

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

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

**«До захисту в ЕК»**  
Директор інституту ННІХТ  
Оксана КОЧУБЕЙ-  
ЛИТВИНЕНКО  
(підпис) (Ім'я, ПРІЗВИЩЕ)  
«\_\_» лютого 2026 р.

**«До захисту допущено»**  
Завідувач кафедри ТЖХТ  
Тамара НОСЕНКО  
(підпис) (Ім'я, ПРІЗВИЩЕ)  
«\_\_» лютого 2026 р.

**КВАЛІФІКАЦІЙНА РОБОТА  
НА ЗДОБУТТЯ ОСВІТНЬОГО СТУПЕНЯ БАКАЛАВРА**

зі спеціальності 161 Хімічні технології та інженерія  
(код та назва спеціальності)  
освітньо-професійної програми Хімічна технологія  
на тему: Технологія отримання фумарової кислоти

Виконав: здобувач 5 курсу, групи ЗХТ-5-3

КУЛИК Катерина Сергіївна  
(прізвище, ім'я та по батькові повністю) (підпис)

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

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

\_\_\_\_\_  
(Ім'я ПРІЗВИЩЕ) (підпис)

\_\_\_\_\_  
(Ім'я ПРІЗВИЩЕ) (підпис)

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

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

Здобувач(ка) \_\_\_\_\_  
(підпис)

Київ – 2026 р.

# НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ ХАРЧОВИХ ТЕХНОЛОГІЙ

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

Освітній ступінь бакалавр

Спеціальність 161 Хімічні технології та інженерія  
(код і назва)

Освітньо-професійна програма Хімічна технологія  
(назва)

**ЗАТВЕРДЖУЮ**

Завідувач кафедри ТЖХТ

Тамара НОСЕНКО

“ ” 2025 року

## ЗАВДАННЯ

### НА КВАЛІФІКАЦІЙНУ РОБОТУ ЗДОБУВАЧА

Кулик Катерина Сергіївна

(прізвище, ім'я, по батькові)

1. Тема роботи Технологія отримання фумарової кислоти

керівник роботи БІЛА Галина Миколаївна, к.х.н., доцент

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

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

2. Строк подання здобувачем роботи 04.02.2026 р.

3. Вихідні дані до роботи потужність виробництва 1000 кг/добу

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

5. Перелік графічного матеріалу

Лист 1. Принципова-технологічна схема, формат аркушу А1

Лист 2. Апаратурно-технологічна схема, формат аркушу А1

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

## 6. Консультанти розділів роботи

Розділ	Прізвище, ініціали та посада консультанта	Підпис, дата	
		завдання видав	завдання прийняв
Технологічна частина	Житнецький І.В., доцент, к.т.н.	05.01.2026	30.01.2026

7. Дата видачі завдання \_\_\_\_\_ 05 листопада 2025 р. \_\_\_\_\_

## КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

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

**Здобувач**

\_\_\_\_\_ (підпис)

**Катерина КУЛИК**

(Ім'я ПРІЗВИЩЕ)

**Керівник роботи**

\_\_\_\_\_ (підпис)

**Галина БІЛА**

(Ім'я ПРІЗВИЩЕ)

## РЕФЕРАТ

**Кулик К.С.: Технологія виробництва фумарової кислоти**

ПОЯСНЮВАЛЬНА ЗАПИСКА: 75 С., 4 РИС., 9 ТАБЛ., 29  
ЛІТЕРАТУРНИХ ДЖЕРЕЛ.

В даній кваліфікаційній роботі проведено літературний аналіз та узагальнено інформацію про технологію отримання фумарової кислоти.

Описано основні та додаткові сировинні матеріали для виробництва фумарової кислоти.

Проведено опис технології виробництва фумарової кислоти. Розроблено принципову і апаратурно-технологічну схеми отримання. Проведено розрахунок матеріального балансу хіміко-технологічного процесу, а також надано техніко-економічне обґрунтування запропонованого способу виробництва.

Здійснено підбір основного технологічного обладнання відповідно до виробничої лінії. Наведено розрахунок основного апарату.

Запропоновано заходи з охорони праці та навколишнього середовища для даного підприємства.

КЛЮЧОВІ СЛОВА: ХАРЧОВА ДОБАВКА, ФУМАРОВА КИСЛОТА, ТЕХНОЛОГІЯ, МАЛЕЇНОВИЙ АНГІДРИД, ВОДА, ІЗОМЕРИЗАЦІЯ, РЕАКТОР, МАЛЕЇНОВА КИСЛОТА.

## **ABSTRACT**

**Kulyk K.S.:** Technology of fumaric acid production

EXPLANATORY NOTE: 75 P., 4 FIG., 9 TABLES, 29 LITERATURE SOURCES.

This qualification work has conducted a literature analysis and summarized information on the technology of fumaric acid production.

The main and additional raw materials for the production of fumaric acid are described.

The technology of fumaric acid production is described. The principle and equipment-technological scheme of production is developed. The material balance of the chemical-technological process is calculated, and the feasibility study of the proposed production method is provided.

The main technological equipment is selected in accordance with the production line. The calculation of the main apparatus is provided.

Occupational and environmental protection measures are proposed for this enterprise.

**KEYWORDS:** FOOD ADDITIVE, FUMARIC ACID, TECHNOLOGY, MALEIC ANHYDRIDE, WATER, ISOMERIZATION, REACTOR, MALEIC ACID.

## ЗМІСТ

ВСТУП.....	8
РОЗДІЛ I АНАЛІТИЧНИЙ ОГЛЯД ЛІТЕРАТУРИ.....	10
1.1 Властивості харчової добавки.....	10
1.2 Економічність та вплив на навколишнє середовище.....	13
1.3 Галузі використання харчової добавки.....	15
1.4 Стан сировинної бази.....	18
1.5 Аналіз існуючих технологій виробництва харчової добавки.....	19
1.6 Шляхи удосконалення технології отримання харчової добавки.....	30
РОЗДІЛ II ТЕХНОЛОГІЧНА ЧАСТИНА.....	31
2.1 Характеристика вихідної сировини для виробництва.....	31
2.2 Принципово-технологічна схема виробництва.....	37
2.3 Матеріальний розрахунок.....	38
2.4 Розрахунок та підбір основного обладнання.....	44
2.5 Опис апаратурно-технологічної схеми.....	56
РОЗДІЛ III ТЕХНІКО-ЕКОНОМІЧНЕ ОБҐРУНТУВАННЯ.....	58
РОЗДІЛ IV ОРГАНІЗАЦІЯ КОНТРОЛЮ ЯКОСТІ ПРОДУКЦІЇ.....	61
РОЗДІЛ V ЕКОЛОГІЧНА ЧАСТИНА.....	67
5.1 Охорона праці на підприємстві.....	67
5.2 Заходи з охорони навколишнього середовища на виробництві.....	71
ВИСНОВКИ.....	74
СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ.....	75

Відповідальна організація НУХТ, каф. ТЖХТ	Технічне узгодження Біла Г.М	Вид документа Пояснювальна записка	Статус документа			
Власник документа  НУХТ	Розробник документа Кулик К.С.	Назва, додаткова назва  ЗМІСТ	ННІХТ.ЗХТ-5-3.026.161.009.КП.ПЗ			
	Документ затверджено Носенко Т.Т.		Інд. змін.	Дата видання	Мова ua	Аркуш 6/75

## ВСТУП

На сучасному етапі розвитку харчової та хімічної промисловості особлива увага приділяється пошуку та впровадженню ефективних технологій отримання органічних кислот, серед яких фумарова кислота (харчова добавка E297) займає стратегічне місце. Завдяки своїм унікальним властивостям — низькій гігроскопічності, тривалому підкислювальному ефекту та бактерицидним властивостям — вона широко використовується у виробництві напоїв, кондитерських виробів, а також у фармацевтичній галузі та тваринництві.

Розвиток ринку потребує не лише збільшення обсягів виробництва, а й докорінної модернізації існуючих технологічних ліній. Традиційний метод отримання фумарової кислоти шляхом каталітичної ізомеризації малеїнової кислоти залишається основним, проте він потребує вдосконалення в напрямку підвищення виходу цільового продукту, зниження енергомісткості процесів та мінімізації антропогенного навантаження на довкілля. Це робить обрану тему дослідження актуальною та практично значущою.

**Мета роботи** — технологія отримання фумарової кислоти для підвищення її техніко-економічної ефективності, забезпечення стабільно високої якості продукції відповідно до стандартів харчової галузі та зниження виробничих втрат.

**Об'єкт дослідження** — технологічний процес виробництва фумарової кислоти хімічним методом ізомеризації малеїнового ангідриду.

**Предмет дослідження** — параметри апаратурно-технологічного оформлення, показники матеріального та теплового балансів, а також заходи з контролю якості та безпеки виробництва.

Відповідальна організація НУХТ, каф. ТЖХТ	Технічне узгодження Біла Г.М	Вид документа Пояснювальна записка	Статус документа			
Власник документа НУХТ	Розробник документа Кулик К.С.	Назва, додаткова назва ВСТУП	ННІХТ.ЗХТ-5-3.026.161.007.КП.ПЗ			
	Документ затверджено Носенко Т.Т.		Інд. змін.	Дата видання	Мова ua	Аркуш 7/75

**Для досягнення поставленої мети було визначено такі завдання:**

- проаналізувати сучасний стан світового та вітчизняного виробництва фумарової кислоти та властивості основної сировини;
- обґрунтувати вибір оптимальної технологічної схеми та розробити апаратне оформлення процесу;
- здійснити розрахунок матеріального балансу виробництва з урахуванням мінімізації технологічних втрат;
- запропонувати рішення з охорони праці та захисту навколишнього природного середовища для проєктованого виробництва.

**Наукова новизна та практичне значення результатів.** Запропоновано модернізовану схему виділення продукту, що дозволяє скоротити цикл кристалізації та підвищити чистоту фумарової кислоти до рівня **99,6%**. Розраховані параметри обладнання можуть бути використані при проєктуванні нових або реконструкції діючих цехів малотоннажної хімії. Впровадження запропонованих рішень забезпечує зниження собівартості продукції на одиницю маси та підвищує екологічну безпеку виробничого циклу.

## РОЗДІЛ І АНАЛІТИЧНИЙ ОГЛЯД ЛІТЕРАТУРИ

### 1.1 Властивості харчової добавки

Фумарова кислота, яка в міжнародній класифікації харчових добавок відома під індексом E297, є однією з найбільш ефективних і водночас безпечних органічних кислот, що використовуються в сучасній харчовій промисловості. Її унікальність починається з того, що вона є природним метаболітом, присутнім практично в усіх живих клітинах як проміжний продукт циклу трикарбонових кислот, або циклу Кребса [1]. Саме цей біологічний факт забезпечує високий рівень довіри до неї з боку регуляторних органів, оскільки організм людини має налагоджені ферментативні шляхи для її повної переробки в енергію [2]. Структурну формулу фумарової кислоти зображено на рисунку 1.1:

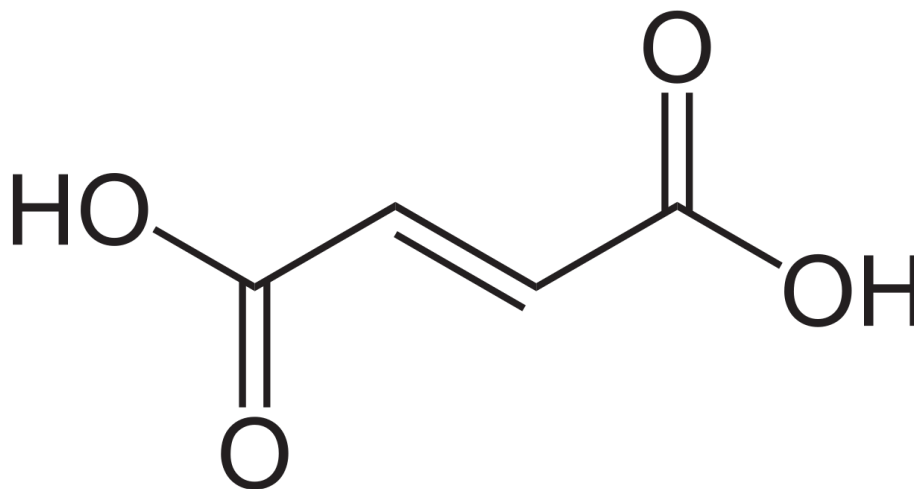


Рисунок 1.1 Структурна формула фумарової кислоти

З точки зору фізичної хімії, фумарова кислота являє собою білу кристалічну речовину, яка суттєво відрізняється від інших популярних харчових кислот своїми термічними та розчинними властивостями.

Відповідальна організація НУХТ, каф. ТЖХТ	Технічне узгодження Біла Г.М	Вид документа Пояснювальна записка	Статус документа			
Власник документа  НУХТ	Розробник документа Кулик К.С.	Назва, додаткова назва  РОЗДІЛ І АНАЛІТИЧНИЙ ОГЛЯД ЛІТЕРАТУРИ	ННІХТ.ЗХТ-5-3.026.161.009.КП.ПЗ			
	Документ затверджено Носенко Т.Т.		Інд. змін.	Дата видання	Мова ца	Аркуш 9/75

Вона має дуже високу температуру плавлення, що сягає близько 287°C, що робить її надзвичайно стабільною під час термічної обробки продуктів [1]. Однак найбільш специфічною рисою є її низька розчинність у воді — при температурі 25°C у літрі води можна розчинити лише трохи більше 6 грамів цієї сполуки [1]. Хоча на перший погляд це може здатися технологічним недоліком, насправді ця властивість робить фумарову кислоту незамінною в продуктах, де потрібно уникати передчасного зволоження або де необхідне поступове вивільнення кислотності.

Порівнюючи її з лимонною чи яблучною кислотами, експерти наголошують на її вражаючій підкислювальній здатності. Наукові дані свідчать, що фумарова кислота є найсильнішою серед органічних харчових кислот: для досягнення однакового рівня зниження рН її потрібно приблизно в півтора рази менше, ніж лимонної [2]. Це дозволяє виробникам не лише економити на кількості інгредієнтів, а й отримувати продукт із дуже чистим, вираженим кислим смаком, який має здатність довше зберігатися на рецепторах, створюючи тривалий післясмак [1].

Процес отримання фумарової кислоти пройшов довгу еволюцію від суто хімічного синтезу до передових біотехнологій. Традиційно її виробляли шляхом каталітичної ізомеризації малеїнової кислоти, але сучасні огляди все більше фокусуються на ферментації. Використання мікроскопічних грибів, зокрема видів *Rhizopus oryzae*, дозволяє перетворювати відновлювану вуглеводну сировину (таку як глюкоза або гідролізати крохмалю) на високоякісну фумарову кислоту [1]. У процесі такого біосинтезу клітини грибів фіксують молекули вуглекислого газу, що робить цей метод не лише економічно вигідним, а й екологічно привабливим [1]. Отриманий таким чином продукт проходить глибоке очищення, щоб вміст основної речовини складав не менше 99,0%, а домішки, такі як малеїнова кислота, не перевищували суворого порогу в 0,1% [2].

У хлібопекарській галузі фумарова кислота виконує роль не просто підкислювача, а справжнього модифікатора текстури. У виробництві пшеничних тортилій та деяких видів житнього хліба вона взаємодіє з білками клейковини. Завдяки здатності розривати певні дисульфідні зв'язки в глютені, вона робить тісто більш пластичним, еластичним і легким для розкачування [2]. Це запобігає розривам тіста під час механічної обробки та забезпечує м'якість готового виробу протягом тривалого часу. Також, швидке зниження рН тіста, яке забезпечує ця кислота, допомагає краще контролювати роботу дріжджів та пригнічує ріст небажаних бактерій картопляної хвороби [1].

