**ДНІПРОВСЬКИЙ ДЕРЖАВНИЙ АГРАРНО-ЕКОНОМІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ**

**Інженерно-технологічний факультет**

Кафедра харчових технологій

# П о я с н ю в а л ь н а  з а п и с к а

до кваліфікаційної роботи
ступеня вищої освіти «Бакалавр»
на тему:

# «ОБҐРУНТУВАННЯ ТЕХНОЛОГІЇ УТИЛІЗАЦІЇ ВІДХОДІВ ВИРОБНИЦТВА М'ЯСНИХ ПРОДУКТІВ»

**Виконала**: здобувачка вищої освіти 4 курсу,
групи ХТ-1-22 освітньо-професійної
програми «Харчові технології»
зі спеціальності 181 «Харчові технології»

_____ Ульяна КАРАГОДІНА

**Керівник**: _____ Олег Тертишний

**Рецензент: _____**

Дніпро 2026

Дніпровський державний аграрно-економічний університет
**ДНІПРОВСЬКИЙ ДЕРЖАВНИЙ АГРАРНО-ЕКОНОМІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ**

**Інженерно-технологічний факультет**

Кафедра харчових технологій
Ступінь вищої освіти: «Бакалавр»
Освітньо-професійна програма: «Харчові технології»
Спеціальність: 181 Харчові технології

Затверджую:
завідувача кафедри харчових технологій
к.т.н., доцент _____ Віталій КОШУЛЬКО
«_____» _____ 2026 р.

ЗАВДАННЯ
НА КВАЛІФІКАЦІЙНУ РОБОТУ ЗДОБУВАЧЦІ ВИЩОЇ ОСВІТИ
Карагодіній Ульяні Ігорівні
(прізвище, ім’я, по батькові)

1. Тема роботи: «Обґрунтування технології утилізації відходів виробництва м’ясних продуктів», керівник роботи Тертишний Олег Олександрович, к.т.н., доцент – затверджені наказом ректора від «01» травня 2026 р. №875.
2. Термін здачі закінченої роботи: «10» червня 2026 р.
3. Вихідні дані до роботи: загальні відомості про об’єкт досліджень (М’ясокомбінат «Ювілейний»); нормативна, довідникова, наукова документація і література.
4. Зміст розрахунково-пояснювальної записки: Розділ 1. Огляд літературних джерел за темою досліджень; Розділ 2. Методика та характеристика об’єкту досліджень; Розділ 3. Технологічні розрахунки процесу утилізації відходів м’ясопереробного підприємства; Розділ 4. Еколого-економічна ефективність запроектованих рішень; Розділ 5. Охорона праці та санітарна безпеки під час робіт з утилізації відходів м’ясопереробного підприємства; Загальні висновки; бібліографія.
5. Перелік демонстраційного матеріалу: презентація згідно змісту кваліфікаційної роботи у програмному середовищі Microsoft PowerPoint.

КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

| № з. п. | Назва етапів дипломної роботи | Термін виконання етапів роботи | Примітка |
|---|---|---|---|
| 1 | Розділ 1. Огляд літературних джерел за темою досліджень | 01.05-10.05.2026 | |
| 2 | Розділ 2. Методика та характеристика об’єкту досліджень | 11.05-14.05.2026 | |
| 3 | Розділ 3. Технологічні розрахунки процесу утилізації відходів м’ясопереробного підприємства | 15.05-28.05.2026 | |
| 4 | Розділ 4. Еколого-економічна ефективність запроектованих рішень | 29.05-02.06.2026 | |
| 5 | Розділ 5. Охорона праці та санітарна безпеки під час робіт з утилізації відходів м’ясопереробного підприємства | 03.06-09.06.2026 | |
| 6 | Вступ, висновки, бібліографія, підготовка презентації | 10.06-12.06.2026 | |

Дата видачі завдання: 02 травня 2026 р.

Здобувач вищої освіти _____ (Ульяна КАРАГОДІНА)
(підпис)

Керівник роботи _____ (Олег ТЕРТИШНИЙ)
(підпис)

ЗМІСТ

РЕФЕРАТ …… 5
ВСТУП ……... 6
РОЗДІЛ 1. ОГЛЯД ЛІТЕРАТУРНИХ ДЖЕРЕЛ ЗА ТЕМОЮ ДОСЛІДЖЕНЬ ……... 11
1.1. Сучасний стан галузі переробки м’ясних продуктів та проблеми накопичення вторинних сировинних ресурсів …….. 11
1.2. Сучасні управлінські підходи до розробки систем глибокої переробки (утилізації) побічних продуктів м’ясопереробних підприємств ……. 14
1.3. Перспективні напрями та шляхи використання вторинних сировинних ресурсів м’ясопереробних підприємства ……... 15
РОЗДІЛ 2. МЕТОДИКА ТА ХАРАКТЕРИСТИКА ОБ’ЄКТУ ДОСЛІДЖЕНЬ ……... 18
2.1. Загальні відомості про об’єкт дослідження ……. 18
2.2. Загальні методичні підходи до визначення характеристик вторинних сировинних ресурсів м’ясопереробних підприємства …….. 23
2.3. Методика технологічних розрахунків утилізації та повторного використання відходів …….. 27
2.4. Методичні основи еколого-економічної оцінки …….. 33
РОЗДІЛ 3. ТЕХНОЛОГІЧНІ РОЗРАХУНКИ ПРОЦЕСУ УТИЛІЗАЦІЇ ВІДХОДІВ М’ЯСОПЕРЕРОБНОГО ПІДПРИЄМСТВА ……. 35
3.1. Технологічні розрахунки витрат і запасів основної продукції та відходів ……. 35

3.2. Обґрунтування технології та розрахунок параметрів системи очищення стічних вод …… 39
3.3. Обґрунтування технології утилізації крові та інших побічних продуктів ……... 42
3.4. Обґрунтування перспективності технології улаштування біогазової установки в системі рециклінгу відходів …….. 45
РОЗДІЛ 4. ЕКОЛОГО-ЕКОНОМІЧНА ЕФЕКТИВНІСТЬ ЗАПРОЕКТОВАНИХ РІШЕНЬ ……... 50
4.1. Загальна характеристика фінансових витрат при облаштуванні очисних споруд та системи рециклінгу відходів 50
4.2. Економічна ефективність запроєктованих рішень 52
РОЗДІЛ 5. ОХОРОНА ПРАЦІ ТА САНІТАРНА БЕЗПЕКИ ПІД ЧАС РОБІТ З УТИЛІЗАЦІЇ ВІДХОДІВ М'ЯСОПЕРЕРОБНОГО ПІДПРИЄМСТВА ……. 55
5.1. Організація системи охорони праці на підприємстві ……. 55
5.2. Виробнича санітарія та безпеки при роботі з відходами м'ясопереробних підприємств ……. 57
ВИСНОВКИ ……... 61
БІБЛІОГРАФІЯ …….. 64

# РЕФЕРАТ

Пояснювальна записка кваліфікаційної роботи складається зі вступу, 5 розділів, загальних висновків та списку використаних джерел із 12 найменувань. Робота викладена на 65 сторінках комп’ютерного тексту, містить 5 таблиць та 7 рисунків.

Об'єкт дослідження – технологічні процеси поводження з органічними відходами, вторинними сировинними ресурсами та висококонцентрованими стічними водами на ТОВ М’ясокомбінат «Ювілейний» (Дніпропетровська обл.) при проектній потужності переробки 60 тон м’яса на добу.

Мета роботи – технологічне та інженерне обґрунтування комплексної ресурсоощадної системи утилізації побічних продуктів тваринного походження та локального очищення висококонцентрованих стоків м’ясокомбінату з отриманням товарних протеїнових продуктів та біогазу.

Методи досліджень – системний аналіз літературно-довідникових джерел, встановлення матеріальних та водних балансів, методи аналізу складу органічних субстратів і стічних вод, математичне моделювання процесів анаеробного метаногенезу, інженерні гідродинамічні розрахунки очисних споруд та техніко-економічне обґрунтування інвестицій.

Ключові слова: *м’ясопереробне підприємство, утилізація відходів, стічні води, жироловка, напірна реагентна флотація, коагулянт, сепарування крові, харчовий альбумін, біогазова установка, метантенк, когенерація, еколого-економічна ефективність.*

# ВСТУП

М’ясопереробна промисловість є одним із ключових та найбільш динамічних секторів глобального агропромислового комплексу, що безпосередньо забезпечує продовольчу безпеку планети та задовольняє базові фізіологічні потреби людства у високоякісному тваринному білку. На сучасному етапі розвитку глобальний ринок м’ясних продуктів демонструє стійке і безперервне зростання, зумовлене невпинним збільшенням чисельності населення Землі, процесами глобальної урбанізації та підвищенням купівельної спроможності в країнах, що розвиваються. За даними Продовольчої та сільськогосподарської організації ООН (FAO), загальні обсяги світового виробництва м’яса вже перевищили позначку у 350 мільйонів тон на рік і продовжують масштабуватися. Проте, таке стрімке нарощування потужностей супроводжується жорсткою індустріалізацією та інтенсифікацією тваринництва, що висуває принципово нові вимоги до технологічної зрілості та екологічної відповідальності переробних підприємств.

