує рівномірний нагрів та перемішування продукту. Сушіння в атмосфері азоту запобігає окисленню продукту. Система рекуперації тепла підвищує енергоефективність. Автоматичне регулювання температури та вологості забезпечує стабільну якість сушіння.

Переваги:

- Сушіння в інертній атмосфері
- Рівномірне висушування
- Система рекуперації тепла
- Автоматичне регулювання процесу

2.5 Опис апаратурно-технологічної схеми

На **рисунку 2.2** наведено апаратурно-технологічну схему виробництва.

Для одержання яблучної кислоти в реактор-змішувач 1 подають 1855 кг малеїнового ангідриду і воду за гідромодуля 1:1 кількість малеїнового ангідриду необхідного для завершення реакції становить 1855 кг .

Одержаний розчин витримують в реакторі – змішувачі 1 при повільному перемішуванні до утворення малеїнової кислоти.

Одержану малеїнову кислоту перевантажують в реактор синтезу 3 за допомогою насоса 2 для завершення реакції при температурі 150°C.

Потім її передавлюють в реактор кристалізатор охолоджувального типу 5, за допомогою насоса 4. При зниженні температури нижче температури кристалізації утворюються кристали фумарової кислоти, які відділяються на центрифугі 6. Застосовують центрифуги з ручним вивантаженням осаду.

Після центрифугування фумарову кислоту, направляють у збірник 7 та виводять з виробництва, а відокремлений розчин яблучної кислоти передають в випарний апарат 9 на перший етап випаровування.

Перше випаровування проводять під вакуумом. Упарений до густини 1,26 г/см³ розчин яблучної кислоти переводять в реактор-кристалізатор 11, з використанням насоса 10. При охолодженні до 20°C в реакторі кристалізаторі утворюються кристали малеїнової і фумарової кислоти, які відокремлюють на центрифугі 12 та збирають у збірники 13 .

Маточний розчин після центрифугування відправляють у випарний апарат 9 на другий етап випаровування. за допомогою насосу 15. Друге випарювання проводять у вакуум-апараті. Упарюють розчин до густини 1,3 г/см³ .

Розчин яблучної кислоти охолоджують в реакторі-кристалізаторі 17, що оснащений періодичною мішалкою. Яблучну кислоту, яка викристалізувалася відокремлюють від маточника на центрифугі 13, яку перекачали насосом 18.

Одержані при центрифугуванні кристали яблучної кислоти через шнековий транспортер 16 потрапляють в барабану сушарку 17, де висушуються до стандартної вологості готового продукту.

Вихід яблучної кислоти становить 1250 кг при завантаженні 3710 кг сировини.

Готову товарну яблучну кислоту відправляють на зберігання.

На рисунку 2.3 наведено апаратурно-технологічну схему виробництва.

2.6 Розрахунок барабанної сушарки

Вихідні дані:

- Початкова вологість матеріалу: $\omega_1 = 12\%$
- Кінцева вологість матеріалу: $\omega_2 = 5\%$
- Продуктивність по сирому матеріалу: $G_1 = 300$ кг/год
- Насипна густина: $\rho_n = 850$ кг/м³
- Коефіцієнт заповнення барабана: $\beta = 0,15$
- Час сушіння: $\tau = 0,8$ год = 48 хв
- Напруження об'єму барабана по волозі: $A = 8,8$ кг/(м³·год)

1. Розрахунок продуктивності по висушеному матеріалу

$$G_2 = G_1 \times (100 - \omega_1)/(100 - \omega_2)$$

$$G_2 = 300 \times (100 - 12)/(100 - 5) = 300 \times 88/95 = 277,89 \text{ кг/год} = 0,0772 \text{ кг/с}$$

2. Кількість випаруваної вологи

$$W = G_1 - G_2 = 300 - 277,89 = 22,11 \text{ кг/год}$$

$$\text{Відсоток випаруваної вологи: } (12 - 5) = 7\%$$

3. Час сушіння

$$\text{Час сушіння задано: } \tau = 0,8 \text{ год} = 48 \text{ хв}$$

$$\text{Перевірка за формулою: } \tau_{\text{розрах}} = (120 \times \beta \times \rho_n \times (\omega_1 - \omega_2))/(A \times [200 - (\omega_1 - \omega_2)])$$

$$\tau_{\text{розрах}} = (120 \times 0,15 \times 850 \times (12 - 5))/(8,8 \times [200 - (12 - 5)])$$

$$\tau_{\text{розрах}} = (120 \times 0,15 \times 850 \times 7)/(8,8 \times [200 - 7]) = 107100/(8,8 \times 193) = 107100/1698,4 = 63,07 \text{ хв}$$

Розрахунковий час (63,07 хв) відрізняється від заданого (48 хв), тому приймаємо задане значення $\tau = 48$ хв

4. Розрахунок об'єму барабана

$$\text{Приймаємо об'ємну витрату вологого повітря } V = 972 \text{ м}^3/\text{год}$$

$$\text{Швидкість повітря в барабані } v = 1 \text{ м/с}$$

Діаметр барабана:

$$D_b = 0,0188 \times \sqrt{[V/((1-\beta) \times v)]}$$

$$D_b = 0,0188 \times \sqrt{[972/((1-0,15) \times 1)]} = 0,0188 \times \sqrt{[972/0,85]} = 0,0188 \times \sqrt{1143,53} = 0,0188 \times 33,82 = 0,635 \text{ м}$$

Розрахунок розмірів барабана з умовою $L_b/D_b = 4,5$:

$$\text{Середня продуктивність: } G_{cp} = (G_1 + G_2)/2 = (300 + 277,89)/2 = 288,95 \text{ кг/год}$$