Для кондитерської промисловості та виробництва напоїв фумарова кислота є ідеальним компонентом сухих сумішей. Оскільки вона практично не гігроскопічна (не вбирає вологу з повітря), порошки для приготування миттєвих напоїв або желе залишаються розсипчастими навіть у вологому середовищі і не злежуються в грудки [1]. У рідких продуктах, таких як фруктові соки та ароматизовані води, вона виступає стабілізатором смако-ароматичного профілю та допомагає зберегти колір продукту, запобігаючи окисленню природних пігментів [2].

Фумарова кислота також високо ефективна проти патогенних мікроорганізмів, зокрема таких як *Listeria monocytogenes* та *Escherichia coli* [1]. Механізм цієї дії полягає в тому, що недисоційовані молекули кислоти легко проникають крізь ліпідну оболонку бактеріальної клітини. Опинившись всередині, де рН середовища вищий, кислота розпадається на іони, що різко закислює внутрішній простір бактерії та призводить до її загибелі [1].

У виноробстві використання фумарової кислоти дозволяє розв'язати специфічну проблему — контроль яблучно-молочного бродіння. Додавання цієї сполуки ефективно пригнічує активність молочнокислих бактерій, що дає виноробам можливість зупинити процес бродіння в потрібний момент [2]. Це особливо важливо для збереження свіжості та фруктової кислинки білих і

рожевих вин, а також дозволяє суттєво знизити дозування діоксиду сірки, що позитивно впливає на екологічність та безпечність кінцевого продукту [2].

Безпека споживання добавки E297 підтверджена численними токсикологічними дослідженнями. Оскільки фумарова кислота всмоктується в кишечнику і миттєво включається в природний енергетичний обмін, вона не накопичується в тканинах і не викликає токсичних ефектів [2]. Об'єднаний комітет експертів ФАО/ВООЗ з харчових добавок (JECFA) встановив для неї статус ADI "не обмежено", що є найвищою оцінкою безпеки для харчового інгредієнта [2]. Дослідження на довготривалу токсичність та канцерогенність показали відсутність будь-яких негативних впливів на організм при дотриманні технологічних норм [1].

## 1.2 Економічність та вплив на навколишнє середовище

Традиційна економіка виробництва фумарової кислоти протягом десятиліть базувалася на нафтохімічному синтезі, де основним методом є каталітична ізомеризація малеїнової кислоти, отриманої з бензолу або н-бутану [1]. Цей шлях залишається комерційно привабливим завдяки низькій вартості сировини та високій ефективності перетворення, проте він напряду залежить від волатильності цін на нафту та газ, що створює економічні ризики для довгострокового планування в харчовій індустрії [1]. На противагу цьому, біотехнологічне виробництво фумарової кислоти шляхом ферментації з використанням мікроорганізмів роду *Rhizopus* демонструє потенціал для стабілізації витрат, оскільки дозволяє використовувати різноманітні джерела вуглеводів, від очищеної глюкози до відходів сільського господарства [2].

Аналіз витрат у біо-виробництві показує, що вартість сировини становить від 45% до 60% від загальної собівартості готового продукту [1]. Це стимулює пошук більш дешевих субстратів, таких як кукурудзяний сироп, меляса або целюозна біомаса. Економічна доцільність ферментаційного методу також значно залежить від стадії "downstream processing" — очищення продукту після

бродіння. Оскільки фумарова кислота має низьку розчинність, її виділення з ферментаційного середовища є менш енерговитратним порівняно з іншими органічними кислотами, що знижує загальні операційні витрати на виробництво [1]. Це робить її одним із найбільш перспективних біо-продуктів серед усіх дикарбонових кислот [2].

Екологічний профіль фумарової кислоти розглядається через призму її вуглецевого сліду та здатності до біорозкладу. На відміну від нафтохімічного методу, який супроводжується значними викидами парникових газів і споживанням невідновлюваних ресурсів, мікробіологічний синтез є процесом із потенційно від'ємним або нейтральним рівнем викидів вуглецю [1]. Ключовою особливістю метаболізму грибів *Rhizopus* під час виробництва фумарату є фіксація вуглекислого газу через фермент піруваткарбоксилазу. Фактично, на кожну молекулу виробленої фумарової кислоти споживається одна молекула вуглекислого газу, що робить це виробництво формою утилізації парникових газів [1].

З точки зору впливу на навколишнє середовище після використання, фумарова кислота є повністю біорозкладною сполукою. Як природний учасник циклу Кребса, вона швидко асимілюється мікроорганізмами в ґрунті та воді, не залишаючи токсичних залишків або стійких забруднювачів [2]. Це різко контрастує з деякими синтетичними консервантами, які можуть накопичуватися в екосистемах. Крім того, при використанні фумарової кислоти в промислових масштабах для очищення стічних вод або як добавку до кормів, вона сприяє зниженню викидів метану у жуйних тварин, що є додатковим позитивним екологічним ефектом [1].

Економічна ефективність застосування фумарової кислоти безпосередньо в харчових технологіях зумовлена її високою функціональною концентрацією. Оскільки вона є найсильнішою органічною кислотою за здатністю знижувати рН, виробники можуть досягати необхідних технологічних результатів, використовуючи на 25–40% менше речовини

порівняно з лимонною чи яблучною кислотами [2]. Це призводить до зменшення логістичних витрат, скорочення обсягів складського зберігання та зменшення кількості пакувальних матеріалів, що в сукупності дає відчутний економічний і екологічний вигравш для підприємств [1].

На завершення, перехід до "зеленого" виробництва фумарової кислоти стимулюється не лише екологічними стандартами, а й вимогою сталого розвитку ринку. Використання відновлюваної сировини (біомаси) замість викопного палива дозволяє зменшити загальне енергоспоживання процесу на 30–50%, що є критичним фактором в умовах зростання цін на енергоносії [2].

### **1.3 Галузі використання харчової добавки**

Використання фумарової кислоти в сучасній харчовій промисловості визначається її специфічною хімічною структурою, яка забезпечує значні переваги над іншими органічними кислотами. Як зазначається в оглядах, фумарова кислота є найсильнішою органічною кислотою, доступною для харчового використання, що безпосередньо впливає на економіку виробництва: її висока ефективність дозволяє досягати цільових рівнів рН при значно менших дозах, ніж це можливо з лимонною або молочною кислотами [3]. Це робить її критично важливим компонентом для розробки рецептур, де необхідно мінімізувати вплив на загальну вагу інгредієнтів, зберігаючи при цьому інтенсивність підкислення.

У хлібопекарській галузі фумарова кислота відіграє роль не лише регулятора кислотності, а й активного агента, що впливає на реологію тіста. При роботі з пшеничним борошном додавання E297 дозволяє суттєво скоротити час замішування [4]. Це відбувається завдяки здатності кислоти взаємодіяти з білковим каркасом тіста, що робить його більш піддатливим до механічної обробки. Особливо це помітно у виробництві продуктів швидкого приготування та заморожених напівфабрикатів, де стабільність текстури після розморожування та випікання є ключовим показником якості. Фумарова

кислота допомагає підтримувати структуру пор, запобігаючи осіданню хліба та забезпечуючи рівномірний об'єм готового виробу [3].

Специфіка використання фумарової кислоти в кондитерському виробництві базується на її низькій розчинності та відсутності гігроскопічності. У виробництві сухих сумішей для желе та пудингів вона запобігає поглинанню вологи з повітря, що критично для збереження сипучості порошку протягом тривалого зберігання [4]. Більш того, під час процесу застигання десертів фумарова кислота забезпечує поступове зниження рН, що дозволяє пектиновим та желатиновим структурам формуватися більш рівномірно і міцно [3]. Це виключає появу неоднорідностей у текстурі та синерезису (виділення вологи) у готових продуктах.

М'ясопереробна галузь використовує фумарову кислоту як потужний засіб для підвищення мікробіологічної безпеки. Встановлено, що додавання фумарату в процесі обробки туш птиці або при приготуванні м'ясних маринадів дозволяє ефективно контролювати популяції патогенних бактерій [3]. Завдяки здатності швидко проникати через клітинні мембрани мікроорганізмів, фумарова кислота дестабілізує їхній метаболізм, що призводить до інактивації бактерій без необхідності застосування високих температур [4]. Це допомагає зберегти органолептичні властивості м'яса, зокрема його колір та соковитість, оскільки зниження рН сприяє утриманню вологи в м'язових волокнах [3].

У виробництві напоїв, особливо тих, що мають фруктові смаки, фумарова кислота цінується за її здатність стабілізувати ароматичні сполуки. Вона має унікальну властивість "маскувати" металеві або гіркі присмаки, які можуть з'являтися при використанні штучних підсолоджувачів або певних вітамінних добавок [4]. Крім того, її кислий профіль сприймається як більш тривалий, що дозволяє створювати напої з глибоким, багатогранним смаком, який не зникає миттєво після ковтка [3]. Економічний аспект тут також є вагомим: оскільки для досягнення потрібної кислотності потрібно менше речовини, зменшується собівартість одиниці продукції без втрати її якості [4].

Окремим важливим сегментом є використання фумарової кислоти у виробництві сирів та молочних продуктів. Вона може застосовуватися як коагулянт для прямого підкислення молока, що дозволяє виключити або скоротити етап біологічного дозрівання за допомогою бактеріальних культур [3]. Це значно прискорює виробничий цикл таких сирів як моцарела або домашній сир. При цьому фумарова кислота забезпечує високий вихід продукту та характерну текстуру, яка добре зберігається під час транспортування [4].

Екологічна перевага фумарової кислоти полягає в тому, що вона є повністю біорозкладною і не залишає шкідливих відходів у стічних водах підприємств [3]. Її метаболічний шлях у природному середовищі добре вивчений, що робить її ідеальним вибором для компаній, які прагнуть до сталого виробництва та мінімізації негативного впливу на екосистеми. Навіть у великих концентраціях вона не виявляє токсичності для водних організмів, що підтверджується численними екологічними тестами [4].

Підсумовуючи, можна стверджувати, що фумарова кислота є універсальним інструментом у руках харчового технолога. Вона дозволяє вирішувати комплексні завдання: від стабілізації структури тіста до забезпечення довготривалої мікробіологічної чистоти м'ясної продукції [3]. Завдяки своїм фізико-хімічним перевагам, таким як низька гігроскопічність та висока кислотна сила, вона залишається конкурентоспроможною альтернативою більш традиційним харчовим кислотам, пропонуючи при цьому кращі показники економічності та безпеки [4].

#### **1.4 Стан сировинної бази**

Сучасний стан виробництва фумарової кислоти характеризується переходом від жорсткої залежності від нафтохімічних ресурсів до розширення використання відновлюваної біомаси. Фумарова кислота традиційно вироблялася переважно шляхом хімічної ізомеризації малеїнової кислоти, яку

отримують при окисленні бензолу або н-бутану [5]. Ця сировинна база протягом десятиліть забезпечувала світовий ринок дешевою кислотою, проте її екологічний слід та вичерпність викопних ресурсів стали головними стимулами для пошуку альтернатив. Економічна стабільність нафтохімічного методу на пряму корелює з цінами на енергоносії, що робить цей ланцюжок постачання вразливим до геополітичних змін [6].

#### *Перехід до вуглеводної сировини першого покоління*

Основним напрямком розвитку біотехнологічної сировинної бази є використання чистих вуглеводів, таких як глюкоза, сахароза та крохмальні гідролізати. У промислових масштабах ці субстрати отримують із кукурудзи, цукрової тростини та цукрового буряка [5]. Глюкоза вважається "золотим стандартом" сировини, оскільки мікроорганізми, зокрема гриби роду *Rhizopus*, засвоюють її з найвищою швидкістю та мінімальним утворенням побічних продуктів [7]. Проте використання такої сировини стикається з серйозними викликами: висока ціна рафінованих цукрів може складати до 60% від вартості готового продукту, а конкуренція з харчовим сектором створює етичні проблеми [8].

Використання крохмалевмісної сировини потребує додаткової стадії ферментативного гідролізу для перетворення складних полісахаридів на прості цукри. Це дещо здорожує процес, але дозволяє використовувати дешевші аграрні культури як вихідний матеріал [6]. Статистичні дані свідчать, що навіть при використанні оптимізованих штамів, економічна ефективність виробництва фумарату з чистої глюкози залишається низькою порівняно з нафтохімічним аналогом, що змушує індустрію звертати увагу на ресурси другого покоління [5].

#### *Лігноцелюозна біомаса як стратегічний ресурс*

Лігноцелюозні відходи — солома пшениці, кукурудзяні стебла, деревна тріска та відходи паперової промисловості — представляють собою найбільш об'ємну та сталу сировинну базу [7]. Ця сировина складається з целюлози,

геміцелюлози та лігніну, що робить її складною для прямого використання мікроорганізмами. Для вивільнення цукрів необхідна попередня фізико-хімічна обробка, така як вибуховий паровий гідроліз або обробка розведеними кислотами [8]. Хоча лігноцелюлоза є значно дешевшою за зернові культури, процес її підготовки супроводжується утворенням інгібіторів (фурфуролу, фенольних сполук), які пригнічують життєдіяльність грибів-продуцентів [5].

Сучасні розробки 2023 року спрямовані на створення інтегрованих систем, де мікроорганізми здатні одночасно переробляти як шестивуглецеві (глюкоза), так і п'ятивуглецеві цукри (ксилоза), що містяться в гідролізатах деревини [7]. Це дозволяє максимально повно використовувати енергетичний потенціал рослинної сировини. Використання такої бази дозволяє знизити собівартість фумарової кислоти та зробити її виробництво частиною циркулярної економіки, де відходи аграрного сектору стають цінною хімічною сировиною [6].

#### *Промислові відходи: Гліцерин та молочна сироватка*

Важливим компонентом сучасної сировинної бази є побічні продукти паливної та харчової індустрій. Сирий гліцерин, що утворюється під час виробництва біодизеля, є надзвичайно перспективним джерелом вуглецю [5]. Його надлишок на ринку та низька вартість роблять його ідеальним субстратом для ферментації. Дослідження показують, що певні штами *Rhizopus oryzae* можуть ефективно перетворювати гліцерин на фумарову кислоту, причому цей процес супроводжується високим рівнем виходу продукту [8].

Молочна сироватка, що залишається після виробництва сиру, містить значну кількість лактози, яка також може бути використана як сировина [6]. Це особливо актуально для регіонів з розвиненим тваринництвом, де утилізація сироватки є екологічною проблемою. Використання лактози потребує специфічних мікроорганізмів або попереднього розщеплення на глюкозу та галактозу, але це дозволяє створювати локальні ланцюжки виробництва харчових добавок без залучення нових ресурсів [5].

### *Вуглекислий газ як побічна сировина*

Унікальність біотехнологічного виробництва фумарової кислоти полягає в тому, що під час синтезу сама кислота виступає як сток для вуглецю. Мікроорганізми в процесі карбоксилювання пірувату фіксують молекули  $\text{CO}_2$ , інтегруючи їх у структуру фумарату [7]. Це означає, що вуглекислий газ, який може постачатися з димових газів інших виробництв, фактично є одним із видів сировини [8].