У країнах Європейського Союзу (ЄС) та Сполучених Штатах Америки (США) м’ясопереробна галузь досягла найвищого рівня консолідації капіталу, автоматизації виробничих процесів та технологічної інтеграції. На ринку США домінують транснаціональні корпорації-гіганти, які впроваджують наскрізний контроль якості за принципом «від поля до столу». В країнах ЄС розвиток галузі підпорядкований жорстким регуляторним актам Спільної аграрної політики, де пріоритет надається не лише кількісним показникам, а й біодеструкції відходів, гуманному поводженню з тваринами та мінімізації вуглецевого сліду. Західні виробничі моделі орієнтовані на глибоку цифровізацію, застосування робототехніки на лініях забою та первинного

розбирання, а також на впровадження суворих стандартів харчової безпеки, таких як HACCP та ISO 22000, що дозволяє мінімізувати технологічні втрати сировини та оптимізувати матеріальні потоки.

Для України м’ясопереробна промисловість є стратегічно важливою ланкою національної економіки, яка має колосальний експортний потенціал і виступає потужним драйвером розвитку суміжних галузей рослинництва, тваринництва та сільськогосподарського машинобудування. Вітчизняний сектор переробки м’яса за останні десятиліття пройшов складну трансформацію від застарілих радянських комбінатів до сучасних інтегрованих агрохолдингів та кластерів. В умовах підписання Угоди про асоціацію з ЄС українські підприємства здійснили масштабну модернізацію виробничих ліній, адаптувавши свої технологічні цикли до європейських регламентів. Проте, сучасні макроекономічні виклики, нестабільність сировинної бази та необхідність підвищення конкурентоспроможності вітчизняної готової продукції на міжнародних ринках вимагають від українських м’ясокомбінатів пошуку нових інструментів підвищення рентабельності, головним серед яких є перехід від лінійної моделі виробництва до засад циркулярної економіки.

Зворотним та найбільш критичним боком інтенсифікації світового виробництва м’ясних продуктів є утворення колосальних об’ємів побічних продуктів тваринного походження (ППТП) та висококонцентрованих стічних вод. У глобальному масштабі середня питома вага нехарчових та технічних фабрикатів (кров, кісткова сировина, кератинові відходи, вміст шлунково-кишкового тракту) може досягати від 30% до 50% від живої маси тварини, що направляється на забій. Неконтрольоване накопичення зазначеної біомаси або її несанкціоноване захоронення у навколишньому природному середовищі створює катастрофічне антропогенне навантаження на локальні екосистеми. Органічна речовина відходів є ідеальним субстратом для масового розвитку патогенної мікрофлори, що зумовлює високу епідеміологічну, ветеринарно-санітарну та біологічну небезпеку світового

рівня. Крім того, процеси природного розкладу білкових та жирових компонентів супроводжуються масштабною емісією в атмосферне повітря парникових газів (метану, вуглекислого газу) та токсичних речовин (аміаку, сірководню та ін.).

У країнах ЄС та США проблема накопичення тваринних відходів врегульована на законодавчому рівні за допомогою суворих нормативно-правових інструментів. Зокрема, у Європейському Союзі діє фундаментальний Регламент ЕС № 1069/2009, який чітко класифікує всі побічні продукти тваринного походження на три категорії залежно від ступеня ризику для здоров'я людей та тварин. Вивезення таких субстратів на полігони твердих побутових відходів у західних країнах повністю заборонено і карається величезними штрафними санкціями. Будь-яке підприємство зобов’язане забезпечити повну простежуваність руху ППТП та їх передачу на спеціалізовані утилізаційні заводи або переробку безпосередньо в межах замкненого виробничого контуру.

В Україні ситуація з поводженням із побічними продуктами м’ясопереробки залишається надзвичайно гострою та екологічно напруженою. Незважаючи на ухвалення Закону України «Про побічні продукти тваринного походження, не призначені для споживання людиною», інфраструктура для їхнього збирання, розділення та глибокої переробки у більшості регіонів є морально застарілою або повністю відсутньою. Багато вітчизняних підприємств змушені нести величезні фінансові збитки, сплачуючи за вивезення відходів на нечисленні спеціалізовані заводи або накопичуючи їх на відкритих майданчиках, що викликає деградацію ґрунтів і підземних вод. Особливе місце в структурі вітчизняних екологічних проблем посідають стічні води м’ясокомбінатів. Вони характеризуються екстремально високими показниками хімічного (ХСК) та біохімічного (БСК) споживання кисню, високою концентрацією емульгованих жирів та завислих речовин. Скидання таких стоків у муніципальні каналізаційні мережі без попереднього локального очищення призводить до блокування міських

колекторів та пригнічення активного мулу комунальних очисних споруд.

Сучасна світова екологічна практика доводять, що єдиним ефективним шляхом вирішення зазначених проблем є повна відмова від лінійних моделей поводження з відходами за принципом «утворення – захоронення» та перехід до концепції агропромислової екології. Впровадження технологій рециклінгу та глибокої біоконверсії дозволяє трансформувати суттєві екологічні витрати підприємств у додаткові високорентабельні джерела прибутку шляхом отримання вторинних матеріальних та енергетичних ресурсів. Перспективні високотехнологічні напрями переробки ППТП включають ультрафракціонування крові з виділенням світлої плази та формених елементів, керований ферментативний гідроліз кісткової сировини для екстракції колагену та желатину, а також новітні методи ентомологічної конверсії за допомогою комах.

Для України розвиток та впровадження інтегрованих систем локального очищення стоків та енергетичного рециклінгу відходів м’ясопереробки є життєво необхідним кроком на шляху до євроінтеграції та забезпечення національної енергетичної незалежності. З огляду на високу вартість традиційних енергоносіїв для промислових споживачів, створення автономних біоенергетичних вузлів на базі великих м'ясокомбінатів є потужним інструментом зниження собівартості готової м'ясної продукції. Поєднання механічних методів гравітаційного розділення (жироловок), фізико-хімічної напірної реагентної флотації, ліній сепарування крові та анаеробного зброджування суміші каниги і флотошламу відкриває широкі перспективи для побудови безвідхідних еколого-технологічних комплексів. Впровадження таких рішень, наприклад, на базі ТОВ М’ясокомбінат «Ювілейний» (Дніпропетровська область) при проектній потужності переробки 60 тон м’яса на добу, дозволить обґрунтувати високу еколого-економічну ефективність та інвестиційну привабливість циркулярних моделей в агропромисловому секторі України.

Узагальнюючи вищевикладене, актуальність теми дослідження

зумовлена необхідністю розв’язання гострої науково-технічної та екологічної проблеми – розробки та інженерного обґрунтування замкненої ресурсоощадної технологічної системи поводження з побічними продуктами тваринного походження та стічними водами великого м'ясопереробного підприємства для мінімізації його антропогенного впливу на довкілля та забезпечення енергоавтономності.

*Мета роботи* – технологічне, інженерне та еколого-економічне обґрунтування комплексної ресурсоощадної системи утилізації побічних продуктів тваринного походження та локального очищення висококонцентрованих стоків м’ясокомбінату з отриманням товарних протеїнових продуктів та біогазу (на прикладі ТОВ М’ясокомбінат «Ювілейний»).

*Об’єкт дослідження* – технологічні процеси поводження з органічними відходами, вторинними сировинними ресурсами (тваринна кров, вміст шлунково-кишкового тракту/канига) та висококонцентрованими стічними водами на ТОВ М’ясокомбінат «Ювілейний» при проектній потужності переробки 60 тонн м’яса на добу.

*Предмет дослідження* – закономірності та технологічні параметри процесів гравітаційного розділення вільних жирів, напірної реагентної флотації емульгованих забруднень, фракціонування та сушіння цільної крові, а також характеристики анаеробного мезофільного зброджування багатокомпонентних органічних субстратів з метою зниження екологічного навантаження та генерації енергоносіїв.

# РОЗДІЛ 1. ОГЛЯД ЛІТЕРАТУРНИХ ДЖЕРЕЛ ЗА ТЕМОЮ ДОСЛІДЖЕНЬ

## 1.1. Сучасний стан галузі переробки м’ясних продуктів та проблеми накопичення вторинних сировинних ресурсів

Сучасна м’ясопереробна промисловість України є стратегічно важливою ланкою агропромислового комплексу, що забезпечує продовольчу безпеку та задовольняє попит населення у високоякісних продуктах харчування (рис. 1.1). Виробничий цикл галузі охоплює широкий спектр процесів – від первинного оброблення (забою) сільськогосподарських тварин до випуску різноманітних видів ковбасних виробів, м’ясних напівфабрикатів і консервів [1]. Проте, інтенсифікація виробництва та нарощування потужностей м’ясокомбінатів неминуче призводять до утворення колосальних об’ємів побічних продуктів тваринного походження (ППТП), які потребують негайного та екологічно безпечного поводження [2].