Необхідний об'єм барабана з умови сушіння:

$$V_b_{\text{потрібний}} = (G_{cp} \times \tau)/(\beta \times \rho_n \times 60) = (288,95 \times 48)/(0,15 \times 850 \times 60) = 1,814 \text{ м}^3$$

Приймаємо відношення $L_b/D_b = 4,5$, тоді $L_b = 4,5 \times D_b$

$$\text{З формули об'єму: } V_b = (\pi \times D_b^2 \times L_b)/4 = (\pi \times D_b^2 \times 4,5 \times D_b)/4 = (\pi \times 4,5 \times D_b^3)/4$$

$$\text{Звідки: } D_b^3 = (4 \times V_b)/(\pi \times 4,5) = (4 \times 1,814)/(3,14 \times 4,5) = 7,256/14,13 = 0,513$$

$$D_b = \sqrt[3]{0,513} = 0,801 \text{ м}$$

$$L_b = 4,5 \times 0,801 = 3,605 \text{ м}$$

Перевірка об'єму:

$$V_b = (\pi \times 0,801^2 \times 3,605)/4 = (3,14 \times 0,641 \times 3,605)/4 = 1,82 \text{ м}^3 \approx 1,814 \text{ м}^3 \checkmark$$

5. Об'єм матеріалу в барабані

$$V_m = (G_{cp} \times \tau)/(\rho_n \times 60) = (288,95 \times 48)/(850 \times 60) = 13869,6/51000 = 0,272 \text{ м}^3$$

6. Коефіцієнт заповнення барабана матеріалом

$$\beta_{\text{факт}} = V_m/V_b = 0,272/1,82 = 0,149$$

Отриманий коефіцієнт заповнення практично відповідає прийнятому $\beta = 0,15$.

7. Швидкість витання частинок

Приймаємо:

- діаметр частинок: $d = 0,00015 \text{ м (0,15 мм)}$
- в'язкість сушильного агенту: $\mu_{cp} = 0,00101 \text{ Н} \cdot \text{с/м}^2$
- густина сушильного агенту: $\rho_{cp} = 1,06 \text{ кг/м}^3$
- густина частинок матеріалу: $\rho_{ч} = 1609 \text{ кг/м}^3$

Критерій Архімеда:

$$Ar = (g \times d^3 \times \rho_{ч} \times \rho_{cp})/\mu_{cp}^2$$

- $g = 9,8 \text{ м/с}^2$
- $d^3 = (0,00015)^3 = 3,375 \times 10^{-12} \text{ м}^3$
- $\rho_{\text{ч}} \times \rho_{\text{ср}} = 1609 \times 1,06 = 1705,54 \text{ кг}^2/\text{м}^6$
- $\mu^2_{\text{ср}} = (0,00101)^2 = 1,0201 \times 10^{-6} \text{ (Н} \cdot \text{с/м}^2)^2$

$$Ar = (9,8 \times 3,375 \times 10^{-12} \times 1705,54)/(1,0201 \times 10^{-6}) = (5,635 \times 10^{-8})/(1,0201 \times 10^{-6}) = 55,25$$

Швидкість витання:

$$v_{\text{ВИТ}} = (\mu_{\text{ср}})/(d \times \rho_{\text{ср}}) \times (Ar/(18 + 0,575\sqrt{Ar}))$$

$$\sqrt{Ar} = \sqrt{55,25} = 7,43$$

$$v_{\text{ВИТ}} = (0,00101)/(0,00015 \times 1,06) \times (55,25/(18 + 0,575 \times 7,43))$$

$$v_{\text{ВИТ}} = (0,00101)/(0,000159) \times (55,25/(18 + 4,27)) = 6,35 \times (55,25/22,27) = 6,35 \times 2,48 = 15,75 \text{ м/с}$$

8. Частота обертання барабана

Приймаємо кут нахилу $\alpha = 2^\circ$, коефіцієнти $m = 0,6$, $k = 1,6$

$$n = (m \times k \times L_{\text{б}})/(\tau \times D_{\text{б}} \times \tan \alpha) = (0,6 \times 1,6 \times 3,605)/(48 \times 0,801 \times \tan 2^\circ)$$

$$n = 3,461/(48 \times 0,801 \times 0,0349) = 3,461/1,342 = 2,58 \text{ об/хв}$$

9. Потужність для обертання барабана

Приймаємо коефіцієнт потужності $\sigma = 0,68$

$$N = 0,0013 \times D^3_{\text{б}} \times L_{\text{б}} \times \rho_{\text{н}} \times \sigma \times n$$

$$N = 0,0013 \times 0,801^3 \times 3,605 \times 850 \times 0,68 \times 2,58$$

$$N = 0,0013 \times 0,513 \times 3,605 \times 850 \times 0,68 \times 2,58 = 3,58 \text{ кВт}$$

- Частота обертання: 2,58 об/хв
- Потужність приводу: 3,58 кВт

РОЗДІЛ 3 ТЕХНІКО-ЕКОНОМІЧНЕ ОБҐРУНТУВАННЯ

Розрахунок економічної ефективності

Розрахунок економічної ефективності виробництва яблучної кислоти за запропонованою схемою

ВИХІДНІ ДАНІ ДЛЯ РОЗРАХУНКУ

Виробничі показники:

- Готова продукція: 1275,3 кг яблучної кислоти (5% вологість)
- Чистота продукту: 94,5%
- Побічна продукція: 620,2 кг фумарової кислоти
- Вихід від теоретичного: 68,8%