### *Азотиста сировина та мікроелементи*

Окрім основного джерела вуглецю, виробничий процес потребує специфічних джерел азоту. Традиційне використання дорогих азотистих добавок, таких як дріжджовий екстракт або пептон, замінюється на більш дешеві аналоги: кукурудзяний екстракт (corn steep liquor) або гідролізати олійних шротів [5]. Контроль балансу вуглецю та азоту в сировинній суміші є критичним технологічним параметром. Як тільки в середовищі вичерпується азот, мікроорганізми припиняють ріст і починають інтенсивно виділяти фумарову кислоту як продукт захисного метаболізму [7]. Це вимагає від виробників точного налаштування сировинних рецептур залежно від походження субстрату.

## **1.5 Аналіз існуючих технологій виробництва харчової добавки**

### *Хімічна технологія: механізми та промислова реалізація*

Традиційний хімічний шлях залишається найбільш масштабованим методом виробництва фумарової кислоти завдяки своїй високій швидкості та передбачуваності результатів. В основі технології лежить ізомеризація малеїнової кислоти, яка сама по собі є продуктом гідратації малеїнового ангідриду [11]. Малеїновий ангідрид синтезується шляхом гетерогенного окислення н-бутану в присутності ванадієво-фосфорних оксидних каталяторів. Ця реакція відбувається при температурах 350–450°C [11].

Після отримання малеїнової кислоти в розчині починається етап ізомеризації в транс-форму (фумарову кислоту). Основним викликом тут є високий енергетичний бар'єр перетворення цис-ізомера в транс-ізомер. Для його подолання застосовуються специфічні каталізатори, такі як соляна кислота, тіосечовина або бромати [9]. Технологічний процес вимагає точного контролю концентрації каталізатора, оскільки від цього залежить не лише вихід, а й чистота продукту. Фумарова кислота, маючи значно нижчу розчинність, ніж малеїнова, випадає в осад у міру проходження реакції, що дозволяє легко відокремлювати її від маточного розчину [11]. Проте хімічна технологія критикується за утворення кислих стічних вод та складність повної очистки від залишків малеїнової кислоти, вміст якої в харчовій добавці суворо обмежений [10].

*Біотехнологічні шляхи: цитозольний rTCA цикл*

Біотехнологічна альтернатива базується на здатності нитчастих грибів, таких як *Rhizopus oryzae*, перетворювати вуглеводи на фумарат через відновлювальний шлях циклу трикарбонових кислот (rTCA), що локалізується в цитозолі клітини [9]. Цей шлях є унікальним, оскільки він дозволяє клітині не втрачати вуглець у вигляді молекул вуглекислого газу, а навпаки — фіксувати його. Ключовим моментом є реакція карбоксилювання пірувату під дією ферменту піруваткарбоксилази, в результаті чого утворюється оксалоацетат [9].

Наступний етап передбачає відновлення оксалоацетату до малату та подальшу дегідратацію малату до фумарату. Ці реакції каталізуються ферментами малатдегідрогеназою та фумаразою відповідно [11]. Технологічна перевага цього методу полягає в тому, що теоретичний вихід може досягати 2 моль фумарату на 1 моль глюкози, якщо забезпечено достатнє постачання вуглекислого газу та нейтралізуючих агентів [9]. Сучасні ферментаційні установки використовують надлишковий тиск вуглекислого газу або додавання карбонатних солей для стимуляції цього шляху [11].

### *Стратегії ферментації: контроль морфології та середовища*

Ефективність біотехнологічної технології критично залежить від фізичного стану грибного міцелію у ферментері. Гриби роду *Rhizopus* схильні до формування великих конгломератів, які погіршують масообмін кисню [9]. Технологія глибинної ферментації (SmF) передбачає використання спеціальних мішалок та барботерів для підтримки високої швидкості перенесення кисню. Для контролю морфології в поживне середовище додають мікроелементи (цинк, залізо, марганець), які впливають на міцність клітинної стінки та стимулюють утворення дрібних гранул (pellets), а не суцільної маси міцелію [9].

Важливим технологічним прийомом є двофазна ферментація. На першій фазі забезпечуються оптимальні умови для росту біомаси (високий вміст азоту, оптимальний рН). На другій фазі азот навмисно обмежується, що змушує гриб перемикатися на синтез органічних кислот як форму енергетичного депо [11]. Протягом усієї ферментації необхідно підтримувати рН в межах 5.0–6.5. Для цього використовують автоматичні системи дозування карбонату кальцію або гідроксиду натрію. Використання кальцію карбонату є класичним підходом, оскільки він одночасно слугує джерелом вуглекислого газу для метаболізму, проте це ускладнює подальшу стадію виділення через утворення гіпсу [10].

### *Downstream Processing: методи виділення та очищення*

Очищення фумарової кислоти з ферментаційного бульйону є найбільш енергоємним етапом технології. Якщо використовувався кальцієвий метод нейтралізації, першим кроком є підкислення бульйону сірчаною кислотою [10]. Це перетворює розчинний фумарат кальцію на вільну фумарову кислоту, яка випадає в осад через свою низьку розчинність у холодній воді. Проте при цьому утворюється велика кількість сульфату кальцію (гіпсу), що вимагає потужних систем фільтрації та центрифугування [10].

Для підвищення чистоти продукту до харчового стандарту (99%+) застосовуються методи перекристалізації з гарячої води та обробка активованим вугіллям для видалення пігментів, що утворюються під час

життєдіяльності грибів [11]. Останнім часом технологія очищення доповнюється використанням іонообмінних смол, які дозволяють селективно виділяти фумарат з розчину, уникаючи стадії осадження гіпсу [10]. Це значно зменшує обсяг твердих відходів та підвищує екологічність виробництва.

#### *Новітні технології: мембрани та електродіаліз*

Сучасна технологічна думка спрямована на впровадження безвідходних методів виділення. Одним із таких методів є електродіаліз з біполярними мембранами [10]. Ця технологія дозволяє розділяти солі фумарової кислоти на вільну кислоту та луг під дією електричного поля. Луг повертається у ферментер для підтримки рН, а концентрована кислота спрямовується на кристалізацію [9]. Це повністю виключає використання сірчаної кислоти та утворення гіпсу.

Іншим перспективним напрямком є інтегрована ферментація з одночасним вилученням продукту (in situ product recovery). У таких установках частина бульйону постійно циркулює через мембранний модуль, який відфільтровує кислоту, не пошкоджуючи живі клітини мікроорганізмів [10]. Це дозволяє підтримувати низьку концентрацію продукту в реакторі, що знімає ефект інгібування росту грибів самою кислотою і дозволяє проводити процес у безперервному режимі протягом багатьох тижнів [11].

#### *Порівняльна оцінка та майбутнє галузі*

Аналіз існуючих технологій показує, що хімічний синтез наразі виграє за рахунок низької вартості капітальних витрат (CAPEX), тоді як біотехнологія пропонує нижчі операційні витрати (OPEX) за умови використання дешевої сировини (відходів сільського господарства) [9]. Головним бар'єром для повної домінації біотехнологічного методу залишається складність downstream processing та необхідність великих обсягів стерильної води [11].

Майбутнє технології виробництва харчової добавки E297 пов'язане з переходом на використання генно-модифікованих дріжджів, які, на відміну від грибів, можуть рости при низькому рН [10]. Це дозволить відмовитися від стадії

нейтралізації, що кардинально спростить технологічну схему та зробить виробництво фумарової кислоти таким же простим і дешевим, як виробництво етанолу [9].

### **1.6 Шляхи удосконалення технології отримання харчової добавки**

Основним шляхом удосконалення біологічного методу є спрямована модифікація метаболічних шляхів грибів роду *Rhizopus*. У природних штаммах значна частина вуглецю витрачається на утворення етанолу та молочної кислоти, що знижує вихід фумарату. Сучасні стратегії передбачають делецію генів алкогольдегідрогенази та лактатдегідрогенази, що дозволяє перенаправити потік вуглецю виключно у відновлювальний цикл трикарбонових кислот (rTCA) [13].

Крім придушення побічних шляхів, важливою є гіперекспресія транспортерів дикарбонових кислот. Встановлено, що накопичення фумарової кислоти всередині клітини створює токсичний ефект і гальмує подальший синтез. Впровадження додаткових копій генів, що відповідають за активний транспорт фумарату крізь клітинну мембрану, дозволяє значно підвищити концентрацію продукту в середовищі без шкоди для життєздатності гриба [13].

#### *Оптимізація умов ферментації та систем аерації*

Фумарова кислота є продуктом аеробного метаболізму, тому швидкість масопередачі кисню є критичним параметром. Удосконалення конструкції біореакторів спрямоване на використання мікробабблерів (micro-spargers), які створюють дрібніші бульбашки повітря, збільшуючи площу контакту фаз. Це дозволяє підтримувати високий рівень розчиненого кисню при менших енерговитратах на перемішування, що запобігає механічному пошкодженню міцелію [12].

Іншим шляхом є використання технології підживлення (fed-batch) з автоматичним контролем концентрації глюкози. Підтримання низької, але стабільної концентрації субстрату дозволяє уникнути ефекту Крабтрі

(утворення етанолу при надлишку цукру) і забезпечує безперервний синтез кислоти протягом тривалого часу [15]. Також перспективним є використання суміші вуглеводів, що імітують склад сільськогосподарських гідролізатів, для активації декількох транспортних систем клітини одночасно [12].

#### *Імобілізація біомаси та реактори з нерухомим шаром*

Для подолання проблем, пов'язаних з високою в'язкістю міцеліального середовища, технологію удосконалюють шляхом імобілізації грибів на пористих носіях. Використання поліуретанових губок, керамічних насадок або спеціальних текстильних сіток дозволяє грибам рости у вигляді тонкої біоплівки [13]. Це забезпечує:

- Можливість багаторазового використання біомаси (до 20 циклів).
- Значне спрощення процесу відділення біомаси від бульйону.
- Підвищення продуктивності за рахунок вищої щільності клітин на одиницю об'єму [15].

Реактори з нерухомим або киплячим шаром (fluidized bed reactors) дозволяють проводити процес у безперервному режимі, де свіже поживне середовище подається знизу, а бульйон з продуктом відбирається зверху. Це мінімізує час перебування кислоти в реакторі та зменшує її інгібуючий вплив на мікроорганізми [12].

#### *Удосконалення систем контролю рН та фіксації CO<sub>2</sub>*

Традиційне використання карбонату кальцію призводить до утворення гіпсу, що є серйозним технологічним бар'єром. Удосконалення передбачає заміну CaCO<sub>3</sub> на розчинні нейтралізатори, такі як гідроксид амонію або карбонат натрію, у поєднанні з іонообмінною сепарацією [14]. Це дозволяє уникнути утворення твердих осадів у реакторі.

Крім того, розробляються системи підвищеного тиску CO<sub>2</sub> у ферментері. Оскільки вуглекислий газ є безпосереднім реагентом у синтезі фумарату через піруваткарбоксилазу, підвищення його парціального тиску зміщує рівновагу реакції в бік утворення продукту. Сучасні установки інтегрують системи

вловлювання CO<sub>2</sub> з викидів ТЕЦ безпосередньо в систему аерації біореактора, що робить виробництво частиною вуглецево-негативних технологій (CCU) [15].

#### *Інновації в Downstream Processing: Мембрани та екстракція*

Найбільш радикальні вдосконалення стосуються виділення кислоти. Традиційне осадження замінюється на реактивну екстракцію з використанням третинних амінів. Цей метод дозволяє селективно вилучати фумарову кислоту з бульйону без зміни його сольового складу [14]. Після екстракції кислоту рекуперують шляхом зміни температури або додавання летких розчинників, що значно знижує споживання хімічних реагентів.

Впровадження електродіалізу з біполярними мембранами (EDBM) дозволяє розділяти солі фумарату на вільну кислоту та луг. Це найбільш досконала на сьогодні технологія, яка забезпечує повну рециркуляцію нейтралізуючого агента назад у ферментер [14]. Використання нанофільтрації як попереднього етапу дозволяє сконцентрувати продукт і видалити залишкові цукри та білки, що підвищує чистоту кінцевих кристалів до 99.8% [12].

#### *Використання нетрадиційних продуцентів*

Останнім шляхом удосконалення є перенесення шляхів синтезу фумарату в нетрадиційні організми, такі як дріжджі *Yarrowia lipolytica* або бактерії *Corynebacterium glutamicum* [13]. Ці організми набагато легше піддаються генетичним маніпуляціям і мають вищу стійкість до низького рН середовища. Виробництво фумарової кислоти за допомогою дріжджів при рН 3.0 дозволяє кислоті випадати в осад безпосередньо під час ферментації, що кардинально спрощує всю технологічну схему [15].

## РОЗДІЛ II ТЕХНОЛОГІЧНА ЧАСТИНА

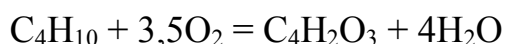
### 2.1 Характеристика вихідної сировини для виробництва

*Малеїновий ангідрид* ( $C_4H_2O_3$ ) - це багатофункціональна хімічна сполука, яка у чистому вигляді представляє собою білу кристалічну речовину з гострим, дратівливим запахом [16]. Його унікальність полягає в наявності двох функціональних груп: подвійного зв'язку вуглець-вуглець та ангідридної групи. Це робить його надзвичайно реакційноздатною молекулою, здатною вступати в реакції дієнового синтезу (Дільса-Альдера), полімеризації та гідролізу [18]. Промислове значення малеїнового ангідриду важко переоцінити, оскільки він є фундаментальним блоком для виробництва ненасичених полієфірних смол, присадок до мастил та харчових кислот (фумарової та яблучної) [16].

#### *Еволюція промислового виробництва: від бензолу до н-бутану*

Історично першим комерційним методом отримання малеїнового ангідриду було каталітичне окислення бензолу. Проте з кінця 20-го століття галузь майже повністю перейшла на використання н-бутану як сировини [17]. Цей перехід був зумовлений двома факторами: високою токсичністю бензолу та економічною вигідністю н-бутану, який є побічним продуктом нафтопереробки та видобутку природного газу [19].

Сучасна технологія базується на селективному окисленні н-бутану в газовій фазі. Реакція описується рівнянням:



Процес відбувається в реакторах із нерухомим або киплячим шаром каталізатора при температурах 380–450°C [17].

На відміну від бензолу, де втрачається два атоми вуглецю у вигляді  $CO_2$ , при окисленні н-бутану всі чотири атоми вуглецю теоретично можуть перейти цільовий продукт, що забезпечує вищу атомну ефективність процесу [16].

Відповідальна організація НУХТ, каф. ТЖХТ	Технічне узгодження Біла Г.М	Вид документа Пояснювальна записка	Статус документа			
Власник документа  НУХТ	Розробник документа Кулик К.С.	Назва, додаткова назва  РОЗДІЛ II ТЕХНОЛОГІЧНА ЧАСТИНА	ННІХТ.ЗХТ-5-3.026.161.009.КП.ПЗ			
	Документ затверджено Носенко Т.Т.		Інд. змін.	Дата видання	Мова ua	Аркуш 27/75

### *Ванадієво-фосфорний каталізатор (VPO): Серце процесу*

Ефективність отримання малеїнового ангідриду критично залежить від специфічного каталізатора — ванаділпірофосфату, відомого як VPO-каталізатор [17]. Це один із небагатьох каталізаторів у промисловій хімії, здатний здійснювати складне восьмиелектронне окислення алкану до ангідриду з високою селективністю [18].