Згідно з фундаментальними основами технології м’ясопродуктів, структура утворення відходів безпосередньо залежить від виду перероблюваної сировини (велика рогата худоба, свині, птиця) та глибини її переробки [1, 4]. Процес первинного оброблення худоби супроводжується значним виходом нехарчових та технічних фабрикатів, серед яких найбільшу питому вагу мають:

- ✓ нехарчова кров;
- ✓ кісткова сировина та кератинові відходи (рогово-копитний шрот, щетина);
- ✓ м’які відходи зачистки (шквара, технічний жир-сирець);
- ✓ вміст шлунково-кишкового тракту (канига).

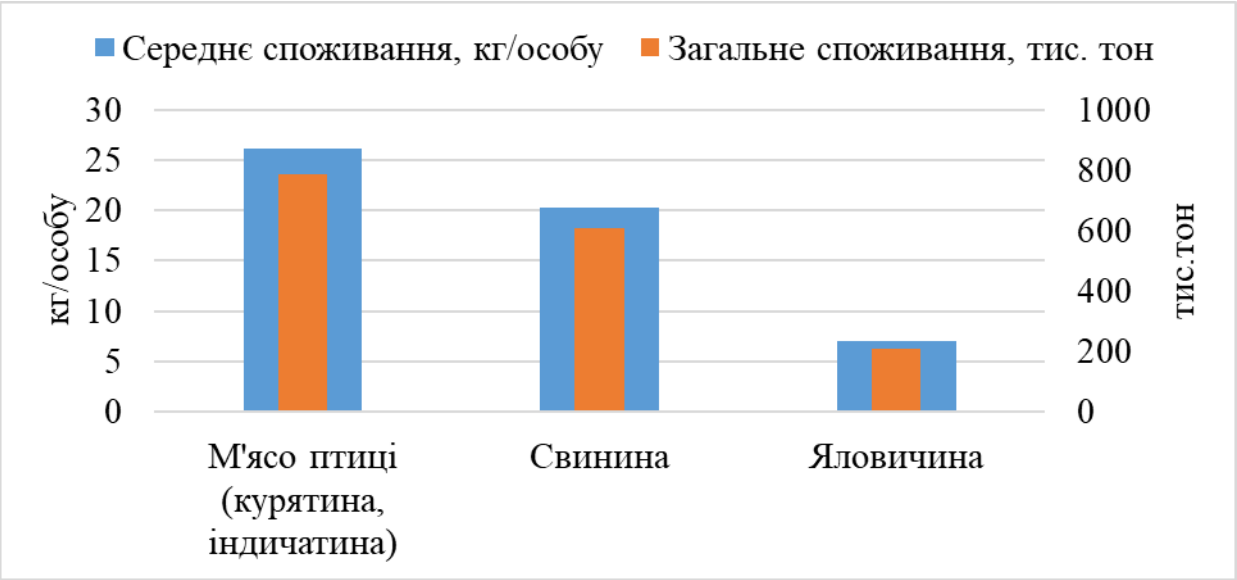


Рисунок 1.1. Структура споживання м’яса в Україні

Накопичення зазначених субстратів на територіях підприємств або їх несанкціоноване захоронення створює катастрофічне екологічне навантаження на навколишнє природне середовище. Органічна речовина відходів є ідеальним живильним середовищем для розвитку патогенної мікрофлори, що зумовлює високу епідеміологічну та ветеринарно-санітарну небезпеку [3, 8]. Крім того, процеси природного розкладу білкових та жирових компонентів супроводжуються виділенням в атмосферне повітря токсичних та інтенсивно пахучих газів (аміаку, сірководню, летучих жирових кислот, меркаптанів), викликаючи деградацію локальних екосистем [6, 7].

Аналіз ринку та узагальнені баланси утворення вторинної сировини на м’ясокомбінатах свідчать, що середня питома вага ПППТП може досягати від

30% до 50% від живої маси тварини. Нижче наведено усереднені нормативні дані щодо матеріального балансу забійного цеху (табл. 1.1).

Таблиця 1.1 – Матеріальний баланс утворення вторинних сировинних ресурсів при забої худоби

| Категорія вторинної сировини | Середній вихід, % до живої маси | Основні фізико-хімічні компоненти | Клас небезпеки згідно з Директивами ЄС |
|---|---|---|---|
| Харчова та технічна кров | 3,5 – 4,5 | Гемоглобін, альбумін, вода, залізо | Категорія 3 (Низький ризик) |
| Кістки, сухожилля, хрящі | 15,0 – 20,0 | Колаген, фосфат кальцію, ліпіди | Категорія 3 (Низький ризик) |
| Жир-сирець (технічний) | 2,0 – 4,0 | Тригліцериди, вільні жирні кислоти | Категорія 3 (Низький ризик) |
| Вміст шлунка (канига) | 5,0 – 8,0 | Неперетравлена клітковина, вода, ферменти | Категорія 2 (Середній ризик) |
| Конфіскати, падеж, брак | 1,0 – 2,0 | Комплексний патогенний біоматеріал | Категорія 1 (Високий ризик) |

Особливе місце в структурі екологічних проблем посідають стічні води м’ясокомбінатів. Вони характеризуються екстремально високими показниками хімічного (ХСК) та біохімічного (БСК) споживання кисню,

високою концентрацією емульгованих жирів та завислих речовин [6]. Нераціональне скидання таких стоків у муніципальні мережі без попередньої локальної фізико-хімічної та біологічної очистки призводить до критичного блокування каналізаційних колекторів і зупинки активного мулу на очисних спорудах міста.

## 1.2. Сучасні управлінські підходи до розробки систем глибокої переробки (утилізації) побічних продуктів м'ясопереробних підприємств

В умовах жорсткого природоохоронного законодавства та глобального переходу світової спільноти до засад циркулярної економіки, традиційні лінійні моделі поводження з відходами за принципом «утворення – захоронення» визнані повністю неефективними [2, 5]. Сучасний екологічний менеджмент м'ясопереробних підприємств базується на концепції *Agro-Industrial Ecology* (агропромислової екології) та принципах замкненого матеріального циклу [5].

Управлінські підходи до проектування систем утилізації базуються на ієрархії поводження з відходами:

1. Мінімізація утворення шляхом оптимізації технологічних потоків забою;
2. Максимальне фракціонування та сортування відходів безпосередньо у місці їх виникнення;
3. Глибока технологічна біоконверсія та рециклінг вторинних ресурсів;
4. Енергетична утилізація низькоцінних субстратів.

Ефективним управлінським рішенням останніх років є створення інтегрованих м'ясних кластерів, де технологічні лінії утилізації відходів інтегровані в єдиний комплекс із основним виробництвом [5]. Це дозволяє

звести до мінімуму логістичні витрати на транспортування біоматеріалу, що швидко псується, та забезпечує замкнене використання теплової й електричної енергії, отриманої в процесі рециклінгу.

Важливою складовою екоменеджменту є інтеграція систем екологічного управління відповідно до стандартів серії ISO 14001 спільно із системами безпечності харчових продуктів HACCP (ISO 22000), які є обов'язковими для операторів ринку в Україні [1]. Контроль за утворенням та рухом ППТП здійснюється через ідентифікацію критичних точок екологічного ризику на кожному етапі – від боксу передзабійного утримання до цеху пакування ковбасних виробів.

Наукові розробки в галузі біотехнології пропонують інноваційні підходи до керування утилізацією складних органічних фракцій. Наприклад, для переробки жировмісних стоків та м'яких відходів м'ясокомбінатів ефективно впроваджується метод спрямованого біологічного окиснення за допомогою ліполітичних культур дріжджів Yarrowia lipolytica [2]. Це дозволяє одночасно вирішити два управлінських завдання: знизити екологічну плату за забруднення стоків та отримати білково-вітамінну кормову добавку (біомасу), що має високу ринкову вартість.

## 1.3. Перспективні напрями та шляхи використання вторинних сировинних ресурсів м'ясопереробних підприємств

Сучасна світова практика та результати комплексних науково-дослідних робіт виділяють кілька ключових високотехнологічних напрямів переробки ППТП, які дозволяють трансформувати екологічні витрати підприємства у додаткові джерела прибутку [3].

1) *Комплексна переробка та фракціонування крові.* Кров сільськогосподарських тварин є найціннішим джерелом повноцінного тваринного білка. Перспективні технології передбачають стабілізацію крові на забійній лінії та її подальше ультрафракціонування на плазму і формені елементи (еритроцитарну масу) за допомогою сепараторів та ультрафільтраційних установок [1, 4]. Плазма крові завдяки високим емульгуючим та гелеутворюючим властивостям масово використовується у рецептурах варених ковбас, сосисок та м'ясних хлібів як функціональний замінник м'ясної сировини [1]. Формені елементи підлягають деколорації (знебарвленню) або використовуються для виробництва чорного альбуміну, медичних препаратів та гемостимуляторів. Технічна кров направляється на вакуум-випарні установки для отримання кров'яного борошна – високопротеїнового компоненту комбікормів [7].
2) *Екстракція колагену та желатину з кісткової сировини.* Кістки та сполучна тканина містять велику кількість фібрилярного білка – колагену. Традиційні методи утилізації кістки шляхом спалювання є енергозатратними та екологічно брудними. Перспективним трендом є застосування методів керованого ферментативного гідролізу, термомеханічної обробки або технології парового вибуху [3]. Це дозволяє руйнувати мінерально-білковий комплекс кістки та екстрагувати високоякісні колагенові пептиди, желатин та кістковий жир, які мають колосальний попит у фармацевтичній, парфумерній та харчовій галузях промисловості.
3) *Анаеробне зброджування та генерація біогазу.* Для низькоцінних органічних субстратів (канига, вміст передшлунків, надлишковий активний мул флотореагентів очисних споруд) найбільш економічно та екологічно виправданим є метод анаеробного метанового зброджування [10]. На базі м'ясокомбінатів влаштовуються біогазові комплекси, де під дією консорціуму анаеробних мікроорганізмів відбувається конверсія

біомаси. Процес протікає в кілька етапів (гідроліз, ацитогенез, метаногенез) і дозволяє отримати: 1) біогаз (вміст метану 60-65%), який спалюється у когенераційних модулях для виробництва власної теплової та електричної енергії; 2) біошлам (ефлюент) – високоякісне, екологічно чисте органічне добриво.