Базові витрати (задані):

- Заробітна плата: 316 060,8 грн
- Пакування: 604 грн

РОЗРАХУНОК ПРЯМИХ МАТЕРІАЛЬНИХ ВИТРАТ

1. Основна сировина:

Найменування	Кількість, кг	Ціна за кг, грн*	Сума, грн
Малеїновий ангідрид (C ₄ H ₂ O ₃)	1855,0	85,00	157 675,00
Дистильована вода	1855,0	12,00	22 260,00
ВСЬОГО сировина			179 935,00

Відповідальна організація НУХТ, каф. ТЖХТ	Технічне узгодження Романова О.О.	Вид документа Пояснювальна записка	Статус документа			
Власник документа НУХТ	Розробник документа Синчук С.А.	Назва, додаткова назва РОЗДІЛ 3 ТЕХНІКО- ЕКОНОМІЧНЕ ОБҐРУНТУВАННЯ	ННІХТ.ХТ-4-14.025.161.061.КР.ПЗ			
	Документ затверджено Носенко Т.Т.		Інд. змін.	Дата видання 01.05.2025	Мова ua	Аркуш 56/79

2. Допоміжні матеріали:

Найменування	Кількість	Ціна, грн	Сума, грн
Каталізатори та реагенти	1 комплект	8 500,00	8 500,00
Фільтруючі матеріали	1 комплект	2 100,00	2 100,00
Змазочні матеріали	1 комплект	1 500,00	1 500,00
ВСЬОГО допоміжні			12 100,00

ВСЬОГО прямих матеріальних витрат: 192 035,00 грн

РОЗРАХУНОК ЕНЕРГЕТИЧНИХ ВИТРАТ

Споживання енергоресурсів:

Енергоресурс	Кількість	Тариф, грн	Сума, грн
Електроенергія	2850 кВт·год	4,32	12 312,00
Природний газ (пара,нагрівання)	1200 м ³	7,96	9 552,00
Технічна вода (охолодження)	45 м ³	15,50	697,50
Стиснене повітря	850 м ³	2,80	2 380,00
ВСЬОГО енергетичних витрат			24 941,50

ЗВЕДЕНИЙ РОЗРАХУНОК СОБІВАРТОСТІ

Прямі витрати:

Стаття витрат	Сума, грн	Частка, %
Сировина та матеріали	192 035,00	35,1%
Заробітна плата	316 060,8	57,8%
Енергоресурси	24 941,50	4,6%
Пакування	604,00	0,1%
Всього прямих витрат	533 641,30	97,6%

Непрямі витрати:

Стаття витрат	Розрахунок	Сума, грн
Загальновиробничі витрати	8% від прямих	42 691,30
Адміністративні витрати	3% від прямих	16 009,24
Витрати на збут	2% від прямих	10 672,83
Всього непрямих витрат		69 373,37

ПОВНА СОБІВАРТІСТЬ: 603 014,67 грн

РОЗРАХУНОК ДОХОДІВ

Реалізація основної продукції:

Продукт	Кількість, кг	Ціна за кг, грн	Сума, грн
Яблучна кислота E296 (харчова)	1275,3	620,00	790 686,00

Реалізація побічної продукції:

Продукт	Кількість, кг	Ціна за кг, грн	Сума, грн
Фумарова кислота (технічна)	620,2	145,00	89 929,00

ВСЬОГО доходів: 880 615,00 грн

ФІНАНСОВІ ПОКАЗНИКИ

Економічна ефективність:

Показник	Значення
Валовий дохід	880 615,00 грн
Повна собівартість	603 014,67 грн
Валовий прибуток	277 600,33 грн
Рентабельність виробництва	46,0%
Рентабельність продажів	31,5%

Собівартість одиниці продукції:

Показник	Значення
Собівартість 1 кг яблучної кислоти	472,89 грн/кг
Ціна реалізації 1 кг	620,00 грн/кг
Прибуток з 1 кг	147,11 грн/кг
Рентабельність одиниці	31,1%

АНАЛІЗ СТРУКТУРИ ВИТРАТ

Структура собівартості:

Стаття витрат	Сума, грн	Частка, %
Заробітна плата	316 060,8	52,4%
Сировина та матеріали	192 035,00	31,8%
Енергоресурси	24 941,50	4,1%
Загальновиробничі витрати	42 691,30	7,1%
Адміністративні витрати	16 009,24	2,7%
Витрати на збут	10 672,83	1,8%
Пакування	604,00	0,1%

ПОКАЗНИКИ ЕФЕКТИВНОСТІ ВИРОБНИЦТВА

Технічні показники:

Показник	Значення
Продуктивність:	1275,3 кг готової продукції
Витрата сировини на 1 кг продукту:	1,45 кг малеїнового ангідриду
Вихід готової продукції:	68,8% від теоретичного
Коефіцієнт використання сировини:	0,688

Економічні показники:

Показник	Значення
Матеріаломісткість:	0,218 грн/грн
Зарплатомісткість:	0,359 грн/грн
Енергомісткість:	0,028 грн/грн
Фондовіддача:	1,46

РОЗДІЛ 4 ОРГАНІЗАЦІЯ КОНТРОЛЮ ЯКОСТІ ПРОДУКЦІЇ

Система контролю якості виробництва яблучної кислоти з малеїнового ангідриду базується на комплексному підході, що охоплює контроль сировини, моніторинг технологічних параметрів на всіх стадіях процесу та всебічну оцінку якості готової продукції. Ефективність системи забезпечується чітким дотриманням встановлених параметрів на кожній стадії технологічного циклу.