Удосконалення VPO-каталізаторів спрямоване на контроль морфології поверхні та співвідношення фаз ванадію. Сучасні дослідження 2024 року підкреслюють, що додавання мікрокількостей промоторів, таких як залізо, молібден або цирконій, дозволяє підвищити стабільність каталізатора та запобігти його передчасному спіканню [17]. Крім того, важливим є метод активації каталізатора, який часто проводиться безпосередньо в робочому реакторі протягом кількох сотень годин для формування активної поверхні [16].

### *Технологічні стадії виділення та очищення*

Після виходу з реактора газова суміш містить малеїновий ангідрид, водяну пару, CO, CO<sub>2</sub> та залишки бутану. Технологія виділення продукту передбачає два основні шляхи:

- Ангідрид поглинається водою з утворенням малеїнової кислоти, яку потім піддають дегідратації. [18].
- Використання спеціальних органічних розчинників (наприклад, дибутилфталату), які селективно розчиняють ангідрид [16].

Очищення проводиться методом фракційної дистиляції у вакуумі. Отриманий продукт повинен мати чистоту не менше 99.5%, а вміст домішок, таких як фталевий ангідрид або хром, суворо регламентується, особливо якщо ангідрид призначений для виробництва харчових добавок [19].

### *Основні галузі споживання*

Малеїновий ангідрид є незамінним у виробництві ненасичених поліефірних смол (UPR). Ці смоли, армовані скловолокном, використовуються

в суднобудуванні, будівництві та автомобілебудуванні завдяки їхній міцності та корозійній стійкості [18].

Іншим великим сегментом є виробництво присадок до мастил. Малейновий ангідрид реагує з поліізобутиленом, утворюючи поліізобутиленянтарний ангідрид (PIBSA) — основний компонент беззольних дисперсантів, які підтримують двигуни чистими, запобігаючи утворенню нагару [16].

У харчовій промисловості малейновий ангідрид слугує сировиною для синтезу яблучної та фумарової кислот [19]. Шляхом гідратації ангідриду отримують малейнову кислоту, яка потім ізомеризується в фумарову або гідрується в яблучну [18].

#### *Екологічні аспекти та безпека*

Малейновий ангідрид є агресивною хімічною речовиною. Його пил або пара викликають сильні опіки очей, шкіри та дихальних шляхів. При контакті з водою він виділяє тепло і перетворюється на корозійну малейнову кислоту [16]. Промислові стандарти безпеки 2025 року вимагають використання герметичних систем зберігання та транспортування в розплавленому стані (ізотермічні цистерни при 60-70°C) або у формі гранул у вологозахищеній упаковці [18].

Екологічний вектор розвитку спрямований на отримання малейнового ангідриду з відновлюваної сировини — наприклад, шляхом окислення фурфуролу, який отримують із сільськогосподарських відходів [19].

#### *Перспективи ринку та інновації*

Прогнози на 2026 рік вказують на зростання попиту на малейновий ангідрид у зв'язку з розвитком індустрії біорозкладних пластиків, таких як полібутиленсукцинат (PBS). Малейновий ангідрид є попередником для виробництва 1,4-бутандіол, який є основним мономером для PBS [17].

*Вода* є найбільш розповсюдженою та водночас найбільш аномальною речовиною на нашій планеті, виконуючи роль фундаментального розчинника

та середовища для всіх біохімічних процесів. Її унікальність обумовлена специфічною молекулярною структурою, де атом кисню пов'язаний з двома атомами водню ковалентними зв'язками, утворюючи кутову конфігурацію з кутом близько 104,5 градусів [20]. Через значну різницю в електронегативності між киснем та воднем молекула води має виражений дипольний момент, що робить її полярною сполукою. Саме ця полярність дозволяє молекулам води взаємодіяти між собою через водневі зв'язки, які, хоч і є слабшими за ковалентні, у своїй сукупності визначають високу температуру кипіння, плавлення та випаровування води [21].

У контексті фізичних характеристик вода демонструє низку аномалій, найвідомішою з яких є зміна щільності залежно від температури. На відміну від більшості рідин, які стискаються при охолодженні до самого моменту замерзання, вода досягає своєї максимальної щільності при температурі 3,98°C [20]. При подальшому охолодженні її щільність починає зменшуватися, а під час переходу в твердий стан (лід) вона різко падає, що призводить до збільшення об'єму приблизно на 9%. Це явище пояснюється формуванням жорсткої кристалічної решітки, де кожна молекула оточена чотирма іншими, утворюючи пухку тетраедричну структуру з великою кількістю внутрішніх порожнеч [21].

Це означає, що вода може поглинати величезну кількість теплової енергії при незначному змінні власної температури. У промисловості ця характеристика дозволяє використовувати воду як ідеальний теплоносій та холодоагент. Висока прихована теплота пароутворення також використовується в процесах концентрування та сушіння, де видалення вологи вимагає значних енергетичних витрат, що водночас забезпечує стабільність температурного режиму продукту [20].

Хімічна активність води визначається її здатністю до самоіонізації або автопротолізу. Цей процес полягає в переході протона від однієї молекули води до іншої з утворенням іонів гідроксонію та гідроксид-іонів [21].

Це значення є основою для шкали рН, де нейтральний стан середовища відповідає значенню 7. Завдяки високій діелектричній проникності, яка становить близько 80 при кімнатній температурі, вода здатна послаблювати сили притягання між іонами розчинених речовин у 80 разів, що робить її універсальним розчинником для солей, цукрів та багатьох органічних сполук [22]. Коли речовина потрапляє у воду, молекули розчинника орієнтуються навколо заряджених частинок, утворюючи гідратні оболонки, що перешкоджає їхній рекомбінації [20].

Поверхневий натяг води є ще однією важливою характеристикою, поступаючись лише ртуті серед рідин за нормальних умов. Високий поверхневий натяг обумовлений сильними когезійними силами між молекулами на межі фаз, що дозволяє воді підніматися капілярами рослин або пористих структур харчових продуктів. У технологічних процесах ця властивість впливає на змочування сухих порошоків, стабільність емульсій та піноутворення. Додавання поверхнево-активних речовин (ПАР) дозволяє знизити цей показник, що полегшує процеси змішування та очищення обладнання [22].

У біологічних та харчових системах вода виконує роль не лише пасивного наповнювача, а й активного учасника хімічних реакцій. Вона є необхідним реагентом у процесах гідролізу, де під впливом ферментів або кислот відбувається розщеплення складних молекул.

Крім того, вода бере участь у формуванні структури макромолекул, таких як білки та полісахариди. Гідратація цих сполук визначає в'язкість тіста, соковитість м'яса та стабільність гелів [21].

Мікробіологічна та хімічна чистота води регламентується суворими стандартами, оскільки наявність мікродомішок металів або солей жорсткості може каталізувати небажані реакції окиснення або призводити до утворення осадів [21]. Солі кальцію та магнію (жорсткість) впливають на швидкість варіння продуктів та тривалість експлуатації теплообмінного обладнання.

## *Вода*

Вода традиційно розглядається не лише як пасивне середовище для розчинення речовин, а як один із найбільш універсальних та активних хімічних реагентів. Її здатність безпосередньо вступати в реакції обумовлена специфічною електронною структурою молекули, де наявність неподілених електронних пар на атомі кисню та рухливість атомів водню дозволяють воді виступати одночасно в ролі нуклеофіла, кислоти, основи або окиснювально-відновного агента [23]. Участь води у реакціях часто починається з процесу автопротолізу, де молекули води постійно обмінюються протонами, створюючи динамічну рівновагу іонів гідроксонію та гідроксиду, що робить воду амфотерним реагентом, здатним реагувати як з кислотами, так і з основами [23].

Однією з найбільш масштабних сфер застосування води як реагенту є реакції гідролізу, які лежать в основі багатьох промислових синтезів. У цих процесах молекула води атакує позитивно заряджені центри інших молекул, що призводить до розриву хімічних зв'язків у субстраті та приєднання компонентів води до продуктів розпаду [24]. Вода є критично важливою для гідролізу естерів, амідів та ангідридів. Наприклад, у виробництві органічних кислот вода виступає безпосереднім реагентом, який перетворює ангідридну групу на дві карбоксильні групи, що є ключовим етапом у ланцюжку отримання харчових добавок. При цьому швидкість такої реакції залежить від здатності води утворювати перехідні комплекси через водневі зв'язки, які стабілізують проміжні стани молекул [23].

Окрім прямої участі у розриві зв'язків, вода проявляє властивості активного реагенту в реакціях гідратації. У цих процесах вся молекула води або її частини приєднуються до кратних зв'язків (подвійних або потрійних) між атомами вуглецю або іншими елементами [23]. Це властивість широко використовується для отримання спиртів з олефінів або альдегідів з алкінів. Вода в таких реакціях може діяти як при високих температурах у присутності

кислотних каталізаторів, так і в м'яких біологічних умовах під дією ферментів гідратаз. Важливою особливістю води як реагенту є її висока селективність у певних середовищах, що дозволяє отримувати чисті ізомери продуктів без утворення великої кількості побічних сполук [24].

У неорганічній хімії вода демонструє потужні властивості реагенту при взаємодії з оксидами металів та неметалів, перетворюючи їх на відповідні основи або кислоти. Реакція води з активними металами супроводжується інтенсивним виділенням водню та утворенням лугів, де вода виступає в ролі окиснювача [23]. З іншого боку, взаємодія з галогенами або іншими сильними окиснювачами може змусити воду виступати відновником з виділенням кисню. Ця дуальність робить воду незамінним компонентом у складних електрохімічних процесах та системах очищення промислових газів від токсичних оксидів, де вода хімічно зв'язує забруднювачі, перетворюючи їх на стабільні сполуки [24].

Сучасні дослідження в галузі "зеленої хімії" акцентують увагу на воді як на екологічно чистому реагенті, що може замінити токсичні органічні сполуки в багатьох реакціях синтезу. Використання води як реагенту в надкритичному стані (при високих температурах і тиску) дозволяє проводити унікальні перетворення, які неможливі в звичайних умовах [24]. У такому стані вода втрачає свою звичну структуру водневих зв'язків і починає вести себе як неполярний реагент, що дозволяє їй ефективно взаємодіяти з жирами та іншими водовідштовхувальними речовинами, здійснюючи їхній швидкий гідроліз або термічний розклад без додаткових хімічних реагентів [23].

Як головний реагент у процесі фотосинтезу, вода є джерелом електронів та протонів, що забезпечує відновлення вуглекислого газу до вуглеводів. В інженерних системах отримання енергії вода є реагентом для парової конверсії метану, де вона реагує з вуглеводнями при високих температурах для виробництва водню [23]. Таким чином, вода є не просто фоном для хімічних реакцій, а динамічним та багатогранним учасником хімічних перетворень, чия

активність як реагенту визначає ефективність більшості сучасних технологічних процесів [24].

#### Малеїнова кислота

Малеїнова кислота також відома як цис-бутендіова кислота, є унікальним багатофункціональним реагентом, чия хімічна природа визначається специфічною просторовою конфігурацією та наявністю двох електроноакцепторних груп при подвійному зв'язку.

Центральною характеристикою малеїнової кислоти як реагенту є її цис-геометрія, яка зумовлює зближеність двох карбоксильних груп у просторі. Це призводить до формування стабільного внутрішньомолекулярного водневого зв'язку в моноаніоні після першої дисоціації [25]. У результаті малеїнова кислота проявляє аномально високу кислотність на першому етапі, що значно перевищує показники її транс-ізомера — фумарової кислоти. Проте, відрив другого протона суттєво утруднений через електростатичне відштовхування між близько розташованими негативними зарядами, що робить її специфічним реагентом для синтезів, де необхідний чіткий градієнт кислотності [27].

В органічному синтезі малеїнова кислота цінується як один із найпотужніших дієнофілів. Завдяки сильному електроноакцепторному впливу двох карбоксильних груп, електронна густина на подвійному зв'язку різко знижена, що полегшує атаку спряжених дієнів [26]. У наукових публікаціях 2024 року підкреслюється, що реакції циклоприєднання за участю малеїнової кислоти проходять із високою стереоселективністю, оскільки цис-конфігурація реагенту повністю зберігається в структурі утвореного циклічного аддукту [26]. Це робить її незамінним реагентом для виробництва широкого спектру проміжних сполук у фармакології та агрохімії, зокрема для отримання інсектицидів та регуляторів росту рослин.

Як реагент малеїнова кислота здатна вступати в реакції приєднання за подвійним зв'язком під дією нуклеофілів. Найбільш значущою є реакція гідратації, в результаті якої утворюється яблучна кислота [25]. Процес зазвичай

каталізується сильними мінеральними кислотами або специфічними ферментами в біотехнологічних установках. Малейнова кислота демонструє високу чутливість до умов гідратації: при підвищених температурах і тиску реакція протікає швидко, проте потребує суворого контролю, щоб уникнути побічної ізомеризації [27].

Найбільш специфічною рисою малейнової кислоти як реагенту є її здатність до перетворення на фумарову кислоту. Будучи термодинамічно менш стабільною через стеричне відштовхування карбоксильних груп, вона легко ізомеризується під дією каталізаторів [27].

У хімії високомолекулярних сполук малейнова кислота виступає як важливий мономер та реагент для модифікації ланцюгів. Хоча вона неохоче вступає в гомополімеризацію через стеричні перешкоди, вона є чудовим реагентом для кополімеризації з електронадлишковими мономерами, такими як стирол або вінілацетат [28]. Малейнова кислота формує чергувальні кополімери, які мають унікальні адгезійні та диспергуючі властивості. Це обумовлено наявністю регулярних карбоксильних груп вздовж полімерного ланцюга, що дозволяє використовувати такі сполуки в якості інгібіторів накипу та компонентів сучасних мийних засобів [28].

Малейнова кислота активно вступає в реакції з алкоголями, утворюючи моно- та дієстери (малейнати). Завдяки своїй реакційній здатності, вона потребує менш жорстких умов для естерифікації порівняно з насиченими кислотами [25]. Малейнати широко застосовуються як пластифікатори та внутрішні реагенти для створення ненасичених поліефірних смол. При виробництві таких смол малейнова кислота часто частково ізомеризується безпосередньо в реакційній суміші, що надає кінцевому полімеру додаткової жорсткості та стійкості до деформацій [28].

Як реагент малейнова кислота демонструє високу активність щодо азотовмісних сполук. При взаємодії з первинними амінами вона спочатку утворює відповідні амідни, які при нагріванні легко дегідратуються до

циклічних малеїнімідів [26]. Ці сполуки є базовими реагентами для синтезу сучасних композитних матеріалів та високоміцних термостійких пластмас. Крім того, реакція з діетилентріаміном та подібними сполуками дозволяє отримувати імідазолінові похідні, що використовуються як інгібітори корозії в нафтогазовій галузі [25].

Малеїнова кислота як реагент є досить агресивною речовиною. Вона має виражену подразнювальну дію на шкіру та слизові оболонки, що пов'язано з її високою кислотністю та здатністю зв'язувати аміногрупи білків [28]. Робота з нею вимагає суворого дотримання температурних режимів, оскільки при сильному нагріванні (понад 130°C) вона починає виділяти малеїновий ангідрид, який є ще більш токсичним і летким [27].

## **2.2 Принципово-технологічна схема виробництва**

Для синтезу фумарової кислоти спочатку проводиться ретельна підготовка сировини. Малеїновий ангідрид, вода та інші необхідні компоненти зважуються відповідно до визначених пропорцій. У разі потреби сировину просівають, щоб уникнути наявності грудочок чи забруднень, що можуть вплинути на якість кінцевого продукту. Цей етап підготовки є критичним, оскільки точність дозування та чистота компонентів визначають ефективність подальших хімічних процесів.