4) *Інноваційна біоконверсія за допомогою комах (личинок).* Новітнім високоефективним етапом розвитку циркулярної економіки є використання технологій ентомологічної переробки органічних відходів м'ясокомбінатів за допомогою личинок мухи Чорна левинка (Hermetia illucens) [2]. Личинки мають унікальну здатність за короткий життєвий цикл утилізувати складні тваринні субстрати, збільшуючи власну біомасу в тисячі разів. Отримана біомаса комах після висушування є джерелом гіпоалергенного високопротеїнового борошна та технічного ліпідного концентрату, що активно заміщує рибне борошно в аквакультурі та птахівництві.

# РОЗДІЛ 2. МЕТОДИКА ТА ХАРАКТЕРИСТИКА ОБ'ЄКТУ ДОСЛІДЖЕНЬ

## 2.1. Загальні відомості про об'єкт дослідження

Базовим об'єктом для проведення досліджень, збору первинних балансових даних та впровадження розроблених еколого-технологічних рішень обрано одне з провідних м'ясопереробних підприємств регіону – Товариство з обмеженою відповідальністю М'ясокомбінат «Ювілейний».

Виробничі потужності підприємства територіально розташовані за адресою: вул. Мічуріна, 5, смт Слобожанське, Дніпровський район, Дніпропетровська область, 52005. Майданчик підприємства розміщений у промислово-комунальній зоні з дотриманням нормативних санітарно-захисних зон (СЗЗ) до найближчої житлової забудови, що забезпечує мінімізацію безпосереднього антропогенного впливу на населення та довкілля.

ТОВ М'ясокомбінат «Ювілейний» є підприємством із закінченим технологічним циклом виробництва. Структура комбінату охоплює всі стадії переробки тваринної сировини, починаючи від приймання живої худоби і закінчуючи відвантаженням готової продукції. До складу основних виробничих підрозділів підприємства входять (рис. 1.1):

1. База передзабійного утримання худоби: призначена для приймання, ветеринарного огляду та технологічного відпочинку тварин перед забоєм.

2. Забійно-обробний цех (цех первинної переробки): здійснює безпосередній забій великої рогатої худоби (ВРХ) та свиней, знекровлення, зняття шкур (або шпарення), нутрування (вилучення внутрішніх органів), зачистку та розпилювання туш.

3. Субпродуктовий та кишковий цехи: виконують обробку, очищення та сортування супутньої сировини.

4. Жировий цех: спеціалізується на витоплюванні харчових та технічних жирів.

5. Холодильне господарство: включає камери швидкого охолодження, заморожування та зберігання м’яса.

6. Ковбасний цех та цех м’ясних напівфабрикатів: здійснюють обвалювання, жилування м’яса, приготування фаршів, термічну обробку та пакування готової продукції.

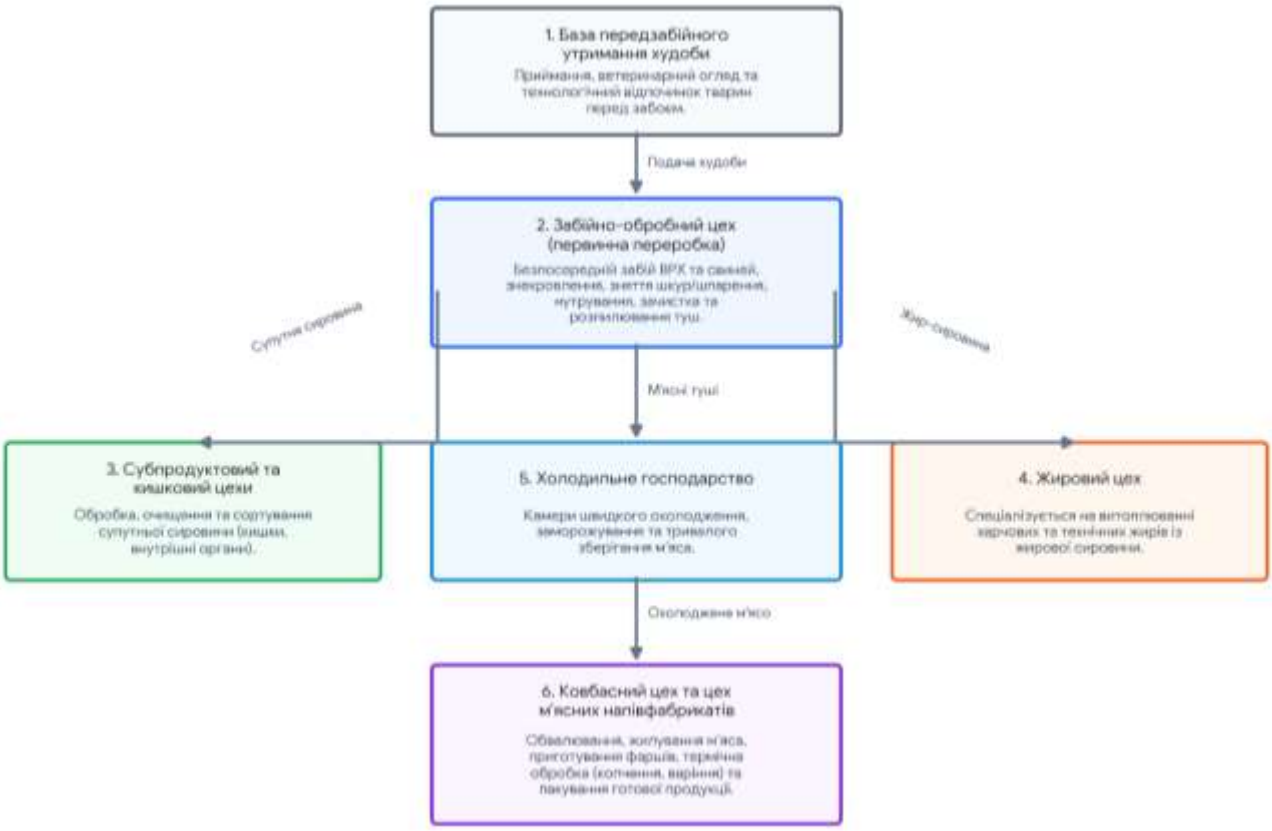


Рисунок 2.1. Структура основних виробничих підрозділів м’ясопереробного підприємства

Для цілей даного дипломного проекту за базовий показник прийнято проектну потужність підприємства в обсязі 60 тон м’яса на кістці на добу (рис. 2.2). Такий обсяг виробництва відносить підприємство до категорії великих промислових об’єктів. Функціонування м’ясокомбінату супроводжується генерацією значних обсягів специфічних

багатокомпонентних органічних відходів, які за класифікацією чинного законодавства належать до 2 та 3 категорій побічних продуктів тваринного походження.

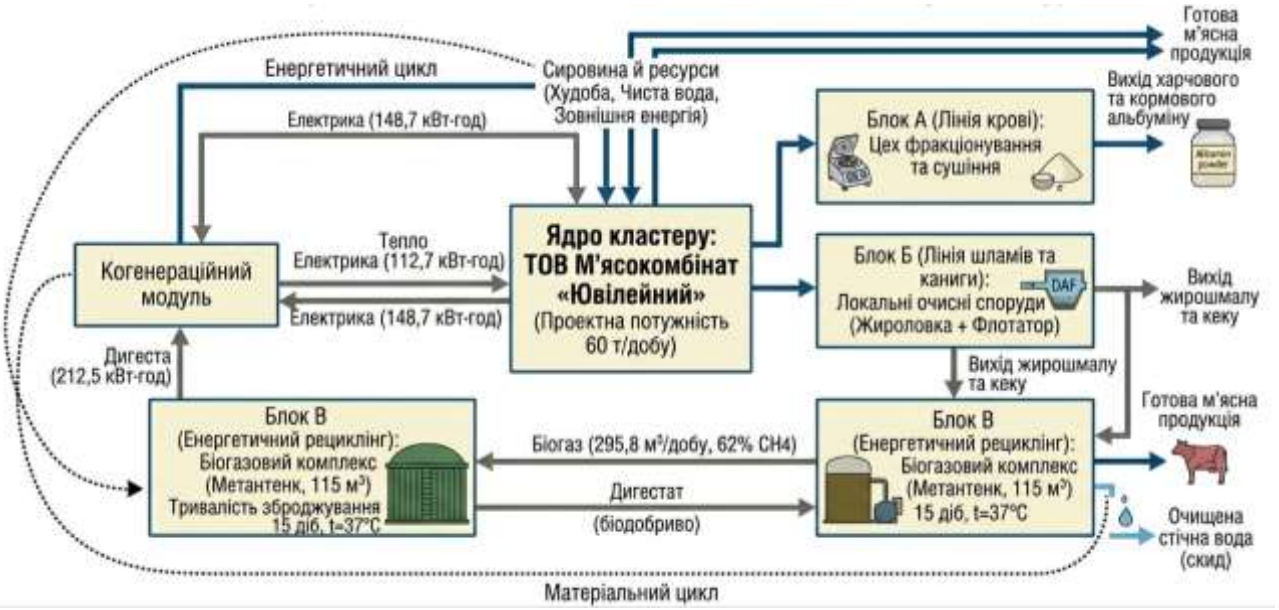


Рисунок 2.2. Кластерна модель роботи ТОВ М'ясокомбінат «Ювілейний» при запроектованій потужності переробки 60 т/добу