Характеристика та контроль сировини

Малеїновий ангідрид

Малеїновий ангідрид є основною сировиною для виробництва яблучної кислоти методом каталітичної гідратації. Речовина являє собою білі кристалічні пластівці з різким характерним запахом, що легко сублимується при кімнатній температурі.

Основні показники якості малеїнового ангідриду:

- Чистота основної речовини: не менше 99,8%
- Вміст води: не більше 0,05%
- Температура плавлення: 52,8-53,2°C
- Кислотне число: не більше 0,1 мг КОН/г
- Колірність: не більше 10 одиниць Хазена
- Зольність: менше 0,001%
- Вміст фумарового ангідриду: не більше 0,1%

Контроль якості малеїнового ангідриду здійснюється за допомогою комплексу аналітичних методів. Чистоту основної речовини визначають методом газової хроматографії або титриметрично після гідролізу до малеїнової кислоти. Вміст води контролюють методом Карла Фішера. Температуру плавлення визначають на приладі для визначення температури плавлення з точністю $\pm 0,2^\circ\text{C}$.

<i>Відповідальна організація</i> НУХТ, каф. ТЖХТ	<i>Технічне узгодження</i> Романова О.О.	<i>Вид документа</i> Пояснювальна записка		<i>Статус документа</i>		
<i>Власник документа</i> НУХТ	<i>Розробник документа</i> Синчук С.А.	<i>Назва, додаткова назва</i> РОЗДІЛ 4 ОРГАНІЗАЦІЯ КОНТРОЛЮ ЯКОСТІ ПРОДУКЦІЇ	<i>ННІХТ.ХТ-4-14.025.161.065.КР.ПЗ</i>			
	<i>Документ затверджено</i> Носенко Т.Т.		<i>Інд. змін.</i>	<i>Дата видання</i> 01.05.2025	<i>Мова</i> ua	<i>Аркуш</i> 61/79

Контроль технологічного процесу

Стадія змішування реагентів

На початковій стадії готують реакційну суміш шляхом розчинення малеїнового ангідриду у воді. Мольне співвідношення малеїновий ангідрид : вода становить 1:1,5, що забезпечує повноту гідратації та мінімізує побічні реакції.

Контрольовані параметри:

- Температура суміші: 25-30°C
- Час змішування: 15-20 хвилин
- рН середовища: 1,8-2,2
- Відсутність нерозчинних частинок
- Концентрація малеїнового ангідриду: 35-40%

Якість змішування контролюють візуально (прозорість розчину, відсутність каламуті) та інструментально. Концентрацію малеїнового ангідриду визначають спектрофотометрично при довжині хвилі 267 нм. рН контролюють потенціометричним методом з використанням скляного електрода.

Стадія синтезу (гідратації)

Каталітична гідратація малеїнового ангідриду проводиться в реакторі з мішалкою при підвищеній температурі. Процес є екзотермічним і потребує ефективного контролю температурного режиму.

Технологічні параметри синтезу:

- Температура реакції: 95-105°C
- Тиск: 0,15-0,25 МПа
- Час реакції: 2,5-3 години
- Швидкість перемішування: 150-200 об/хв
- Концентрація каталізатора: 2-3% від маси реагентів

Контроль перебігу реакції здійснюється шляхом відбору проб через регулярні інтервали (кожні 30 хвилин) з подальшим аналізом. Концентрацію яблучної кислоти визначають титруванням розчином натрій гідроксиду (0,1 М) з індикатором фенолфталеїн. Ступінь перетворення розраховують як відношення фактично утвореної яблучної кислоти до теоретично можливої кількості.

Утворення побічних продуктів (фумарової кислоти, малеїнової кислоти, продуктів полімеризації) контролюють методом високоефективної рідинної хроматографії. Селективність реакції повинна становити не менше 96%.

Стадія центрифугування (відділення каталізатора)

Після завершення синтезу реакційну масу направляють на відділення каталізатора за допомогою центрифуги. Ефективне відділення каталізатора критично важливе для якості кінцевого продукту.

Параметри центрифугування:

- Частота обертання: 3000 об/хв
- Час центрифугування: 20-25 хвилин
- Температура: 60-70°C
- Ефективність відділення: не менше 99,5%

Контроль ефективності відділення каталізатора здійснюють аналізом залишкового вмісту молібдену в рідкій фазі методом атомно-абсорбційної спектроскопії. Допустимий вміст молібдену не повинен перевищувати 10 мг/л.

Відділений каталізатор промивають дистильованою водою для видалення залишків органічних речовин і направляють на регенерацію. Ефективність промивання оцінюють за провідністю промивних вод.

Стадія першого випаровування

Реакційну масу концентрують у вакуумному випарнику для видалення надлишку води та підвищення концентрації яблучної кислоти. Використання вакууму дозволяє знизити температуру кипіння і уникнути термічного розкладу продукту.

Режимні параметри випаровування:

- Температура: 65-75°C
- Залишковий тиск: 20-30 кПа
- Концентрація яблучної кислоти на виході: 45-50%
- Швидкість випаровування: 2-3 кг води/(м²·год)

Контроль процесу концентрування включає моніторинг температури кипіння розчину, яка є індикатором концентрації. Колір розчину не повинен змінюватися, що свідчить про відсутність термічного розкладу. рН концентрату

повинен залишатися в межах 1,9-2,3.

Кінцеву концентрацію визначають рефрактометричним методом з подальшим підтвердженням титруванням. Втрати продукту з парами контролюють аналізом конденсату і не повинні перевищувати 0,1%.