Наступним етапом є гідрування суміші дистильованої води та малеїнового ангідриду при температурі 60-100°C. В результаті цього процесу відбувається утворення малеїнової кислоти, яка є проміжним продуктом на шляху до фумарової кислоти.

Після утворення малеїнової кислоти, здійснюється стадія ізомеризації, під час якої малеїнова кислота перетворюється на фумарову кислоту. Цей етап є основним, оскільки ізомеризація забезпечує утворення потрібного ізомеру, який має високу стабільність і цінні властивості.

Після завершення ізомеризації отриману кислоту охолоджують до температури 15-20°C та проводимо етап кристалізації для отримання чистого твердого продукту — фумарової кислоти.

Для забезпечення високої чистоти кінцевого продукту кристали промиваються водою для виведення залишків маточного розчину та непотрібних домішок.

На наступному етапі відбувається фільтрація кристалів для видалення маточного розчину, що містить розчинні домішки, а також залишкові продукти реакції.

Отримані кристали сушать для видалення залишкової вологи, після чого їх подрібнюють до необхідного розміру для зручності фасування та транспортування. Готовий продукт фасуємо та відправляємо на склад. Принципова технологічна схема зображена на рисунку 2.1:

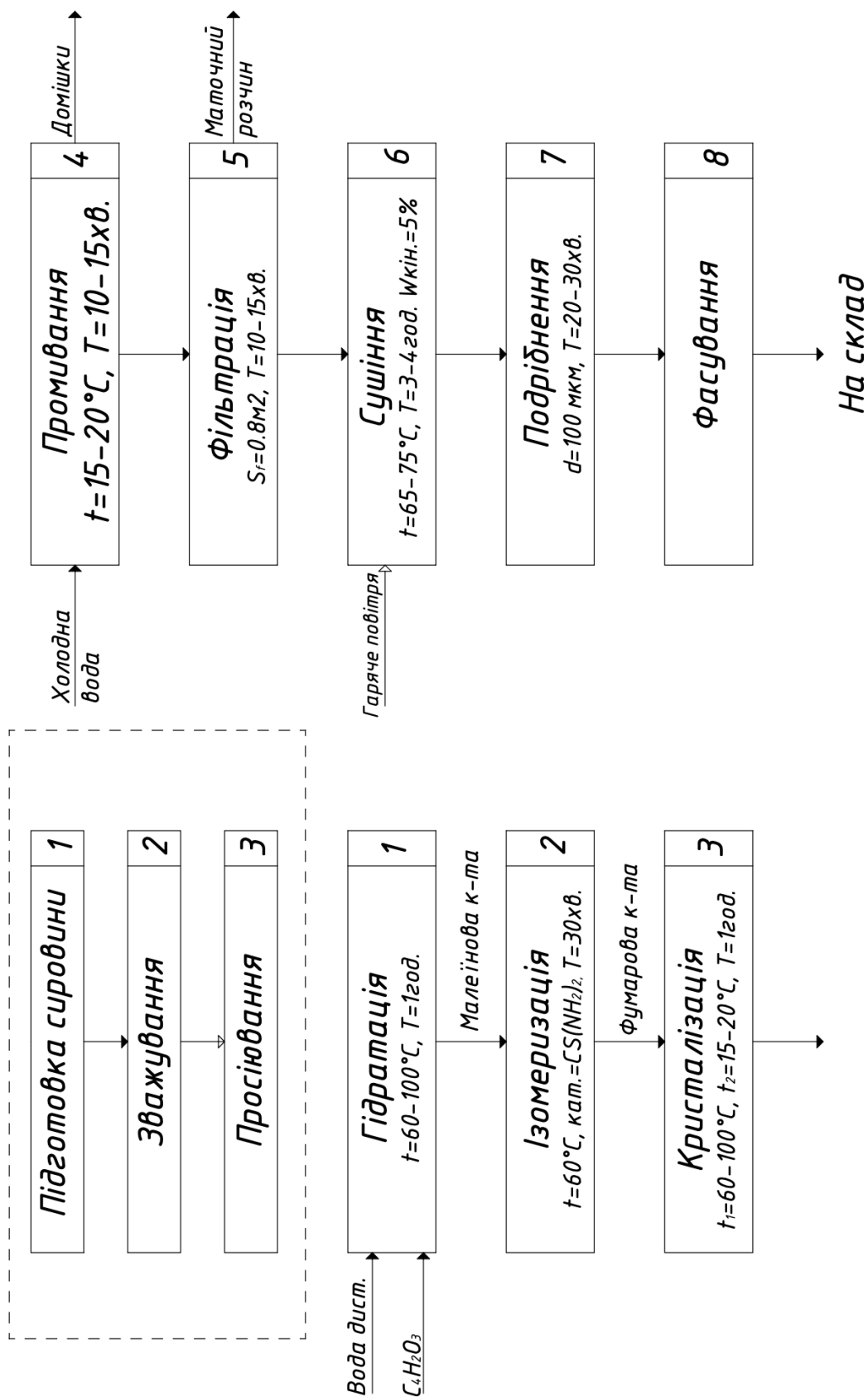


Рисунок 2.1 Принципова технологічна схема

## 2.3 Матеріальний розрахунок

Розрахунок проводимо на задану продуктивність: 1000 кг/доба, використовуючи значення стехіометричних відношень реагентів.

Для виробництва фумарової кислоти потрібні малеїновий ангідрид та вода. За методикою потрібні маси становлять: малеїнового ангідриду 889 кг, 2119 кг води та 13 кг тіосечовини.

### Гідrataція

На етапі гідrataції потрібно розрахувати молярні маси вихідних речовин та продуктів реакції, а також визначити кількість утвореної малеїнової кислоти. При цьому необхідно врахувати, що кількість молекул вихідних реагентів і продукту реакції знаходиться в співвідношенні 1:1:1. Розрахунок витрати води на стадії гідrataції базується на сумі стехіометричної потреби та необхідного об'єму технологічного розчинника. Для повного хімічного перетворення 889 кг малеїнового ангідриду в малеїнову кислоту (мольне співвідношення 1:1) витрачається 163 кг води, яка переходить у зв'язаний стан. Решта води додається для створення 35%-го розчину малеїнової кислоти, що є критичним для стабілізації екзотермічного ефекту реакції та забезпечення необхідної турбулізації реакційного середовища.



$$M(\text{C}_4\text{H}_2\text{O}_3) = 98 \text{ г/моль};$$

$$M(\text{H}_2\text{O}) = 18 \text{ г/моль};$$

$$M(\text{C}_4\text{H}_4\text{O}_4) = 116 \text{ г/моль}$$

$$n(\text{C}_4\text{H}_2\text{O}_3) = 889 \times 1000 / 98 = 9071 \text{ моль}$$

$$n(\text{C}_4\text{H}_2\text{O}_3) = n(\text{H}_2\text{O}) = n(\text{C}_4\text{H}_4\text{O}_4) = 9071 \text{ моль}$$

$$m(\text{H}_2\text{O}) = 9071 \times 18 \text{ г/моль} \div 1000 = 163 \text{ кг}$$

$$m(\text{C}_4\text{H}_4\text{O}_4) = 9071 \text{ моль} \times 116 \text{ г/моль} \div 1000 = 1052 \text{ кг}$$

На данній стадії допускаються втрати до 1%

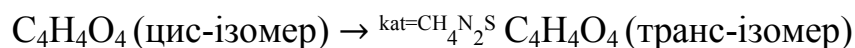
Таблиця 2.1

### Матеріальний баланс стадії гідратації

Стаття приходу		Стаття витрат	
$\text{C}_4\text{H}_2\text{O}_3$	889,5	$\text{C}_4\text{H}_4\text{O}_4$	1042
$\text{H}_2\text{O}$	2119	Вода (розчинник)	1956
Всього	3008,5	Втрати	10,5
		Всього	3008,5

### Ізомеризація

На другій стадії процесу — каталітичній ізомеризації малеїнової кислоти в фумарову — кількість води в системі залишається незмінною відносно виходу з першої стадії.



Таблиця 2.2

### Матеріальний баланс стадії ізомеризації

Стаття приходу		Стаття витрат	
$\text{C}_4\text{H}_4\text{O}_4$ (цис-ізомер)	1042	Розчин фумарової кислоти	2993
$\text{H}_2\text{O}$	1956		
Гіосечовина	13,3	Гіосечовина	13,3
Всього	3011,3	Втрати	5
		Всього	3011,3

На данній стадії передбачаються втрати 0,5%

Таблиця 2.3

**Кристалізація**  
**Матеріальний баланс стадії кристалізації**

Стаття приходу		Стаття витрат	
Суміш	2993	Кристали	2978
Всього	2993	Втрати	15
		Всього	2993

На даній стадії очікуються втрати у розмірі 0,5%.

Таблиця 2.4

**Промивання**  
**Матеріальний баланс стадії промивання**

Стаття приходу		Стаття витрат	
Кристали	2978	Промиті кристали	2963
H <sub>2</sub> O для промивання	1200	H <sub>2</sub> O для промивання	1200
Всього	4178	Втрати	15
		Всього	4178

На даній стадії очікуються втрати у розмірі 0,5%.

Таблиця 2.5

**Фільтрування**  
**Матеріальний баланс стадії фільтрування**

Стаття приходу		Стаття витрат	
Кристали	2963	Непромиті вологі кристали	1183
Всього	2963	Маточний розчин	1765
		Втрати	15
		Всього	2963

На даній стадії очікуються втрати у розмірі 0,5%.

Таблиця 2.6

### Сушіння

#### Матеріальний баланс стадії сушіння

Стаття приходу		Стаття витрат	
Промиті кристали	1183	Суха фумарова кислота	1006
Всього	1183	Водяна пара	172
		Втрати	5
		Всього	1183

На даній стадії очікуються втрати у розмірі 0,5%.

Таблиця 2.7

### Подрібнення

#### Матеріальний баланс стадії подрібнення

Стаття приходу		Стаття витрат	
Суха фумарова кислота	1006	Подрібнена кислота	1001
Всього	1006	Втрати	5
		Всього	1006

На даній стадії очікуються втрати у розмірі 0,5%.

Таблиця 2.8

### Фасування

#### Матеріальний баланс стадії фасування

Стаття приходу		Стаття витрат	
Суха фумарова кислота	1001	Фасована фумарова кислота	1000
Всього	1001	Втрати	1
		Всього	1001

На даній стадії очікуються втрати у розмірі 0,1%.

## 2.4 Розрахунок та підбір основного обладнання

Реактор-змішувач, призначений для промислового синтезу фумарової кислоти, являє собою вертикальний циліндричний апарат, конструкція якого адаптована до специфічних умов реакції ізомеризації малеїнової кислоти. Основним елементом апарата є робоча місткість з еліптичним днищем та кришкою, що дозволяє системі стабільно працювати під тиском або в умовах вакууму, забезпечуючи при цьому рівномірний розподіл механічних напружень у корпусі. Оскільки процес перетворення малеїнової кислоти на її транс-ізомер — фумарову кислоту — супроводжується значними тепловими ефектами та вимагає підтримання температури в діапазоні **90–105°C**, корпус реактора обов'язково оснащується сорочкою для нагрівання та охолодження.

У якості теплоносія найчастіше використовується насичена водяна пара, яка подається в сорочку для ініціювання реакції, а в разі надмірного саморозігріву суміші система перемикається на подачу охолоджувальної води, що дозволяє уникнути термічної деструкції продукту.

Враховуючи високу агресивність середовища, спричинену кислим значенням та використанням каталізаторів (наприклад, тіосечовини або соляної кислоти), внутрішні поверхні реактора виготовляються з корозійностійких матеріалів. Найбільш поширеним вибором є високоякісна нержавіюча сталь марки AISI 316L або титанові сплави, а для процесів, що вимагають особливої чистоти, застосовуються реактори з емалевим покриттям (склоемаллю).

Емаль запобігає прямому контакту кислоти з металом, що виключає потрапляння іонів заліза в готову харчову добавку **E297** і забезпечує її відповідність органолептичним стандартам. Важливою частиною апарата є перемішувач, зазвичай якірного або пропелерного типу з регульованою швидкістю обертання. Мішалка повинна не лише створювати

гомогенне середовище для рівномірного розподілу каталізатора, а й запобігати осіданню кристалів фумарової кислоти, яка через свою низьку розчинність починає випадати в осад безпосередньо під час синтезу.

Герметизація вала мішалки реалізується за допомогою складного торцевого ущільнення, що виключає витік парів кислоти та забезпечує безпеку робочої зони. Кришка реактора містить набір технологічних штуцерів для завантаження компонентів, встановлення манометра, запобіжного клапана та гільзи для термопари, яка передає дані на пульт автоматизованої системи керування. Для запобігання утворенню застійних зон усередині ємності встановлюються відбивні перегородки (бефли), що змінюють характер руху потоків із колового на турбулентний, значно інтенсифікуючи масообмін.

Вивантаження готової суспензії здійснюється через нижній випускний пристрій особливої конструкції, яка не має «мертвих зон», де продукт міг би кристалізуватися і заблокувати вихід.

Оскільки фумарова кислота характеризується надзвичайно низькою розчинністю у холодній воді — лише близько 7 г/л при температурі 25°C, — процес кристалізації є критичним етапом, що визначає чистоту, розмір та морфологію кінцевого продукту E297. Кристалізатор зазвичай має вертикальний циліндричний корпус з еліптичним або конічним днищем, виготовлений із високолегованої корозійностійкої сталі марки AISI 316L, оскільки робоче середовище залишається агресивним навіть після завершення основної реакції синтезу.

Основним функціональним вузлом кристалізатора є потужна система теплообміну, яка найчастіше реалізується через зовнішню сорочку та внутрішні змійовики, через які циркулює холодоагент, наприклад льодяна вода або розсіл. Процес охолодження в апараті відбувається за суворо визначеним графіком, щоб уникнути миттєвого масового випадання дрібних кристалів (нуклеації), що могло б призвести до захоплення маточного розчину з домішками всередину кристалічної решітки. Завдяки плавному зниженню температури від приблизно

100°C до 15–20°C вдається отримати крупні, добре сформовані кристали, які згодом набагато легше піддаються фільтрації та промиванню.

Для підтримки кристалів у підвішеному стані та забезпечення рівномірного температурного поля по всьому об'єму, апарат оснащується низькообертним перемішувачим пристроєм рамного або якірного типу. Така конструкція мішалки дозволяє ефективно охоплювати пристінкові зони, запобігаючи наростанню «корок» на охолоджуваних поверхнях, і водночас діє делікатно, не руйнуючи вже сформовані грані кристалів. Додатково кристалізатор може бути обладнаний системою створення вакууму, що дозволяє проводити вакуум-кристалізацію, де охолодження розчину відбувається за рахунок інтенсивного випаровування частини розчинника під зниженим тиском.

На кришці апарата встановлюються штуцери для подачі гарячого фільтрату, люк для візуального контролю процесу (оглядове скло з підсвіткою), а також датчики температури та рівня, інтегровані в загальну систему автоматизації цеху. Вивантаження суспензії здійснюється через нижній штуцер великого діаметра, оснащений спеціальним краном, що виключає забивання твердою фазою.

Фумарова кислота після стадії кристалізації перебуває у стані густої суспензії в агресивному маточному розчині, цей апарат забезпечує герметичне та високоефективне виділення продукту, мінімізуючи контакт персоналу з хімічними речовинами та запобігаючи забрудненню харчової добавки E297. Конструктивно друк-фільтр являє собою вертикальну циліндричну місткість із плоским або злегка конічним дном, яке оснащено перфорованою опорною решіткою з багатошаровою металевією сіткою або полімерною фільтрувальною тканиною, здатною утримувати кристали заданого розміру.