Основними екологічно небезпечними субстратами об'єкта дослідження є тваринна кров, вміст шлунково-кишкового тракту (канига) та концентровані жирові відходи (жировий шлам з локальних споруд). Для обґрунтування технологій їх рециклінгу в межах кваліфікаційної роботи було систематизовано ключові фізико-хімічні та санітарно-екологічні характеристики зазначених відходів:

- *Тваринна кров (ВСР 3 категорії)* є висококонцентрованим органічним субстратом. За біохімічним складом вона містить до 16-19% білкових речовин (альбуміни, глобуліни, гемоглобін). Показник хімічного споживання кисню (ХСК) становить від 150000 до 200000 мг $O_2$/дм$^3$, а біохімічне споживання кисню (БСК$_5$) коливається в межах 100000-140000 мг $O_2$/дм$^3$. Вологість складає 80-82%, густина – 1050-1060 кг/м$^3$.

Потрапляння крові у загальний стік призводить до миттєвого зростання концентрації забруднень.

- *Вміст шлунково-кишкового тракту / канига (Відходи 2 категорії)* являє собою напівперетравлену рослинну масу з високим вмістом грубої клітковини, лігніну та супутньою мікрофлорою шлунка худоби. Вихідна вологість каниги становить 85-90%, вміст сухої речовини – 10-15% (з яких понад 85% припадає на органічну фракцію). Водневий показник (*pH*) дорівнює 6,2-6,8. Завдяки оптимальному співвідношенню вуглецю до азоту (*C:N* = 20-25), цей відхід є ефективною ко-субстратною сировиною для анаеробного зброджування в біогазових установках.
- *Жирові відходи та жировий шлам* утворюються на стадіях обробки туш, промивання кишок та миття обладнання. Жировий шлам, що затримується жировловлювачами, є складною емульсією типу «жир-вода-домішки». Концентрація жирів у вихідних стоках забійного цеху становить 800-2500 мг/дм$^3$. Вміст тригліцеридів у шламі досягає 60-70% на суху речовину. Органічний субстрат має високу здатність до окиснення та утворення щільних гідрофобних плаваючих кірок, що блокують процеси аерації.

Зведені усереднені характеристики екологічного навантаження основних потоків відходів ТОВ М’ясокомбінат «Ювілейний» наведено в таблиці 2.1.

Детальний аналіз екологічних характеристик сировинних потоків відходів доводить, що їх скидання у навколишнє сереовище або вивезення на сміттєзвалища є недопустимим. Це зумовлює необхідність розробки комплексної інженерної системи, яка б інтегрувала процеси локального збирання крові, механічного зневоднення каниги, фізико-хімічної флотації жирів та їх подальшої біотехнологічної утилізації з отриманням енергоносіїв (рис. 2.3).

Таблиця 2.1 – Фізико-хімічний та екологічний профіль відходів об’єкта дослідження

| Параметр / Показник | Тваринна кров | Вміст шлунка (канига) | Жировий шлам (з жировловлювачів) |
|---|---|---|---|
| Вологість, % | 80,5 | 88,0 | 65,0 |
| Сухий залишок, % | 19,5 | 12,0 | 35,0 |
| Зольність (мінеральна частина), % | 1,2 | 1,8 | 4,5 |
| Показник ХСК, мг $O_2$/дм$^3$ | 180000 | 85000 | 210000 |
| Показник БСК$_5$, мг $O_2$/дм$^3$ | 120000 | 50000 | 140000 |
| Активна реакція середовища, pH | 7,3-7,5 | 6,2-6,8 | 5,5-6,0 |

Рисунок 2.3. Загальна технологічна схема роботи м’ясокомбінату

## 2.2. Загальні методичні підходи до визначення характеристик вторинних сировинних ресурсів м’ясопереробних підприємств

Для обґрунтування та розрахунку параметрів еколого-технологічних комплексів утилізації та рециклінгу вторинних сировинних ресурсів (ВСР) і побічних продуктів тваринного походження ТОВ М’ясокомбінат «Ювілейний» критично важливим є застосування стандартизованих та точних методичних підходів. Оскільки відходи підприємства (тваринна кров, канига, жировий шлам) мають високу концентрацію багатокомпонентних органічних сполук, оцінка їхніх екологічних та біоенергетичних характеристик потребує поєднання методів хімічного аналізу стічних вод і стандартних методик дослідження твердих та напіврідких субстратів (рис. 2.4).

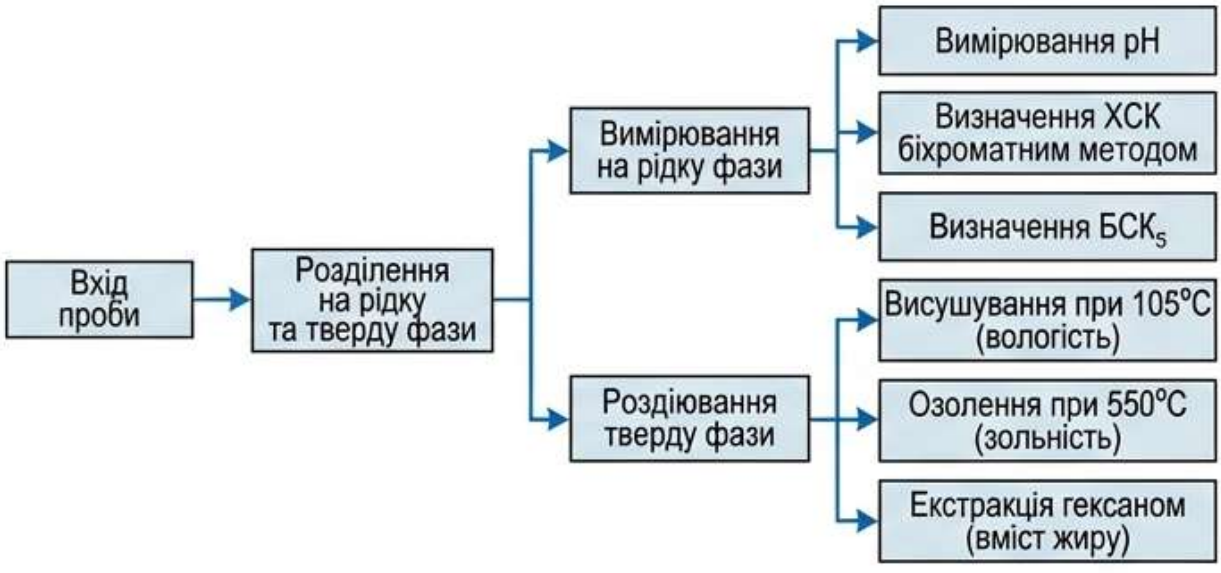


Рисунок 2.4. Блок-схема алгоритму аналітичного та фізико-хімічного аналізу проб на підприємстві

Основними завданнями методичного етапу досліджень є визначення фракційного складу відходів, вмісту сухої речовини, зольності, активної реакції середовища, а також кінетичних показників біохімічного (БСК) та хімічного (ХСК) споживання кисню.

1. Методика відбору та підготовки проб до аналізу:

- тваринна кров відбирається у забійному цеху безпосередньо з лінії знекровлення під час забою худоби. Для запобігання передчасному зсіданню (коагуляції) білків проби стабілізували шляхом додавання 10%-го розчину цитрату натрію у співвідношенні 1:9 до об'єму крові.
- вміст шлунково-кишкового тракту (канига) відбирається на ділянці нутрування цеху первинної переробки. Оскільки субстрат є гетерогенним, первинний відбір виконували з кількох точок технологічної ємності, після чого формували об'єднану пробу масою 2-3 кг, яку ретельно гомогенізували в лабораторних умовах за допомогою механічного подрібнювача.
- жировий шлам відбирається безпосередньо з лотків локальних жировловлювачів забійного та кишкового цехів. Проби очищали від випадкових великих механічних домішок і перемішували для отримання стійкої ємульсії перед аналізом.