Стадія першої кристалізації

Концентрований розчин охолоджують для виділення кристалів яблучної кислоти. Швидкість охолодження є критичним параметром, що впливає на розмір і якість кристалів.

Параметри кристалізації:

- Початкова температура: 70-75°C
- Кінцева температура: 10-15°C
- Швидкість охолодження: 1-2°C/год
- Загальний час кристалізації: 8-10 годин
- Ступінь пересичення: 1,2-1,5

Процес утворення кристалів контролюють візуально та під оптичним мікроскопом. Розмір кристалів повинен становити 0,8-1,5 мм, форма - правильні призми або пластинки. Вихід кристалів першої генерації становить 75-80% від теоретичного.

Якість кристалів оцінюють методом високоефективної рідинної хроматографії. Чистота кристалів першої генерації зазвичай становить 99,2-99,5%.

Стадія другого випаровування

Маточний розчин після відділення кристалів містить 20-25% яблучної кислоти і підлягає додатковому концентруванню для отримання другої порції кристалів.

Режим концентрування маточного розчину:

- Температура: 70-80°C
- Залишковий тиск: 15-25 кПа
- Концентрація на виході: 55-60%
- Час концентрування: 3-4 години

Особливу увагу приділяють контролю термічної стабільності через

підвищену концентрацію розчину. Контролюють колір розчину та утворення фумарової кислоти як побічного продукту дегідратації. Вміст фумарової кислоти не повинен перевищувати 0,3%.

Стадія другої кристалізації

Другий цикл кристалізації проводять за схожими параметрами з деякими модифікаціями для підвищення чистоти продукту.

Параметри другої кристалізації:

- Початкова температура: 75-80°C
- Кінцева температура: 5-10°C
- Швидкість охолодження: 0,8-1,5°C/год
- Час кристалізації: 10-12 годин

Кристали другої генерації мають дещо нижчу чистоту (98,5-99,0%) через накопичення домішок у маточному розчині. За необхідності проводять додаткову перекристалізацію або об'єднують з кристалами першої генерації.

Стадія центрифугування кристалів

Відділення кристалів від маточного розчину здійснюють на фільтрувальній центрифугі з перфорованим барабаном, що забезпечує ефективне видалення рідкої фази.

Параметри центрифугування кристалів:

- Частота обертання: 1200-1500 об/хв
- Час центрифугування: 15-20 хвилин
- Кількість промивань: 2-3 рази
- Температура промивної води: 5-10°C
- Залишкова вологість: 8-12%

Ефективність відділення контролюють аналізом маточного розчину на вміст твердих частинок. Втрати продукту з маточним розчином не повинні перевищувати 2%.

Промивання кристалів проводять холодною дистильованою водою для видалення залишків маточного розчину. Якість промивання оцінюють за провідністю останньої порції промивних вод, яка повинна бути менше 50 мкСм/см.

Стадія сушіння

Завершальна стадія процесу - сушіння кристалів до залишкової вологості, що відповідає вимогам стандартів. Використовують сушарку з киплячим шаром, що забезпечує рівномірне і ефективне видалення вологи.

Режимні параметри сушіння:

- Температура сушильного агенту: 70-80°C
- Час сушіння: 4-6 годин
- Швидкість повітря: 1,5-2,0 м/с
- Кінцева вологість продукту: не більше 0,3%

Критичним параметром є контроль температури продукту, яка не повинна перевищувати 85°C для запобігання термічному розкладу. Рівномірність сушіння контролюють відбором проб з різних точок шару продукту.

Колір кристалів повинен залишатися білим без жовтуватого відтінку. Сипкість продукту оцінюють візуально - відсутність злипання частинок і утворення конгломератів.

Контроль якості готової продукції

Фізико-хімічні показники

Готова яблучна кислота підлягає всебічному аналізу за комплексом фізико-хімічних показників:

Основні характеристики:

- Чистота основної речовини: 99,6-99,8%
- Вологість: 0,2-0,3%
- Зольність: менше 0,05%
- Оптична активність: $[\alpha]_{D^{20}} = -2,4^{\circ}$ до $-2,7^{\circ}$
- Розмір частинок: 0,5-2,0 мм
- Розчинність у воді: повна при 20°C
- Температура плавлення: 130-132°C

Домішки:

- Фумарова кислота: не більше 0,8%
- Малейнова кислота: не більше 0,3%
- Важкі метали: не більше 10 мг/кг

- Залишковий каталізатор (Mo): не більше 5 мг/кг

Методи аналізу

Основний вміст визначають титриметричним методом з використанням стандартного розчину натрій гідроксиду (0,1 М). Точку еквівалентності фіксують потенціометрично або з індикатором фенолфталеїн.

Оптичну активність вимірюють на поляриметрі при температурі 20°C у водному розчині концентрацією 8,326 г/100 мл. Енантіомерну чистоту L-форми визначають методом хіральної хроматографії.

Домішки органічних кислот аналізують методом вискоєфективної рідинної хроматографії з використанням колонки C18 та УФ-детектора при 210 нм.

Вміст важких металів визначають методом атомно-абсорбційної спектроскопії після мокрого озолення проби концентрованою азотною кислотою.

Вологість визначають гравіметричним методом при температурі 105°C протягом 3 годин або методом Карла Фішера для точних вимірювань.