Весь внутрішній об'єм апарата зазвичай виготовляється з високолегованої сталі з додаванням молібдену, що гарантує стійкість до дії органічних кислот та каталізаторів при температурах до 80–100°C. Головною

особливістю друк-фільтра є наявність спеціального перемішуючого пристрою (S-подібної мішалки), яка здатна не тільки обертатися, а й здійснювати вертикальний рух за допомогою гідравлічного приводу. На стадії власне фільтрації всередині апарата створюється надлишковий тиск інертного газу (азоту) або стисненого повітря, який витискає рідку фазу крізь шар осаду та фільтрувальну перегородку, залишаючи на ній так званий «кек» — шар вологих кристалів фумарової кислоти. Мішалка при цьому плавно розрівнює поверхню осаду, запобігаючи утворенню тріщин, крізь які міг би «прориватися» газ, що суттєво підвищує рівномірність зневоднення.

Після видалення основної маси рідини настає етап промивання, який у друк-фільтрі реалізується з максимальною ефективністю. Промивна рідина подається через форсунки на верхній кришці, а мішалка занурюється в осад і проводить його «репульпацію» — повторне змішування з чистою водою для вимивання залишків малеїнової кислоти та каталізаторів із міжкристалічного простору. Завдяки сорочці обігріву, встановленій на стінках та днищі апарата, друк-фільтр може працювати як фільтр-сушарка: після промивання осад піддається нагріванню у вакуумі при одночасному перемішуванні лопатями мішалки, що дозволяє отримати сипкий продукт із мінімальним вмістом вологи без перевантаження в інше обладнання.

Завершальним етапом роботи апарата є автоматизоване вивантаження сухої фумарової кислоти. Мішалка поступово опускається, і її лопаті, обертаючись, спрямовують твердий продукт до бічного розвантажувального люка, оснащеного герметичним затвором. Така замкнена технологічна схема дозволяє підтримувати високу чистоту продукту на рівні 99,5% і вище, що є критичним для харчової промисловості.

Барабанна сушарка являє собою масивний порожнистий циліндр (барабан), установлений з невеликим нахилом до горизонту на опорних роликах, що дозволяє продукту плавно переміщуватися від завантажувального вузла до розвантажувальної камери під дією гравітації та обертання.

Основним функціональним елементом, що забезпечує інтенсивність процесу, є внутрішня насадка у вигляді піднімальних лопатей або полиць різної конфігурації. Під час обертання барабана ці лопаті безперервно підхоплюють вологі кристали фумарової кислоти, піднімають їх у верхню частину апарата і скидають вниз, створюючи рівномірний «дощ» або завісу продукту, що перекидає весь переріз циліндра. Це забезпечує максимально велику площу контакту між твердою фазою та сушильним агентом — гарячим повітрям, яке зазвичай рухається прямою дорогою із матеріалом. Використання прямого режиму (коли найгарячіше повітря контактує з найвологішим продуктом на вході) дозволяє уникнути перегріву вже підсушених кристалів на виході, що є критичним для збереження білосніжного кольору та хімічної стабільності фумарової кислоти.

Нагрівання повітря здійснюється в окремому калорифері, де теплова енергія передається від насиченої пари або через електричні ТЕНи, забезпечуючи стабільну температуру на вході в межах **110–130°C**. Корпус барабана зовні покривається товстим шаром теплоізоляції для мінімізації втрат енергії в навколишнє середовище та забезпечення безпеки персоналу. Герметичність апарата в місцях з'єднання рухомого барабана зі стаціонарними камерами забезпечується спеціальними ущільненнями, що запобігає викиду дрібнодисперсного пилу фумарової кислоти в приміщення цеху. Важливою частиною установки є система пиловловлювання, яка складається з циклона та рукавного фільтра, де відпрацьоване повітря очищується від найдрібніших частинок продукту перед викидом в атмосферу.

Вихідна камера сушарки обладнана розвантажувальним пристроєм, найчастіше шлюзовим затвором, який забезпечує виведення готової сухої фумарової кислоти на конвеєр або в бункер-накопичувач без порушення герметичності апарата. Завдяки безперервності процесу, високій продуктивності та можливості точного регулювання швидкості обертання

барабана, цей тип сушарок дозволяє отримувати продукт однорідної якості, що відповідає суворим стандартам харчової промисловості.

Молоткова дробарка належить до машин ударної дії, де руйнування матеріалу відбувається за рахунок кінетичної енергії молотків, що швидко обертаються, та подальшого зіткнення часток із внутрішніми стінками корпусу. Конструктивно дробарка складається з масивного сталевого корпусу, всередині якого на горизонтальному валу встановлено ротор із шарнірно закріпленими молотками (билами).

Процес подрібнення починається з подачі сухої фумарової кислоти через завантажувальний бункер, обладнаний магнітним сепаратором для вловлювання випадкових металевих домішок, що критично важливо для захисту молотків від пошкоджень та гарантування безпеки харчового продукту. Потрапляючи в робочу зону, кристали піддаються потужним ударам молотків, що обертаються зі швидкістю від **1500** до **3000** обертів на хвилину. Під дією відцентрової сили матеріал відкидається на відбійні плити (деки), де відбувається додаткове руйнування часток. Важливою особливістю роботи дробарки є наявність класифікаційної решітки або сита, що оточує ротор знизу. Тільки ті частки, розмір яких став меншим за отвори сита, проходять крізь нього у вихідний патрубок, тоді як більші кристали повертаються на повторне коло подрібнення. Зміною сит із різним діаметром отворів технолог може гнучко регулювати ступінь помелу — від грубої крупки до пудри.

Окрему увагу в конструкції молоткової дробарки для фумарової кислоти приділяють системі аспірації та охолодження. У процесі інтенсивного механічного впливу виділяється значна кількість теплової енергії, що може призвести до налипання продукту на молотки або стінки корпусу, тому через апарат постійно прокачується очищене повітря, яке відводить надлишкове тепло. Оскільки дрібнодисперсний пил фумарової кислоти може подразнювати слизові оболонки або утворювати вибухонебезпечні суміші з повітрям, дробарка працює в герметичному циклі, з'єднаному з циклоном та рукавним

фільтром. Корпус апарата оснащується дверцятами, що швидко відкриваються, для проведення регулярної санітарної обробки та заміни робочих органів.

Шнековий транспортер являє собою закритий жолоб або трубу, всередині якої обертається гвинтоподібний робочий орган — шнек, закріплений на центральному валу.

Механізм дії апарата ґрунтується на примусовому проштовхуванні матеріалу вздовж осі корпусу під дією обертових витків гвинта; при цьому крок та діаметр шнека розраховуються таким чином, щоб забезпечити задану продуктивність без заторів та надмірного стирання кристалів. Привід апарата, що складається з електродвигуна та мотор-редуктора, зазвичай розташовується на одному з кінців транспортера, забезпечуючи стабільний крутний момент і можливість регулювання швидкості подачі за допомогою частотного перетворювача. Важливою конструктивною особливістю є використання герметичних торцевих ущільнень вала та щільно прилеглих кришок із силіконовими ущільнювачами, що виключає викид дрібнодисперсного пилу фумарової кислоти в робочу зону цеху. Це критично важливо, оскільки пил цієї кислоти є подразником для дихальних шляхів, а герметичність системи запобігає його поширенню.

Для запобігання утворенню «мертвих зон», де матеріал міг би накопичуватися та з часом змінювати свої властивості, внутрішня поверхня корпусу та самі лопаті шнека піддаються ретельному шліфуванню. У місцях завантаження та вивантаження передбачені патрубки зі спеціальними гнучкими вставками, що компенсують вібрацію та полегшують інтеграцію з іншим обладнанням, таким як сушарка або молоткова дробарка. Якщо транспортер має значну довжину, всередині встановлюються проміжні підвісні підшипники, конструкція яких унеможлиблює потрапляння мастильних матеріалів у продукт.

Технічна характеристика обладнання наведена в таблиці 2.9

Назва	Призначення	Характеристика
Реактор змішувач	Для змішування вихідних рідин.	Вертикальний апарат з нержавіючої сталі AISI 316L об'ємом 2500 л, оснащений паровою сорочкою та якірною мішалкою для інтенсивної ізомеризації малеїнової кислоти. Для швидкого вивантаження гарячої суспензії використовується хімічний насос продуктивністю 750 л/хв, що запобігає кристалізації продукту в трубопроводах.
Кристалізатор	Для утворення кристалів	Ємнісний апарат об'ємом 3200 л із внутрішніми змійовиками, який забезпечує контрольоване охолодження розчину до 15°C для виділення великих кристалів фумарової кислоти. Повільне перемішування рамною мішалкою гарантує однорідність

		температури та високу чистоту твердої фази.
Друк фільтр	Для відділення суспензії від маточного розчину	Герметичний фільтр із робочою площею 2,5 м <sup>2</sup> , що дозволяє проводити розділення суспензії та багатократне промивання осаду під тиском азоту 0,4 МПа. Вбудована S-подібна мішалка розпушує «кек», забезпечуючи повне видалення залишків каталізаторів перед сушінням.
Барабанна сушарка	Для сушіння суміші	Обертовий циліндр довжиною 5 м та діаметром 0,8 м, який стабільно висушує до 80 кг/год продукту за рахунок прямого контакту з гарячим повітрям при 120°C. Спеціальні внутрішні лопаті створюють суцільну завісу кристалів, гарантуючи

		фінальну вологість порошку на рівні 0,3%.
Молоткова дробарка	Для подрібнення реакційної суміші	Компактний подрібнювач із продуктивністю 250 кг/год, який за допомогою ударних бил розмелює висушені кристали у дрібнодисперсну пудру. Наявність змінної калібрувальної сітки дозволяє отримати стабільну фракцію порошку, готову до безпосереднього використання в харчовій галузі.
Шнековий транспортер	Для перекачування суміші	Герметичний гвинтовий конвеєр діаметром 200 мм та довжиною 4 м, призначений для безпилового переміщення сухої фумарової кислоти до бункера фасування.

		<p>Апарат виготовлений із полірованої нержавіючої сталі, що виключає застійні зони та забезпечує гігієнічність транспортування добавки E297.</p>
Відцентровий насос		<p>насос із нержавіючої сталі марки AISI 316L призначений для швидкого транспортування гарячої реакційної маси з реактора на стадію кристалізації. Завдяки продуктивності 700 л/хв, апарат забезпечує оперативне спорожнення системи, виключаючи ризик передчасного випадання кристалів та забивання магістралей.</p>

### Розрахунок реактора – змішувача

Апарат з перемішувачими пристроями є одним із найбільш поширених типів обладнання в хімічних технологіях, застосовуваних для проведення

різних фізико-хімічних процесів. Тип і конструкція мішалки мають найбільше значення для ефективної роботи апарата.

Згідно з розрахунками матеріального балансу для виробництва фумарової кислоти, для здійснення технологічної операції каталітичної ізомеризації потрібен реактор з робочим об'ємом  $V_p = 300$  л. Реактор буде оснащений паровою сорочкою та турбінною мішалкою відкритого типу.

Конструктивний розрахунок реактора передбачає визначення розмірів апарата та його конструктивних елементів. Загальний обсяг апарату для періодичної та безперервної дії завжди трохи більший за робочий, оскільки під час перемішування на поверхні рідини можуть утворюватися воронки або виникати спінення реакційної маси. Найчастіше загальний обсяг апарата приймається на  $15 \div 30\%$  більшим за робочий.

### **Розрахунок реактора-змішувача**

#### **Вихідні дані:**

#### **Реактор**

Внутрішній діаметр  $D$ : **800** мм.

Номінальний об'єм:  $0,4$  м<sup>3</sup>.

Висота корпусу  $H$ : **800** мм.

#### **Рамна мішалка**

Діаметр рамної мішалки  $d_m$ : **750**мм.

$b = 50$  мм.

$H = 700$  мм.

$H_1 = 50$  мм.

$d_b = 30$  мм (діаметр валу).

$s = 8$  мм.

$R = 0,82 \cdot d = 0,82 \cdot 750 = 615$  мм. (Великий радіус мішалки).

$r = 0,152 \cdot d = 0,152 \cdot 750 = 114$  мм. (Радіус скруглення мішалки).

$s_1 = 1,2 \cdot s = 1,2 \cdot 8 = 10$  мм.

$$b_1 = 1,5 * b_M = 1,5 * 50 = 75 \text{ мм.}$$

$$l = 0,7 * d_M = 0,7 * 750 = 525 \text{ мм.}$$

### Еліптичне днище

При D апарата = 800 мм:

Висота еліптичної частини днища h = 200 мм.

Об'єм днища, м<sup>3</sup>

Об'єм, м <sup>3</sup>	Висота циліндричного борта, мм
0,07 м <sup>3</sup>	b <sub>1</sub> =25 мм

Радіус еліптичного днища становить R = D апарата = 400 мм.

Розрахуємо продуктивність за одне завантаження в реактор:

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

Розрахуємо об'єм реактора становить:

$$V_{\text{роб}} = V_H \cdot \varphi = 0,3 \text{ м}^3.$$

Розрахуємо необхідну кількість циклів реактора:

$$n = \frac{V_{\text{завант}}}{V_{\text{роб}}} = \frac{5,284}{0,3} = 18 \text{ шт}$$

Розрахуємо об'єм рідини в циліндричній частині реактора V<sub>рц</sub>:

$$V_{\text{рц}} = V_{\text{роб}} - V_{\text{дн}} = 0,3 - 0,07 = 0,23 \text{ м}^3.$$

В такому випадку, висота рідини у циліндричній частині реактора:

$$H_{\text{ц}} = \frac{V_{\text{рц}}}{\pi * R^2_{\text{вн.}}} = \frac{0,23}{3,14 * 0,4^2} = 0,458 \text{ м.}$$

Визначимо загальну висоту рідини:

$$H_p = H_{\text{ц}} + h_1 + H_{\text{ел}} = 0,458 + 0,025 + 0,2 = 0,683 \text{ м.}$$

Швидкість рамних мішалок приблизно w = 1-3 м/с. Візьмемо середнє w = 2 м/с.

В такому випадку частота обертання вала мішалки:

$$d_M = 750 \text{ мм, } d_M = 0,75 \text{ м.}$$

$$n = \frac{w}{\pi * d_M} = \frac{2}{3,14 * 0,75} = 0,85 \text{ с}^{-1} \text{ (51 об/хв).}$$

Значення критерію Рейнольдса  $Re$  обчислюємо:

$$Re = \frac{n \cdot d^2 \cdot \rho}{\mu} = \frac{0,85 \cdot 0,75^2 \cdot 1157}{0,00054} = 1024166.$$

$$\rho_{\text{маси}} = 1157 \text{ кг/м}^3.$$

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

Для рамної мішалки з двома горизонтальними лопатями потужність розраховується за наступним критерієм:

$$K_N = 12 \cdot Re^{0,77} \cdot \frac{h}{d} = 12 \cdot 1024166^{0,77} \cdot \frac{700}{750} = 475550 \text{ Вт.}$$

Потужність, що витрачається на перемішування :

$$N = K_N \cdot \mu \cdot n^2 \cdot d^3 = 475550 \cdot 0,00054 \cdot 0,85^2 \cdot 0,75^3 = 78,3 \text{ Вт.}$$

Потужність, що втрачається на тертя в сальнику:

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

де  $p = 10 \text{ Па}$ ;

$f$  – коефіцієнт тертя,  $f = 0,2$ ;

$l = 4 \cdot d_b = 4 \cdot 0,03 = 0,11 \text{ м}$  – довжина набивки сальника.

$$N_c = 9,84 \cdot (10 + 0,98 \cdot 10^5) \cdot 0,2 \cdot 0,12 \cdot 0,85 \cdot 0,03^2 = 17,7 \text{ Вт.}$$

Розрахуємо потужність електродвигуна приводу:

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

де  $\eta$  – к.к.д. приводу,  $\eta = 0,9$ ;

$$k_1 = \frac{H_p}{D} = \frac{0,683}{0,8} = 0,85 \text{ – коефіцієнт, що враховує заповнення ємності}$$

перемішувальною рідиною.