2. Визначення загальних фізико-хімічних параметрів субстратів (енергетичний потенціал відходів та їхня поведінка в очисних спорудах або біогазових реакторах залежать від балансу вологи та сухої органічної речовини):

- визначення вмісту сухої речовини (вологості) проводиться гравіметричним (ваговим) методом згідно з ДСТУ ISO 6496:2005. Наважку досліджуваного субстрату (кров, канига або шлам) масою 5-10 г зважують на аналітичних вагах з точністю до 0,0001 г у заздалегідь висушених до постійної маси бюксах. Сушіння здійснюють у сушильній шафі при температурі 105±2°C до припинення зміни маси. Масову частку вологи (W, %) розраховують за формулою:

$$W = ((m_1 - m_2) / (m_1 - m_0)) \cdot 100, \quad (2.1)$$

де $m_0$ – маса порожнього бюксу, г; $m_1$ – маса бюксу з наважкою до сушіння, г; $m_2$ – маса бюксу з наважкою після сушіння до постійної маси, г. Вміст сухої речовини визначали як (100 – W), %.

- визначення зольності та вмісту органічної речовини здійснюється методом сухого отиснення (озолення) у муфельній печі за температури 550±15°C відповідно до ДСТУ 7621:2014. Висушений залишок субстрату піддається спалюванню до утворення світло-сірого попелу (фіксація мінеральної частини). Вміст беззольної органічної речовини (сухої органічної речовини – СОР), який є ключовим для розрахунку виходу біогазу, обчислюється за різницею між масою сухого залишку та отриманої золи.
- визначення активної реакції середовища (*pH*) виконується потенціометричним методом за допомогою лабораторного *pH*-метра з комбінованим скляним електродом згідно з ДСТУ ISO 10523:2014. Для твердих та в’язких субстратів (канига, шлам) попередньо готується водна витяжка шляхом збовтування наважки субстрату з дистильованою водою у співвідношенні 1:10 протягом 30 хвилин з подальшим фільтруванням.

3. Методи визначення показників екологічного навантаження (ХСК та БСК). Для оцінки ступеня забрудненості рідких фаз відходів та концентрованих стоків, що надходять на проектовані флотаційні та біологічні очисні споруди, використовували базові критерії санітарної хімії:

- хімічне споживання кисню (ХСК) визначається біхроматним методом (у модифікації зі зворотним титруванням) відповідно до ДСТУ ISO 6060:2003. Метод базується на повному окисненні органічних речовин проби біхроматом калію ($K_2Cr_2O_2$) у сильному кислому середовищі

($H_2SO_4$) за наявності каталізатора (сульфату срібла $Ag_2SO_4$) та при кип'ятінні із зворотним холодильником протягом 2 годин. Надлишок біхромату калію, що не вступив у реакцію окиснення, титрували розчином солі Мора ($(NH_4)_2Fe(SO_4)_2 \cdot 6H_2O$) у присутності індикатора фероїну.

- біохімічне споживання кисню (БСК$_5$) розчиненого у воді, що витрачається за 5 діб на аеробне біохімічне окиснення органічних речовин мікроорганізмами, здійснюється амперометричним або йодометричним методом (метод Вінклера) згідно з ДСТУ ISO 5815-1:2009. Через надвисоку концентрацію забруднень у пробах крові та жирового шламу, первинний субстрат піддавали багатократному (у 10000–100000 разів) розведенню спеціально підготовленою дистильованою аерованою водою, збагаченою поживними солями та заселеною адаптованою мікрофлорою (еко-штаммами). Співвідношення ХСК до БСК$_5$ використовували як критерій ефективності застосування біологічних методів очищення.

4. Розрахунково-аналітичні методи екологічного моделювання. Поряд із прямими інструментальними вимірюваниями, у роботі застосовано методи матеріального та потокового балансів. На основі проектної потужності м'ясокомбінату (60 т/добу) та питомих нормативів утворення побічних продуктів (віднесених до однієї тони готової сировини або одиниці забитої худоби) розраховано добові та річні обсяги генерації ВСР.

Розрахунок потенційного виходу біогазу ($V_{біогазу}$, м$^3$) з каниги та суміші субстратів базувався на кінетичних моделях анаеробного розпаду вуглеводів, жирів та білків за формулою:

$$V_{біогазу} = M_{СОР} \cdot Y_{питомий}, \quad (2.2)$$

де $M_{СОР}$ – маса сухої органічної речовини, що подається в біореактор, кг; $Y_{питомий}$ – теоретичний вихід біогазу на одиницю маси розкладеної органіки

(для клітковини каниги прийнято 0,45–0,50 м$^3$/кг СОР, для жирового шламу – 0,85–0,95 м$^3$/кг СОР).

Таким чином, сформований комплекс інструментальних, хімічних та розрахункових методик забезпечує високу достовірність вихідних даних для виконання подальших технологічних та еколого-економічних розрахунків кваліфікаційної роботи.

## 2.3. Методика технологічних розрахунків утилізації та повторного використання відходів

Ефективне проектування еколого-технологічного комплексу утилізації та рециклінгу вторинних сировинних ресурсів (ВСР) на ТОВ М’ясокомбінат «Ювілейний» базується на системі взаємопов’язаних розрахунково-аналітичних методів. Головною метою цього етапу є створення технологічно та інженерно обґрунтованого підґрунтя для визначення кількісних і якісних характеристик матеріальних потоків відходів, розрахунку параметрів очисних споруд (уловлювачів жиру, флотаторів), а також біоенергетичного потенціалу субстратів анаеробного зброджування.

Вихідними даними для методичного апарату є планована добова продуктивність підприємства за сировиною ($M_м$ = 60000 кг/добу) та диференційована структура забою худоби.

Розрахунок годинних та добових витрат стічних вод і маси забруднень. Добова витрата стічних вод $Q_{доб}$ (м³/добу) розраховується за формулою:

$$Q_{доб} = (M_м \cdot q_{пит}) / 1000, \quad (2.3)$$

де $M_м$ – проектна потужність переробки м’яса (60000 кг/добу); $q_{пит}$ – питоме водовідведення на 1 т готової продукції (прийнято 12 м$^3$/т).

Максимальна годинна витрата $Q^{год}_{max}$ (м$^3$/год) визначається з урахуванням коефіцієнта годинної нерівномірності притоку стоків $K_{нер}$:

$$Q^{год}_{max} = (Q_{доб} / T_{роб}) \cdot K_{нер}, \quad (2.4)$$

де $T_{роб}$ – тривалість роботи підприємства на добу (16 год); $K_{нер}$ – коефіцієнт нерівномірності (для м’ясокомбінатів становить 1,35-1,50).

Добова маса конкретного забруднюючого компонента $W_i$ (кг/добу) визначається як:

$$W_i = (Q_{доб} \cdot C_i) / 1000, \quad (2.5)$$

де $C_i$ – вихідна концентрація і-го компонента (ЗР, ХСК, жири), мг/дм$^3$.

Математична модель та формули розрахунку системи очисних споруд. Очищення стічних вод м’ясопереробки складається з трьох послідовних технологічних етапів: механічного (механічні решітки, пісковловлювачі), фізико-хімічного (напірна реагентна флотація) та біологічного (аеротенки-змішувачі з нітрі-денітрифікацією).

*І) Розрахунок жироловки (гравітаційне розділення).* Площа дзеркала води жироловки $F_ж$ (м$^2$) розраховується виходячи зі швидкості спливання жирових глобул:

$$F_ж = Q^{год}_{max} / (3600 \cdot v_{сп}), \quad (2.6)$$

де $v_{сп}$ – швидкість спливання жирових частинок мінімального розрахункового діаметра (0,2 мм), яка становить $v_{сп} \approx 0{,}001$ м/с.

Тривалість відстоювання в жироловці $t_{ж}$ (с) повинна задовольняти умову:

$$t_{ж} = H_{ж} / v_{сп} \geq 5400 \text{ с (1,5 год)}, \quad (2.7)$$

де $H_{ж}$ – робоча глибина протокової частини жироловки (м).

*II) Розрахунок процесу реагентної флотації.* Ефективність вилучення емульгованих жирів та колоїдних білків залежить від дози коагулянту (наприклад, алюмінію сульфату $Al_2(SO_4)_3$ або заліза хлориду $FeCl_3$) та флокулянту (поліакриламіду ПАА).

Розрахункова доза коагулянту $D_к$ (мг/дм$^3$) пов’язана з початковою концентрацією жиру $C_{жир}$ формулою:

$$D_к = a \cdot \sqrt{C_{жир}}, \quad (2.8)$$

де $a$ – емпіричний коефіцієнт відповідності для стоків м’ясокомбінатів ($a$ = 1,2–1,5).

Об’єм рециркуляційного шламу або необхідна кількість повітря, що розчиняється в напірному резервуарі (сатураторі), $V_{пов}$ (м$^3$/м$^3$ стоків) розраховується як:

$$V_{пов} = [1{,}3 \cdot C_{нас} \cdot (P_{сат} / P_{атм} - 1) \cdot f] / 1000, \quad (2.9)$$

де $C_{нас}$ – розчинність повітря у воді при заданій температурі, мг/дм$^3$; $P_{сат}$ – абсолютний тиск у сатураторі (0,4-0,6 МПа); $P_{атм}$ – атмосферний тиск (0,1 МПа); $f$ – коефіцієнт ефективності розчинення повітря в сатураторі ($f$ = 0,7-0,8).