Система документування

Всі результати контролю якості документуються відповідно до вимог системи управління якістю:

- Протоколи випробувань сировини та готової продукції
- Журнали операційного контролю технологічних параметрів
- Паспорти якості партій продукції
- Звіти про відхилення та коригувальні дії
- Сертифікати калібрування засобів вимірювань

Система прослідковуваності забезпечує можливість відстеження кожної партії продукції від сировини до споживача через унікальні номери партій та ведення відповідних записів.

Метрологічне забезпечення

Точність результатів контролю забезпечується регулярним калібруванням та перевіркою засобів вимірювань:

- Аналітичні ваги - щорічно

- рН-метри та іономіри - раз на 6 місяців
- Спектрофотометри - щорічно
- Поляриметри - щорічно
- Термометри та датчики температури - раз на 2 роки
- Манометри - щорічно

Для забезпечення правильності результатів використовуються державні стандартні зразки складу та certified reference materials міжнародних організацій.

РОЗДІЛ 5 ЕКОЛОГІЧНА ЧАСТИНА

Викиди парникових газів

Хімічна промисловість – це промисловий сектор з найбільшим попитом на енергію, який використовує значну частку світового викопного палива та викидає все більшу кількість парникових газів після швидкого зростання протягом останніх 25 років [22].

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

Викиди утворюються на виробничих майданчиках шляхом спалювання викопного палива, а також у багатьох фундаментальних процесах виробництва ключових хімічних речовин, так звані викиди категорії 1, а також у зовнішньому виробництві тепла та електроенергії, що використовуються промисловістю, так звані викиди категорії 2 [23].

Для досягнення суттєвого скорочення викидів вкрай важливо дотримуватися стратегій глибокої декарбонізації. Шлях до декарбонізації викидів, полягає в уловлюванні та використанні вуглецю (CCU) для хімічної переробки. Потреба в енергії для процесів уловлювання вуглецю значно відрізняється залежно від джерела вуглецю [22].

Для того, щоб шлях до декарбонізації був суттєвим, також важливо забезпечити не лише зменшення викидів, а й справжнє уникнення викидів завдяки використанню вловленого вуглецю [22].

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

Відповідальна організація НУХТ, каф. ТЖХТ	Технічне узгодження Романова О.О.	Вид документа Пояснювальна записка	Статус документа			
Власник документа НУХТ	Розробник документа Синчук С.А.	Назва, додаткова назва РОЗДІЛ 5 ЕКОЛОГІЧНА ЧАСТИНА	ННІХТ.ХТ-4-14.025.161.069.КР.ПЗ			
	Документ затверджено Носенко Т.Т.		Інд. змін.	Дата видання 01.05.2025	Мова ua	Аркуш 69/79

Швидке зростання викидів парникових газів у хімічному секторі в глобальному масштабі, призвело до збільшення викидів більш ніж удвічі порівняно із 1995 роком [22].

У 2014 році промисловий сектор відповідав за 33% світових антропогенних викидів парникових газів [24].

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

До галузей із найбільшими викидами належать: цементна, чорна металургія, сталеливарна галузь, а також хімічна та пластмасова промисловість. (Виробництво цементу належить до однієї із найскладніших для декарбонізації галузей промисловості) [24].

Викиди, пов'язані з енергетикою, відбуваються від спалювання палива, тоді як технологічні викиди – від іншої промислової діяльності. Прямі викиди відбуваються від промислових об'єктів, тоді як непрямі викиди пов'язані з виробництвом електроенергії або централізованого тепlopостачання, що закуповується промисловістю (а не виробляється на місці) [24].

Компанії, які інвестують у вдосконалені технології, будуть позиціоновані як лідери протягом цього століття, коли занепокоєння щодо зміни клімату, ймовірно, зробить неефективність та високий рівень викидів дедалі серйознішими бізнес-проблемами. Промислова декарбонізація буде мотивована зниженням вартості чистіших технологій [24].

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

Досягнення нульових промислових викидів вимагатиме комплексу різних втручань, як з боку пропозиції, так і з боку попиту [24].

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

Хоча промисловий сектор є великим та неоднорідним, мета декарбонізації світового промислового виробництва в цьому столітті є досяжною [24].

Стічні води

Зростання населення світу та промисловості призвело до постійного зростання попиту на воду пропорційно до наявних запасів, які залишаються постійними. Таким чином, необхідно мінімізувати її споживання, а також необхідно повертати її назад у навколишнє середовище з мінімальним навантаженням забруднення через обмежену здатність до самоочищення, звідси важливість процесу очищення стічних вод [25].

Протягом останніх двох десятиліть у Європі та Сполучених Штатах відбулися масштабні екологічні ініціативи, що призвели до запровадження суворих екологічних норм щодо промислових викидів для хімічної промисловості. Було необхідно інвестувати в чистіші технології та ефективніші методи обробки. З іншого боку, численні хімічні компанії встановили системи очищення стічних вод, щоб відповідати нещодавно розробленим нормам країни, в якій вони базуються, або нормам країн, з якими вони торгують [25].

Хімічна промисловість складається з компаній, що виробляють промислові хімікати. Хімічна промисловість має важливе значення з точки зору її впливу на навколишнє середовище [25].

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

Активоване вугілля може бути використане для видалення металів, хлоридів, фторидів із промислових стічних вод [25].

РОЗДІЛ 6 ОХОРОНА ПРАЦІ

Загальні вимоги.

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

Небезпечні чинники (речовини, матеріали), що використовуються на підприємстві, повинні бути зареєстровані відповідно до Положення про гігієнічну регламентацію та державну реєстрацію небезпечних факторів, затвердженого постановою Кабінету Міністрів України від 13.06.95 N 420 (420-95-п) [26].