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

$$N_{\text{ед}} = \frac{0,85 \cdot 1 \cdot 78,3 + 17,7}{0,9} = 93,6 \text{ Вт.}$$

Таким чином, потужність електродвигуна повинна бути не менша за  $N_{\text{min}} = 93,6 \text{ Вт}$ . Згідно з каталогом, вибрано електродвигун для мотор-редуктора потужністю  $0,12 \text{ кВт}$ . Враховуючи обрану потужність та частоту

обертання вала мішалки, було обрано мотор-редуктор (4МП-50), висота приводу якого становить 450 мм.

Отже, загальна висота реактора з приводом складає:

$$H_{\text{заг}} = 800 + 100 = 900 \text{ мм.}$$

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

$$D_{\text{сорочки}} = 800 + 100 = 900 \text{ мм.}$$

Вихідні дані із книги: І.Ф. Малежик. Процеси і апарати харчових виробництв. Курсове проектування. Київ НУХТ 2012. 543 с [29].

Реактор з турбінною мішалкою зображено на рисунку 2.3:

## 2.5 Опис апаратурної технологічної схеми виробництва

Технологічний процес розпочинається у реакторі-змішувачі 1, куди подаються вода та малеїновий ангідрид. При температурі 60–100°C відбувається гідратація суміші, внаслідок чого утворюється проміжний продукт — малеїнова кислота.

За допомогою відцентрового насоса 2 розчин передається до наступного реактора-змішувача 3. На цьому етапі проходить процес ізомеризації: малеїнова кислота трансформується у цільовий продукт — фумарову кислоту. Після завершення реакції отриману суміш охолоджують до 15–20°C та відцентровим насосом 4 перекачують у кристалізатор 5 для виділення твердої фази.

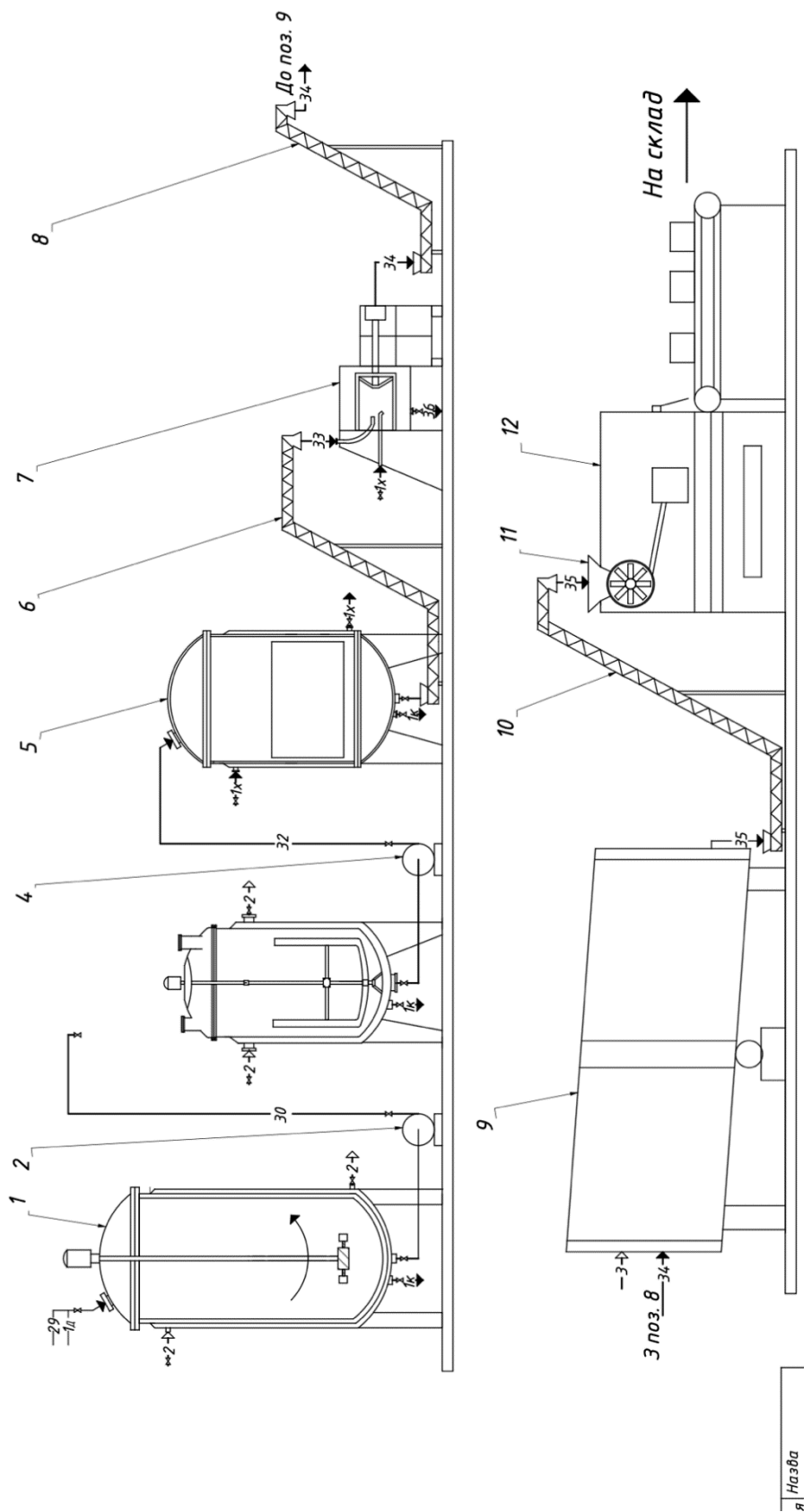
Для забезпечення високого ступеня чистоти кристали додатково промивають водою.

Утворені кристали шнековим транспортером 6 подаються на центрифугу 7. Тут відбувається відділення маточного розчину, що містить розчинні домішки та залишки реакційних продуктів.

Наступним етапом є зневоднення продукту. Шнековим транспортером 8 вологі кристали завантажують у барабанну сушарку 9. Після висушування напівфабрикат транспортером 10 спрямовується до молоткової дробарки 11, де подрібнюється до необхідної фракції. Завершується цикл фасуванням готової фумарової кислоти та її транспортуванням на склад.

Апаратурна технологічна схема зображена на рисунку 2.3:

Рисунок 2.3 Апаратно-технологічна схема



### РОЗДІЛ ІІІ ТЕХНІКО-ЕКОНОМІЧНЕ ОБҐРУНТУВАННЯ

Виробничі витрати складаються з суми витрат на ресурси, які використовуються для виготовлення певного обсягу продукції. Структура формування собівартості продукції включає витрати на сировину та матеріали, оплату праці працівників, витрати на експлуатацію приміщень та обладнання, а також витрати на соціальні програми.

Для виготовлення будь-якого продукту необхідно враховувати витрати на придбання сировини та матеріалів, які поділяються на прямі і непрямі. Прямі витрати – це основні витрати на сировину, які можуть бути точно визначені і обчислені, наприклад, витрати на закупівлю сировини. Непрямі витрати – це витрати на допоміжні матеріали, які складно точно кількісно оцінити.

Витрати на персонал включають як прямі, так і непрямі витрати. Прямі витрати – це заробітна плата та надбавки для працівників, які безпосередньо залучені до виробничого процесу, таких як оператори, технічний персонал та лаборанти. Непрямі витрати – це оплата праці співробітників, що забезпечують підтримку виробничого процесу, зокрема кадри, адміністрація, маркетинг та управлінський персонал.

Витрати на будівлі та обладнання включають кошти, витрачені на утримання виробничих, складських та офісних приміщень, а також витрати на оплату комунальних послуг, амортизацію, технічне обслуговування та оновлення обладнання.

Витрати на соціальні потреби охоплюють усі види соціальних виплат, які здійснює підприємство, включаючи внески до пенсійного фонду, медичне страхування та податки.

Відповідальна організація НУХТ, каф. ТЖХТ	Технічне узгодження Біла Г.М	Вид документа Пояснювальна записка	Статус документа			
Власник документа  НУХТ	Розробник документа Кулик К.С.	Назва, додаткова назва  РОЗДІЛ ІІІ ТЕХНІКО- ЕКОНОМІЧНЕ ОБҐРУНТУВАННЯ	ННІХТ.ЗХТ-5-3.026.161.009.КП.ПЗ			
	Документ затверджено Носенко Т.Т.		Інд. змін.	Дата видання	Мова ua	Аркуш 61/75

У рамках проекту здійснюється розрахунок собівартості сировини, витрат на оплату праці та інших виробничих витрат для отримання однієї тонни фумарової кислоти. Розрахунок економічної ефективності представлений у таблиці 3.1:

Таблиця 3.1

Розрахунок собівартості виробництва 1т продукту

Назва	Сумма, грн.
Сировина і основні матеріали	47467
Тара і допоміжні матеріали	5000
Електроенергія та водопостачання	30000
Заробітна платня з вирахуваннями	50000
Логістичні витрати	8000
Всього	140467

Згідно з проведеними розрахунками, собівартість виробництва 1000 кг фумарової кислоти складатиме 140467 грн.

Вартість 1 кг фумарової кислоти складатиме 140 грн.

## РОЗДІЛ IV ОРГАНІЗАЦІЯ КОНТРОЛЮ ЯКОСТІ ПРОДУКЦІЇ

Організація відділу контролю якості (ВКЯ) у виробництві фумарової кислоти згідно з принципами Належної виробничої практики (GMP) вимагає суворого розмежування функцій між виробничими потужностями та аналітичною лабораторією. Головним постулатом GMP є незалежність контролю якості від виробництва, що забезпечує неупередженість при прийнятті рішення про випуск серії продукту в обіг. Структура ВКЯ повинна включати аналітичну лабораторію, лабораторію мікробіологічного контролю та групу забезпечення документації, яка відповідає за архівацію арбітражних зразків та ведення журналів стабільності. Керівник відділу контролю якості має прямий обов'язок затверджувати або відхиляти вихідну сировину, пакувальні матеріали, проміжні продукти та готову фумарову кислоту, ґрунтуючись виключно на результатах лабораторних випробувань та аналізі протоколів виробництва.

Процес контролю починається з етапу надходження вихідної сировини, де кожен контейнер з малеїновим ангідридом або каталізаторами підлягає карантинному зберіганню до моменту отримання позитивного висновку лабораторії. Відбір проб здійснюється за чітко визначеною процедурою, у спеціально обладнаних зонах з ламінарним потоком повітря, щоб уникнути перехресного забруднення. Кожна проба ідентифікується та аналізується на відповідність специфікаціям, які включають перевірку ідентичності, чистоти та відсутності критичних домішок. Тільки після наклеювання зеленої етикетки «Допущено» сировина може бути передана в реакторний цех для початку процесу ізомеризації.

Відповідальна організація НУХТ, каф. ТЖХТ	Технічне узгодження Біла Г.М	Вид документа Пояснювальна записка	Статус документа			
Власник документа НУХТ	Розробник документа Кулик К.С.	Назва, додаткова назва РОЗДІЛ IV ОРГАНІЗАЦІЯ КОНТРОЛЮ ЯКОСТІ ПРОДУКЦІЇ	ННІХТ.ЗХТ-5-3.026.161.009.КП.ПЗ			
	Документ затверджено Носенко Т.Т.		Інд. змін.	Дата видання	Мова ца	Аркуш 63/75

Внутрішньовиробничий контроль є наступною критичною ланкою організації GMP. На етапі реакції в реакторі-змішувачі лаборанти ВКЯ проводять експрес-аналізи на повноту перетворення малеїнової кислоти у фумарову, контролюючи динаміку випадіння кристалів та залишковий вміст малеїнового ізомера. Температурні режими кристалізації та час експозиції в друк-фільтрі також документуються в протоколі серії, що дозволяє відстежити будь-які відхилення від валідованого технологічного процесу. Важливо, що GMP вимагає валідації всіх аналітичних методів, які використовуються для контролю: від титрування до газової хроматографії, щоб підтвердити їхню точність, лінійність та відтворюваність у специфічних умовах виробництва фумарової кислоти.

Особлива увага в організації контролю якості приділяється чистоті обладнання та приміщень. Після кожного циклу виробництва проводиться відбір змивів з внутрішніх поверхонь реакторів, кристалізаторів та шнекових транспортерів для перевірки на відсутність залишків попередньої серії та мийних засобів. Результати цих аналізів фіксуються в журналах прибирання, які є невід'ємною частиною дос'є на серію. Лабораторія мікробіологічного контролю паралельно здійснює моніторинг повітряного середовища та води, що використовується в процесі промивання кристалів фумарової кислоти, оскільки харчова добавка E297 повинна відповідати суворим лімітам щодо вмісту дріжджів, плісняви та патогенних ентеробактерій.

Аналіз готової продукції є фінальним етапом, де кожна партія фумарової кислоти проходить комплексне тестування за показниками органолептики, розчинності, температури плавлення та вмісту важких металів. Найважливішим аналітичним тестом є визначення масової частки основної речовини, яка за стандартами GMP та харчовими кодексами повинна становити не менше 99.5%. Будь-який результат, що виходить за межі специфікацій (OOS — Out of Specification), ініціює офіційне розслідування, під час якого перевіряються помилки аналітика, несправність приладів або реальні порушення в ході

синтезу. Випуск серії, яка мала OOS-результат, заборонений до повного з'ясування причин та проведення корегувальних дій (CAPA).

Організація стабільності та архівації зразків завершує життєвий цикл контролю якості. ВКЯ зобов'язаний зберігати контрольну кількість зразків від кожної випущеної серії фумарової кислоти в оригінальній упаковці протягом усього терміну придатності плюс один рік. Ці зразки використовуються для періодичного тестування на стабільність, що проводиться в спеціальних кліматичних камерах при контрольованій температурі та вологості. Це дозволяє гарантувати споживачеві, що порошок не злежиться, не змінить колір та не втратить своїх підкислювальних властивостей під впливом зовнішніх факторів протягом усього заявленого періоду зберігання. Весь масив даних, отриманий в результаті цих процесів, підлягає щорічному огляду якості продукції (PQR), який дозволяє виявити тенденції та постійно вдосконалювати технологію виробництва.

## РОЗДІЛ V ЕКОЛОГІЧНА ЧАСТИНА

### 5.1 Охорона праці на підприємстві

Основним джерелом небезпеки на початкових етапах є малеїновий ангідрид, який при контакті зі слизовими оболонками або вологою шкірою миттєво перетворюється на кислоту, викликаючи глибокі хімічні опіки. Через це робоча зона повинна бути обладнана потужною припливно-витяжною вентиляцією, а персонал зобов'язаний використовувати спеціальні захисні костюми, стійкі до дії органічних сполук, разом із герметичними окулярами та респіраторами. Важливо розуміти, що навіть незначне вдихання парів ангідриду може призвести до набряку дихальних шляхів, тому контроль стану повітряного середовища в цеху здійснюється безперервно за допомогою автоматичних газоаналізаторів.