*III) Розрахунок споруд біологічного очищення (аеротенків).* Об'єм аеротенка $V_{аер}$ (м$^3$) розраховується за швидкістю утилізації органічного субстрату активним мулом:

$$V_{аер} = [Q_{доб} \cdot (L_{вх} - L_{вих})] / (q_{мул} \cdot X \cdot n), \quad (2.10)$$

де $L_{вх}$ та $L_{вих}$ – відповідно БСК$_5$ вихідної (після флотатора) та очищеної стічної води, мг $O_2$/дм$^3$; $X$ – середня концентрація активного мулу за сухою речовиною в аеротенку (робоча доза мулу, прийнято X = 3,5-4,5 г/дм$^3$); $q_{мул}$ – питома швидкість окиснення забруднень мулом (мг БСК$_5$ на 1 г беззольної речовини мулу за 1 годину); $n$ – коефіцієнт утримання беззольної частини активного мулу ($n$ = 0,8).

Необхідна кількість кисню $O_{заг}$ (кг $O_2$/добу) для забезпечення процесів дихання мулу та нітрифікації розраховується за рівнянням:

$$O_{заг} = a \cdot Q_{доб} \cdot (L_{вх} - L_{вих}) + b \cdot X_{безз} \cdot V_{аер} + 4{,}57 \cdot Q_{доб} \cdot (N_{вх} - N_{вих}), \quad (2.11)$$

де $a$ – питома витрата кисню на окиснення органіки ($a$ = 0,42 кг $O_2$/кг БСК); $b$ – питома витрата кисню на ендогенне дихання мулу (b = 0,07 кг $O_2$/кг мулу за добу); 4,57 – стехіометричний коефіцієнт окиснення амонійного азоту до нітратів; $N_{вх}$, $N_{вих}$ – концентрація азоту на вході та виході з аеротенку відповідно, мг/дм$^3$.

Обґрунтування технології утилізації крові та інших побічних продуктів. Технологічна схема переробки збираної крові передбачає два напрями:

виробництво харчового світлого альбуміну та плазми методом сепарування (фракціонування) або виробництво сухих тваринних кормів (кров'яного борошна) методом коагуляції та сушіння.

Масовий баланс процесу сепарування стабілізованої крові підпорядковується рівнянню:

$$M_{кров} \cdot (1 - K_{відх}) = M_{плазма} + M_{формелем}, \quad (2.12)$$

де $K_{відх}$ – коефіцієнт технологічних відходів (втрат) = 0,02, він відображає частку крові, яка втрачається в процесі (наприклад, залишається на стінках обладнання, трубах або втрачається під час промивання); $M_{плазма}$ – маса отриманої плазми крові після сепарування (кг); $M_{формелем}$ – маса отриманих формених елементів (переважно еритроцитарна маса) (кг).

Співвідношення фракцій при сепаруванні становить в середньому: плазма крові – 58-62%; формені елементи (еритроцитарна маса) – 38-42%.

Кількість сухого залишку (альбуміну або сухого концентрату) $M_{сух}$ (кг) розраховується з урахуванням початкової вологості крові $W_{поч}$ (~80%) та кінцевої вологості готового продукту $W_{кін}$ (~8%):

$$M_{сух} = M_{кров} \cdot [(100 - W_{поч}) / (100 - W_{кін})], \quad (2.13)$$

Розрахунок параметрів біогазової установки в системі рециклінгу. Для утилізації висококонцентрованих твердих і рідких органічних відходів (каниги, жирових шламів, надлишкового активного мулу очисних споруд) передбачається анаеробне зброджування в метантенках у мезофільному (37±1°С) або термофільному (55±1°С) режимах.

*І) Визначення маси сухої речовини субстрату.* Загальна добова маса завантаження в метантенк за сухою речовиною $M_{св}$ (кг/добу) обчислюється як

сума мас усіх компонентів субстрату з урахуванням їхньої індивідуальної вологості:

$$M_{св} = \sum [\, M^{суб}_i \cdot (1 - W_i / 100) \,], \tag{2.14}$$

Маса органічної сухої речовини (ОСВ), яка безпосередньо піддається конверсії метаногенними мікроорганізмами:

$$M_{осв} = M_{св} \cdot (1 - A), \tag{2.15}$$

де $A$ – зольність субстрату у частках одиниці (для органічних відходів м'ясокомбінатів $A$ = 0,05-0,12).

*II) Розрахунок виходу біогазу.* Добовий об'єм утворюваного біогазу $V_{біогазу}$ (м$^3$/добу) розраховується на основі питомого виходу газу з одиниці маси розпадного ОСВ:

$$V_{біогазу} = M_{осв} \cdot g_{розп} \cdot v_{пит}, \tag{2.16}$$

де $g_{розп}$ – ступінь розпаду органічної речовини в метантенку (у частках одиниці, для мезофільного режиму $g_{розп}$ = 0,45-0,55, для термофільного – 0,60-0,70); $v_{пит}$ – питомий теоретичний вихід біогазу з 1 кг розпадної ОСВ субстрату (м$^3$/кг ОСВ). Для жирів $v_{пит} \approx$ 1,0-1,1 м$^3$/кг, для білків – 0,7-0,8 м$^3$/кг, для каниги – 0,4-0,5 м$^3$/кг.

*III) Визначення корисного об'єму метантенка.* Робочий об'єм метантенка Vмет (м³) визначається за добовим об'ємом рідкого субстрату $V_{суб}$ та нормативною тривалістю зброджування $t_{збр}$ (діб):

$$V_{мет} = V_{суб} \cdot t_{збр}, \tag{2.17}$$

Для мезофільного процесу тривалість становить $t_{збр}$ = 15-20 діб, для термофільного – $t_{збр}$ = 10-12 діб.

Також об'єм метантенка перевіряється за критичним показником добового навантаження на корисний об'єм споруди за органічною речовиною $q_{осв}$ (кг ОСВ/(м$^3$·добу)):

$$V_{мет} = M_{осв} / q_{осв}, \quad (2.18)$$

де навантаження $q_{осв}$ не повинно перевищувати 3,5-4,0 кг ОСВ/(м$^3$·добу).

## 2.4. Методичні основи еколого-економічної оцінки

Для визначення економічної доцільності впровадження запроектованого комплексу рециклінгу відходів використовується інтегральний еколого-економічний підхід.

Запобіжний екологічний збиток ($\Delta З_{екол}$, грн/рік) розраховується як різниця між плата за скидання забруднень у водні об'єкти або на міські очисні споруди (із урахуванням штрафних коефіцієнтів за перевищення ГДК) до і після модернізації:

$$\Delta З_{екол} = \sum (M_{до} - M_{після}) \cdot N_{тариф} \cdot K_{екол}, \quad (2.19)$$

де $N_{тариф}$ – нормативний тариф за скидання 1 т забруднюючої речовини; $K_{екол}$ – коефіцієнт екологічної ситуації регіону; $M_{до}$ та $M_{після}$ – маса скиду до та після впровадження заходів відповідно.

Енергетичний ефект від використання біогазу ($Э_{енер}$, грн/рік) визначається кількістю природного газу, заміщеного когенераційною установкою, що працює на біогазі:

$$Э_{енер} = V_{біогазу} \cdot (Q^{н}_{біогазу} / Q^{н}_{прир}) \cdot Ц_{газу} \cdot \eta_{котла}\ , \qquad (2.20)$$

де $Q^{н}_{біогазу}$ та $Q^{н}_{прир}$ – нижча теплота згоряння біогазу (~22 МДж/м$^3$) та природного газу (~34 МДж/м$^3$); $Ц_{газу}$ – промисловий тариф на природний газ; $\eta_{котла}$ – ККД котельного обладнання.

# РОЗДІЛ 3. ТЕХНОЛОГІЧНІ РОЗРАХУНКИ ПРОЦЕСУ УТИЛІЗАЦІЇ ВІДХОДІВ М'ЯСОПЕРЕРОБНОГО ПІДПРИЄМСТВА

## 3.1. Технологічні розрахунки витрат і запасів основної продукції та відходів

Основою для інженерного проектування очисних споруд, підбору реагентного господарства та визначення місткості біогазових реакторів є кількісна оцінка матеріальних потоків. Розрахунок виконується для умов планової максимальної потужності ТОВ М'ясокомбінат «Ювілейний», що становить $M_м$ = 60000 кг/добу (60 т/добу) переробки сировини у живій масі з тривалістю зміни та роботи технологічного обладнання $T_{роб}$ = 16 год/добу (2 зміни) при кількості робочих днів на рік $N$ = 300.