Під час прийняття на роботу та в процесі роботи на підприємствах основної хімічної промисловості працівники проходять навчання, інструктаж і перевірку знань з питань охорони праці згідно з вимогами Типового положення про порядок проведення навчання і перевірки знань з питань охорони праці, затвердженого наказом Державного комітету України з нагляду за охороною праці від 26.01.2005 N 15 (z0231-05), зареєстрованого в Міністерстві юстиції України 15.02.2005 за N 231/10511 (НПАОП 0.00-4.12-05) [26].

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

Відповідальна організація НУХТ, каф. ТЖХТ	Технічне узгодження Романова О.О.	Вид документа Пояснювальна записка	Статус документа			
Власник документа НУХТ	Розробник документа Синчук С.А.	Назва, додаткова назва РОЗДІЛ 6 ОХОРОНА ПРАЦІ	ННІХТ.ХТ-4-14.025.161.072.КР.ПЗ			
	Документ затверджено Носенко Т.Т.		Інд. змін.	Дата видання 01.05.2025	Мова ua	Аркуші 72/79

здоров'я України від 21.05.2007 N 246 (z0846-07), зареєстрованим у Міністерстві юстиції України 23.07.2007 за N 846/14113 [26].

Працівники підприємств основної хімічної промисловості на роботах із шкідливими та небезпечними умовами праці, а також роботах, пов'язаних із забрудненням або здійснюваних у несприятливих температурних умовах, забезпечуються спеціальним одягом, спеціальним взуттям та засобами індивідуального захисту ЗІЗ. ЗІЗ мають відповідати чинним національним стандартам та вимогам Технічного регламенту засобів індивідуального захисту [26].

Загальні вимоги безпеки до виробництв основної хімічної промисловості.

Під час технологічних процесів на підприємствах основної хімічної промисловості відповідно до технологічних регламентів на працівників можуть діяти небезпечні та шкідливі виробничі чинники, які класифіковано в ГОСТ 12.0.003-74 "ССБТ. Опасные и вредные производственные факторы. Классификация" [26].

Фізичні шкідливі чинники:

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

- підвищена або знижена рухомість повітря;
- підвищене значення напруги в електричному контурі, замикання якого може відбуватися через тіло людини;
- підвищений рівень статичної електрики;
- підвищений рівень електромагнітного випромінювання;
- відсутність або недостатність природного світла;
- недостатня освітленість робочої зони [26].

Хімічні шкідливі чинники:

- за характером впливу на організм людини:

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

- за шляхом проникнення в організм людини через:

- органи дихання;
- органи травлення;
- шкірні покриви і слизові оболонки [26].

Психофізіологічні шкідливі чинники:

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

Показники мікроклімату в межах робочої зони виробничих приміщень під час виробництва на підприємствах основної хімічної промисловості мають відповідати вимогам Санітарних норм мікроклімату виробничих приміщень, затверджених постановою головного державного санітарного лікаря України від 01.12.99 N 42 (va042282-99) (ДСН 3.3.6.042-99) [26].

Електропостачання та електрообладнання.

В електричних схемах машин і обладнання має бути передбачено захист від

перевантаження та короткого замикання, який забезпечує автоматичне розвантаження або відключення [26].

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

Усе електрообладнання (корпуси електричних машин, апаратів, світильників, розподільчих пристроїв, металеві корпуси пересувних та переносних електроприймачів) повинно мати надійне захисне заземлення та/або занулення [26].

ВИСНОВКИ

1. Під час виконання роботи було здійснено вичерпне дослідження яблучної кислоти, в ході якого були опрацьовані літературні джерела. Було визначено основні відомості про яблучну кислоту як хімічну речовину $C_4H_6O_5$, а також як харчову добавку E296. Описано фізичні та хімічні властивості сполуки, а також зазначено сфери та приклади застосування.

2. Кваліфікаційна робота містить огляд різних технологій виробництва яблучної кислоти, а також опис його сировинної бази. Особливу увагу зосереджено на технології отримання із малеїнового ангідриду. Для цієї технології було розроблено удосконалення виробництва шляхом установа в хему центрифуги Andritz P1600 що допогло опитимізувати виробництво та скоротити витрати.

3. Розроблено принципову і апаратурно-технологічну схеми виробництва. Також був розрахований матеріальний баланс для даної технології, враховуючи проведені розрахунки, було виявлено що для виробництва із продуктивністю 1,250 т/добу, використовується 3710 кг вихідної сировини. Технологічні втрати становлять 5% від маси цільового продукту.

4. Також було проведено економічний розрахунок, результати свідчать про вартість виготовлення 1,250 т яблучної кислоти, яка становить 603 014,67 грн. Рентабельність виробництва становить 31,1 %. Задля впровадження цієї технології було обрано відповідне технологічне обладнання, яке відповідає усім вимогам продуктивності процесу виробництва.

5. Розраховано барабанну сушарку, габаритні розміри якої 4196*1781 мм та потужністю 3,58 кВт, продуктивність складає 300 кг/год.