Особлива увага приділяється безпеці під час експлуатації реакторного та кристалізаційного обладнання. Оскільки реакція ізомеризації відбувається при нагріванні понад сто градусів Цельсія, існує постійний ризик термічних опіків через контакт із гарячими поверхнями або у разі аварійного викиду пари. Усі паропроводи та корпуси реакторів мають бути надійно теплоізольовані, а запірні арматури повинні проходити регулярну перевірку на герметичність. Робочі місця біля реакторів обов'язково обладнуються аварійними душами та фонтанчиками для промивання очей, які повинні бути доступними протягом кількох секунд у разі потрапляння гарячої реакційної маси на тіло працівника. Охорона праці також передбачає суворе доотримання протоколів безпеки при роботі з посудинами, що працюють під тиском, включаючи щозмінну перевірку справності запобіжних клапанів та манометрів.

<i>Відповідальна організація</i> НУХТ, каф. ТЖХТ	<i>Технічне узгодження</i> Біла Г.М	<i>Вид документа</i> Пояснювальна записка	<i>Статус документа</i>			
<i>Власник документа</i>  НУХТ	<i>Розробник документа</i> Кулик К.С.	<i>Назва, додаткова назва</i>  РОЗДІЛ V ЕКОЛОГІЧНА ЧАСТИНА	<i>ННІХТ.ЗХТ-5-3.026.161.009.КП.ПЗ</i>			
	<i>Документ затверджено</i> Носенко Т.Т.		<i>Інд. змін.</i>	<i>Дата видання</i>	<i>Мова</i> ца	<i>Аркуш</i> 66/75

Механічні небезпеки зосереджені в зонах роботи шнекових транспортерів та молоткових дробарок. Рухомі частини цих апаратів становлять загрозу затягування кінцівок або одягу, тому всі приводи мають бути закриті суцільними металевими кожухами, а люки обслуговування — обладнані датчиками автоматичного відключення живлення при їх відкритті. Під час роботи дробарок рівень шуму може перевищувати допустимі норми, що вимагає обов'язкового використання протишумових навушників або берушів для захисту органів слуху. Крім того, оскільки обладнання виготовлене з металу і працює у вологому середовищі, критично важливим є належне заземлення всіх корпусів та регулярна перевірка ізоляції кабелів для запобігання ураженню електричним струмом.

Завершальні етапи виробництва, такі як сушіння та фасування, створюють значне пилове навантаження. Пил фумарової кислоти не тільки подразнює легені, але й може утворювати вибухонебезпечні суміші з повітрям у закритих приміщеннях. Охорона праці в цих зонах вимагає використання іскробезпечного електрообладнання та регулярного вологого прибирання для запобігання накопиченню порошку на конструкціях. Персонал, що працює на фасуванні, проходить поглиблені медичні огляди для раннього виявлення професійних захворювань дихальних шляхів. Загалом, система безпеки на такому підприємстві базується на поєднанні інженерних засобів захисту, автоматизації небезпечних операцій та безперервного навчання працівників алгоритмам дій у надзвичайних ситуаціях.

## **5.2 Охорона навколишнього середовища**

Найбільший екологічний тиск створюється на етапі фільтрації та промивання кристалів фумарової кислоти, де утворюється великий об'єм так званих маточних розчинів. Ці рідини містять не лише залишки нереакційної малеїнової кислоти, але й каталізатори, такі як тіосечовина або мінеральні кислоти, що робить їх надзвичайно корозійними та небезпечними для водних

організмів. Організація охорони довкілля вимагає створення на підприємстві локальних очисних споруд, де першим етапом є повна нейтралізація кислотності. Традиційний метод використання вапняного молока призводить до утворення величезної кількості сульфату кальцію, або технічного гіпсу, який часто просто вивозиться на полігони, створюючи проблему накопичення твердих відходів.

Більш прогресивним та екологічно виправданим шляхом є впровадження систем замкненого водопостачання. Замість того, щоб скидати промивні води в каналізацію, їх піддають глибокому очищенню за допомогою зворотної осмосу або електродіалізу. Це дозволяє повернути до дев'яноста відсотків чистої води назад у технологічний цикл, одночасно концентруючи цінні органічні залишки для їхнього подальшого термічного знешкодження або повторного використання в реакторі. Такий підхід не лише береже водні ресурси регіону, але й суттєво зменшує витрати на закупівлю свіжої технічної води.

#### *Охорона атмосферного повітря та боротьба з викидами*

Атмосферні викиди на виробництві фумарової кислоти можна розділити на дві категорії: пари летких органічних сполук із реакторів та дрібнодисперсний пил із сушарок і дробарок. Під час нагрівання реакційної суміші частина компонентів може випаровуватися, тому всі реактори обладнуються високоефективними зворотними холодильниками та абсорбційними колонами — скруберами. У цих колонах газу проходять крізь завісу розпиленої рідини, яка поглинає шкідливі домішки, не даючи їм потрапити в димову трубу. Важливо, щоб система вентиляції була інтегрована в загальну схему екологічного моніторингу, яка в режимі реального часу відстежує концентрацію забруднювачів на виході з цеху.

Окремої уваги заслуговує проблема пилового забруднення. Пил фумарової кислоти є дуже легким і здатним поширюватися на значні відстані, осідаючи на ґрунті та змінюючи його кислотність. Щоб цьому запобігти, системи аспірації сушарок оснащуються двоступеневим очищенням: спочатку

циклонами, які вловлюють основну масу порошку, а потім рукавними фільтрами, що затримують найдрібніші частинки. Цікаво, що вловлений таким чином пил не є відходом — його повертають на стадію пакування, що робить процес екологічно чистішим і економічно вигіднішим.

#### *Утилізація твердих відходів та економіка замкнутого циклу*

Тверді відходи у виробництві фумарової кислоти зазвичай представлені відпрацьованими каталізаторами, фільтрувальними елементами та шламами з очисних споруд. Якщо підприємство все ще використовує методику, що генерує велику кількість гіпсу, екологічна стратегія має бути спрямована на пошук ринків збуту для цього побічного продукту. Технічний гіпс після відповідного промивання та сушіння може використовуватися у будівельній галузі для виробництва гіпсокартону або як добавка до цементу. Це ідеальний приклад «зеленої хімії», де відходи одного процесу стають сировиною для іншого.

Щодо небезпечних відходів, таких як відпрацьоване активоване вугілля після стадії очищення розчину, то вони підлягають виключно ліцензованому високотемпературному спалюванню. Сучасні печі для спалювання відходів обладнані системами допалювання газів, що гарантує відсутність діоксинів та інших токсичних сполук у викидах. Важливим аспектом є також мінімізація використання пакувальних матеріалів та перехід на багатопетельні м'які контейнери (біг-беги), які підлягають переробці або багаторазовому використанню.

#### *Екологічний менеджмент та майбутні перспективи*

Справжня охорона довкілля неможлива без людського фактора та системного управління. Впровадження міжнародного стандарту екологічного менеджменту ISO 14001 дозволяє підприємству постійно аналізувати свої ризики та ставити вимірювані цілі щодо зниження викидів. Це включає і енергоефективність: чим менше пари та електрики ми витрачаємо на кілограм

готової кислоти, тим менше палива спалюється на ТЕЦ, і тим меншим є вуглецевий слід продукту.

Перспективним напрямком є перехід від хімічного синтезу з малеїнового ангідриду до мікробіологічного бродіння. Використання специфічних грибів, які перетворюють рослинні цукри на фумарову кислоту, дозволило б повністю відмовитися від нафтохімічної сировини та агресивних каталізаторів. Хоча ця технологія ще потребує вдосконалення для досягнення промислових масштабів, вона є «золотим стандартом» екологічної безпеки майбутнього.

## ВИСНОВКИ

1. Проведено аналіз науково-технічної літератури щодо вивчення технологічного циклу одержання фумарової кислоти. Показано, що використання реакції каталітичної ізомеризації є перспективним і потребує удосконалення у напрямку підвищення виходу цільового продукту. Завдяки впровадженню інноваційних рішень забезпечено оптимізацію витратних коефіцієнтів, що дозволило суттєво знизити питомі витрати сировини на одиницю готової продукції.
2. Розроблено та обґрунтовано вдосконалені принципову та апаратурно-технологічну схеми виробництва. Запропонована структура не лише мінімізує експлуатаційні витрати, а й суттєво підвищує екологічний індекс підприємства через реалізацію принципів маловідходного виробництва та раціонального використання енергоресурсів.
3. Здійснено кількісну оцінку матеріальних потоків виробництва фумарової кислоти. Розрахунковим шляхом встановлено, що інтегральний рівень технологічних втрат у межах запропонованої схеми становить 5%.
4. Проведено конструктивний та технологічний розрахунок основних характеристик реактору з турбінною відкритою мішалкою з робочим об'ємом 0,3 м<sup>3</sup>: діаметр – 800 мм, висота – 770 мм, діаметр мішалки – 800 мм.
5. Проведено калькуляцію економічної ефективності проєктованого виробництва. На основі розрахунків визначено собівартість продукції – 140 грн. за кг фумарової кислоти, що підтверджує фінансову доцільність та конкурентоспроможність розробленої технології.
6. Сформовано комплексну систему контролю якості на всіх етапах виробничого циклу. Регламентовано ключові показники якості та параметри безпечності фумарової кислоти відповідно до чинних вимог нормативної документації та стандартів харчової промисловості.

<i>Відповідальна організація</i> НУХТ, каф. ТЖХТ	<i>Технічне узгодження</i> Біла Г.М	<i>Вид документа</i> Пояснювальна записка	<i>Статус документа</i>			
<i>Власник документа</i>  НУХТ	<i>Розробник документа</i> Кулик К.С.	<i>Назва, додаткова назва</i>  ВИСНОВКИ	<i>ННІХТ.3ХТ-5-3.026.161.009.КП.ПЗ</i>			
	<i>Документ затверджено</i> Носенко Т.Т.		<i>Інд. змін.</i>	<i>Дата видання</i>	<i>Мова</i> ua	<i>Аркуш</i> 71/75

7. Охорона праці та екологічна безпека. Розроблено та обґрунтовано заходи з промислової безпеки, охорони праці та захисту навколишнього середовища. Запропоновані рішення забезпечують безпечну експлуатацію виробничих потужностей та мінімізують антропогенний вплив на довкілля.

## СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ

1. Fumaric Acid: Production and Application Aspects. Chapter 8 // Platform Chemical Biorefinery. Amsterdam : Elsevier, 2016. P. 131–158.
2. Techno-economic and environmental assessment of bio-based dicarboxylic acids : Analytical reports on bio-economy. [S. l.], P. 21.
3. Goldberg I., Rokem J. S., Pines O. Fumaric acid: A review of its production and applications // Applied Microbiology and Biotechnology. 2006. Vol. 70, no. 3. P. 351–361.
4. Acidulants in Food Processing: Technical Review of Fumaric Acid // Journal of Food Science and Technology. 2020. P. 45.
5. Sebastian J. Biotechnological production of fumaric acid: the state of the art of feedstock and microorganisms / J. Sebastian [et al.] // Critical Reviews in Biotechnology. 2019. Vol. 39, no. 6. P. 835–849.
6. Zhang K. Fumaric acid production: past, present and future / K. Zhang [et al.] // Bioresource Technology. 2015. Vol. 192. P. 724–733.
7. Swart A. J. Review on Fumaric Acid Production from Lignocellulosic Biomass / A. J. Swart [et al.] // Renewable and Sustainable Energy Reviews. 2023. Vol. 171. P. 113012.
8. Das R. K. Platform Chemical Biorefinery: Fumaric Acid / R. K. Das [et al.]. Amsterdam : Elsevier, 2016.
9. Recent developments in the biotechnological production of fumaric acid // Bioresource Technology. 2023. Vol. 367. P. 128211.
10. Advanced recovery and purification of organic acids from fermentation broth // Journal of Chemical Technology & Biotechnology. 2024. P. 32.

<i>Відповідальна організація</i> НУХТ, каф. ТЖХТ	<i>Технічне узгодження</i> Біла Г.М	<i>Вид документа</i> Пояснювальна записка	<i>Статус документа</i>			
<i>Власник документа</i>  НУХТ	<i>Розробник документа</i> Кулик К.С.	<i>Назва, додаткова назва</i>  РОЗДІЛ V ЕКОЛОГІЧНА ЧАСТИНА	ННІХТ.ЗХТ-5-3.026.161.009.КП.ПЗ			
	<i>Документ затверджено</i> Носенко Т.Т.		<i>Інд. змін.</i>	<i>Дата видання</i>	<i>Мова</i> ua	<i>Аркуш</i> 73/75

11. Comparative analysis of chemical and biological routes for fumaric acid // Green Chemistry Reviews. 2025. P. 56.
12. Optimization of fermentation parameters for organic acid production // Journal of Industrial Microbiology. 2024. Vol. 51. P. 156.
13. New frontiers in metabolic engineering of filamentous fungi for dicarboxylic acid synthesis // Frontiers in Bioengineering. 2023. Vol. 11. P. 1140131.
14. Membrane-based separation and purification in biotechnology: A comprehensive review // Separation and Purification Technology. 2024. Vol. 330. P. 125345.
15. Advanced carbon capture and utilization (CCU) in organic acid fermentation // Green Energy & Environment. 2025. P. 19.
16. Maleic Anhydride: Production and Derivatives // Chemical Engineering Progress Review. 2024. Vol. 120. P. 149.
17. Catalytic Science of VPO Catalysts: Selective Catalytic Oxidation of n-Butane // Journal of Catalysis. 2023. Vol. 421. P. 154–168.
18. Industrial Applications of Maleic Anhydride in Polymer Chemistry // Applied Sciences Review. 2025. Vol. 15. P. 12-89.
19. Advances in Sustainable Production of Bio-based Maleic Anhydride // Green Chemistry & Engineering. 2024. Vol. 32. P. 34-90.
20. Water Properties and Behavior in Physical Systems // Scientific Review. 2023. Vol. 44. P. 130-239.
21. García M. R. Physicochemical Basis of Water Behavior in Biological Systems / M. R. García [et al.] // Journal of Molecular Liquids. 2024. Vol. 395. P. 123841.
22. Standardized Parameters for Process Water in the Food Industry // International Food Safety Review. 2025. Vol. 10. P. 389.
23. Water as a Fundamental Chemical Reagent: Acid-Base and Redox Properties // Scientific Review of Inorganic Chemistry. 2024. Vol. 58. P. 87.

24. The Role of Water in Organic Synthesis and Catalysis // Green Chemistry & Engineering Reviews. 2023. Vol. 11. P. 120-145.
25. Physicochemical properties of maleic acid and its derivatives // Chemical Physics Reviews. 2023. Vol. 4. P. 021305.
26. Maleic acid in organic synthesis: A comprehensive review // Journal of Organic Chemistry & Catalysis. 2024. Vol. 89. P. 12-60.
27. Catalytic transformation and reactivity of cis-butenedioic acid // Applied Catalysis B: Environmental. 2023. Vol. 332. P. 122754.
28. Industrial applications of maleic acid as a chemical building block // Green Chemistry & Sustainable Technology. 2025. Vol. 13. P. 15.
29. І.Ф. Малежик. Процеси і апарати харчових виробництв. Курсове проектування. Київ НУХТ 2012. 543 с