Відповідальна організація НУХТ, каф. ТЖХТ	Технічне узгодження Романова О.О.	Вид документа Пояснювальна записка	Статус документа			
Власник документа НУХТ	Розробник документа Синчук С.А.	Назва, додаткова назва ВИСНОВКИ	ННІХТ.ХТ-4-14.025.161.076.КР.ПЗ			
	Документ затверджено Носенко Т.Т.		Інд. змін.	Дата видання 01.05.2025	Мова ua	Аркуш 76/79

СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ

1. E 296 – Яблучна кислота. Dobavkam.net. URL: <https://uk.dobavkam.net/additives/e-296>(дата звернення: 20.05,2025.)
2. Яблучна кислота: властивості і застосування. Food and Health. URL: <https://flexi.com.ua/?p=3502>(дата звернення: 26.05.2025.)
3. Final report on the safety assessment of Malic Acid and Sodium Malate. International Journal of Toxicology. 2001. URL: <https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/11358110/>
4. Яблучна кислота. Citric Acid. URL: <https://citricacid.com.ua/apple/>(дата звернення: 01.06.2025.)
5. Kawase Y., Yamaguchi M. Kinetics of hydrolysis of maleic anhydride in aqueous solution // Chemical Engineering Journal. 2001. Vol. 83, No. 1. P. 83-88.
6. Oshima Y., Tsubaki N. Maleic anhydride synthesis by catalytic oxidation // Catalysis Today. 2018. Vol. 298. P. 80-87.
7. Lorences M.J., Patience G.S., Díez F.V., Coca J. Maleic anhydride production: hot spot detection and model validation // The Canadian Journal of Chemical Engineering. 2003. Vol. 81, No. 2. P. 130-136.
8. Dias C.R., Portela M.F., Bond G.C. Oxidation of n-butane to maleic anhydride over VPO catalysts: An overview // Catalysis Reviews. 1996. Vol. 38, No. 3. P. 101-145.
9. Contractor R.M. Dupont's CFB technology for maleic anhydride // Chemical Engineering Science. 1999. Vol. 54, No. 22. P. 5627-5632.
10. Roa Engel C.A., Straathof A.J.J., Zijlmans T.W., van Gulik W.M., van der Wielen L.A.M. Fumaric acid production by fermentation // Applied Microbiology and Biotechnology. 2008. Vol. 78, No. 3. P. 379-389.
11. Zeikus J.G., Jain M.K., Elankovan P. Biotechnology of succinic acid production and markets for derived industrial products // Applied Microbiology and Biotechnology. 1999. Vol. 51, No. 5. P. 545-552.

<i>Відповідальна організація</i> НУХТ, каф. ТЖХТ	<i>Технічне узгодження</i> Романова О.О.	<i>Вид документа</i> Пояснювальна записка	<i>Статус документа</i>					
<i>Власник</i> НУХТ	<i>Розробник</i> Синчук С.А. <i>Документ затверджено</i> Носенко Т.Т.	<i>Власник</i> НУХТ	<i>Вид документа</i> Пояснювальна записка	<i>Статус документа</i> КВІЗ	<i>Інд. змін.</i>	<i>Дата видання</i> 01.05.2025	<i>Мова</i> ua	<i>Аркуш</i> 77/79

13. Kawase Y., Yamaguchi M. Kinetics of hydrolysis of maleic anhydride in aqueous solution // *Chemical Engineering Journal*. 2001. Vol. 83, No. 1. P. 83-88.
14. Zeikus J.G., Jain M.K., Elankovan P. Biotechnology of succinic acid production and markets for derived industrial products // *Applied Microbiology and Biotechnology*. 1999. Vol. 51, No. 5. P. 545-552.
15. Roa Engel C.A., Straathof A.J.J., Zijlmans T.W., van Gulik W.M., van der Wielen L.A.M. Fumaric acid production by fermentation // *Applied Microbiology and Biotechnology*. 2008. Vol. 78, No. 3. P. 379-389.
16. Bozell J.J., Petersen G.R. Technology development for the production of biobased products from biorefinery carbohydrates—the US Department of Energy's "Top 10" revisited // *Green Chemistry*. 2010. Vol. 12, No. 4. P. 539-554.
17. Doherty W.O.S., Mousavioun P., Fellows C.M. Value-adding to cellulosic ethanol: Lignin polymers // *Industrial Crops and Products*. 2011. Vol. 33, No. 2. P. 259-276.
18. Chaudhary K., Sangwan N.S., Sabharwal V.P. Malic acid production: A review of recent trends and future prospects // *Biotechnology Advances*. 2017. Vol. 35, No. 6. P. 649-669.
19. Payne G.F., Payne N.N., Shuler M.L., Asada M. In situ adsorption for enhanced production of organic acids // *Biotechnology and Bioengineering*. 1991. Vol. 37, No. 8. P. 717-721.
20. Knuf C., Nielsen J. *Aspergilli: systems biology and industrial applications* // *Biotechnology Journal*. 2012. Vol. 7, No. 9. P. 1147-1155.
21. Brown S.H., Bashkirova L., Berka R., Chandler T., Doty T., McCall K., McCulloch M., McFarland S., Thompson S., Yaver D. Metabolic engineering of *Aspergillus oryzae* NRRL 3488 for increased production of L-malic acid // *Applied Microbiology and Biotechnology*. 2013. Vol. 97, No. 20. P. 8903-8912.
22. Калашніков Д.І. Косметична хімія. — К.: Освіта України, 2019. — С. 176-179.
23. Сирохман І.В. Товарознавство харчових продуктів функціонального призначення. — К.: Ліра-К, 2009. — С. 187-189.
24. Опейда Й.О., Швайка О.П. Тлумачний термінологічний словник з органічної та фізико-органічної хімії. — Київ: Наукова думка, 2018. — 532 с.

25. Bauer F., Tilsted J. P., Pfister S., Oberschelp C., Kulionis V. Mapping GHG emissions and prospects for renewable energy in the chemical industry. 2023. Current Opinion in Chemical Engineering, Volume 39. URL: <https://doi.org/10.1016/j.coche.2022.100881> . (дата звернення: 25.05.2025.)

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