Розрахунок обсягів водовідведення та масового навантаження забруднень. Згідно з галузевими нормами технологічного проектування, питоме водовідведення для підприємств м'ясопереробної промисловості повної забійно-виробничої структури становить $q_{пит}$ = 12 м$^3$ на 1 тону переробленої сировини. Добова витрата виробничих стічних вод $Q_{доб}$ (м$^3$/добу) при цьому становить:

$$Q_{доб} = (60000 \cdot 12) / 1000 = 720 \text{ м}^3\text{/добу}$$

Максимальна годинна витрата стічних вод $Q^{год}_{max}$ (м$^3$/год) розраховується з урахуванням коефіцієнта годинної нерівномірності притоку, який для забійних і переробних цехів приймається рівним $K_{нер}$ = 1,45:

$$Q^{год}_{max} = (720 / 16) \cdot 1{,}45 = 65{,}25\ м^3/год$$

Для розрахунку технологічних параметрів споруд локального очищення стічних вод (жироловок, флотаторів та аеротенків) визначимо добову масу забруднюючих речовин ($W_i$, кг/добу). Вихідні середні концентрації забруднень ($C_i$) прийняті на основі даних екологічного моніторингу підприємства:

→ зважені речовини (ЗР) – СЗР = 1800 мг/дм$^3$;

→ хімічне споживання кисню (ХСК) – СХСК = 3500 мг/дм$^3$;

→ біохімічне споживання кисню за 5 діб ($БСК_5$) – СБСК = 2200 мг/дм$^3$;

→ жири (емульговані та вільні) – $С_{жир}$ = 1100 мг/дм$^3$.

Добова маса зважених речовин:

$$W_{ЗР} = (720 \cdot 1800) / 1000 = 1296\ кг/добу$$

Добова маса забруднень за ХСК:

$$W_{ХСК} = (720 \cdot 3500) / 1000 = 2520\ кг/добу$$

Добова маса забруднень за $БСК_5$:

$$W_{БСК} = (720 \cdot 2200) / 1000 = 1584\ кг/добу$$

Добова маса екстрагованих жирів:

$$W_{жир} = (720 \cdot 1100) / 1000 = 792\ кг/добу$$

Баланс утворення побічних продуктів та вторинних сировинних ресурсів. Обсяги генерації нехарчових відходів тваринного походження,

каниги та крові розраховані на основі середніх статистичних норм виходу побічних продуктів (у відсотках до живої маси переробки $M_{сир}$ = 60 т/добу).

*1. Тваринна кров* – норма утворення технічної та харчової крові становить в середньому 3,8% від живої маси:

$$G_{кров} = (60 \cdot 3{,}8) / 100 = 2{,}28 \text{ т/добу}$$

Річний обсяг збору крові: $G_{кров}^{рік} = 2{,}28 \cdot 300 = 684$ т/рік.

*2. Канига (вміст шлунково-кишкового тракту худоби)*: норма утворення становить 2,8% від живої маси:

$$G_{канига} = (60 \cdot 2{,}8) / 100 = 1{,}68 \text{ т/добу}$$

Річний обсяг утворення каниги: $G_{канига}^{рік} = 1{,}68 \cdot 300 = 504$ т/рік.

*3. Жировий шлам (вилучений із локальних жироловок та флотатора)*. Виходячи з ефективності очищення жировловлювальних споруд, норма утворення обводненого жирового шламу становить близько 1,3% від обсягу переробки:

$$G_{шлам} = (60 \cdot 1{,}3) / 100 = 0{,}78 \text{ т/добу}$$

Річний обсяг утворення жирового шламу: $G_{шлам}^{рік} = 0{,}78 \cdot 300 = 234$ т/рік.

4. *Нехарчові субпродукти та кератинвмісна сировина (непридатні для харчових цілей)*: норма виходу складає близько 2,0% від живої маси:

$$G_{нехарч} = (60 \cdot 2{,}0) / 100 = 1{,}20 \text{ т/добу}$$

Річний обсяг: $G_{нехарч}^{рік} = 1{,}20 \cdot 300 = 360$ т/рік.

Зведені результати розрахунку витрат, запасів та матеріальних потоків основної продукції, стічних вод і відходів ТОВ М’ясокомбінат «Ювілейний» наведено у таблиці 3.1.

Таблиця 3.1 – Зведений баланс матеріальних потоків та відходів підприємства

| Найменування продукту / відходу | Одиниця виміру | Добовий показник ($G_{доб}$) | Річний показник ($G_{рік}$) | Технологічний напрямок поводження |
|---|---|---|---|---|
| Перероблювана сировина (жива маса) | т | 60 | 18000 | основне виробництво |
| Виробничі стічні водовідведення | м³ | 720 | 216000 | споруди механо-біологічного очищення |
| Забруднення за ХСК | кг | 2520 | 756000 | біологічна деструкція в аеротенках |
| Забруднення за $БСК_5$ | кг | 1584 | 475200 | аеробне окиснення |
| Емульговані жири в стоках | кг | 792 | 237600 | реагентна напірна флотація |
| *Вторинні сировинні ресурси (ВСР):* | | | | |
| 1. Тваринна кров | т | 2,28 | 684 | фракціонування / термокоагуляція |
| 2. Канига (вміст ШКТ) | т | 1,68 | 504 | анаеробна біоконверсія (метантенк) |
| 3. Жировий шлам флотації | т | 0,78 | 234 | ко-субстрат анаеробного зброджування |
| 4. Нехарчові субпродукти та відходи | т | 1,20 | 360 | направлення на цех утилізації |

Отримані кількісні характеристики витрат стічних вод та добові обсяги утворення ВСР є базовою основою для виконання подальших детальних інженерно-конструкторських розрахунків апаратів очищення і рециклінгу, що розглядаються у наступних підрозділах роботи.

## 3.2. Обґрунтування технології та розрахунок параметрів системи очищення стічних вод

Очищення висококонцентрованих стічних вод м’ясокомбінату «Ювілейний» вимагає послідовного видалення грубодисперсних домішок, вільних та емульгованих жирових речовин перед їх направленням на споруди повної біологічної деструкції. Основними апаратами цього етапу обрано локальну горизонтально-вертикальну жироловку та напірну реагентну флотаційну установку (сатураційного типу).

Інженерно-технологічний розрахунок жироловки. Жировка призначена для вловлювання вільних (неемульгованих) жирових глобул за рахунок різниці густин води та жиру за умов ламінарного гравітаційного розділення потоку.

Вихідними даними для розрахунку споруди є параметри, визначені у підрозділі 3.1:

→ максимальний годинний притік стічних вод: $Q_{год}^{max} = 65{,}25$ м³/год;

→ розрахункова мінімальна швидкість спливання жирових частинок діаметром $d \geq 0{,}2$ мм: $v_{сп} = 0{,}001$ м/с.

Необхідна сумарна площа дзеркала води жироловки $F_{ж}$ (м²) визначається за формулою:

$$F_{ж} = Q_{год}^{max} / (3600 \cdot v_{сп}) = 65{,}25 / (3600 \cdot 0{,}001) = 18{,}125 \ м^2$$

Приймаємо до встановлення двосекційну залізобетонну жироловку. Площа однієї робочої секції становитиме:

$$F_{секції} = 18{,}125 / 2 = 9{,}06 \ м^2$$

Ширину секції жироловки приймаємо $B$ = 2,0 м з міркувань монтажу механізованого скребкового механізму видалення жирового шару. Тоді довжина протокової частини однієї секції $L_{ж}$ (м) дорівнює:

$$L_{ж} = 9,06 / 2,0 = 4,53 \text{ м}$$

Приймаємо конструктивну довжину протокової частини $L_{ж}$ = 4,6 м.

Робочу глибину протокової зони жироловки приймаємо з умов забезпечення стійкого гідравлічного режиму на рівні $H_{ж}$ = 1,5 м (загальна будівельна глибина з урахуванням осадової частини та борту – 2,1 м). Фактична тривалість відстоювання стічної води у жироловці $t_{ж}$ (с) становить:

$$t_{ж} = H_{ж} / v_{сп} = 1,5 / 0,001 = 1500 \text{ с (25 хв)}$$

Даний показник відповідає нормативним вимогам для проміжних локальних уловлювачів жиру перед сатураційною флотацією. Загальний робочий об’єм жироловки (двох секцій) складає:

$$V_{ж} = F_{ж} \cdot H_{ж} = 18,125 \cdot 1,5 = 27,19 \text{ м}^3$$

Ефективність вилучення вільних жирів у розрахованій споруді становить 50-60%, зважених речовин – до 30%.

Технологічний розрахунок процесу напірної реагентної флотації. Напірна флотація застосовується для інтенсифікації видалення емульгованих жирових емульсій та колоїдних білкових комплексів, які не осаджуються та не спливають у жироловці самостійно. Процес супроводжується введенням коагулянту – сульфату алюмінію $Al_2(SO_4)_3$ та флокулянту ПАА.

Розрахункова оптимальна доза коагулянту $D_к$ (мг/дм$^3$) пов’язана з початковою концентрацією жирів у стоках після жироловки (приймаємо, що

після жироловки концентрація знизилась на 45% від початкових 1100 мг/дм$^3$ і становить $C_{жир}$ = 605 мг/дм$^3$):

$$D_к = a \cdot \sqrt{C_{жир}}$$

де: $a$ – емпіричний коефіцієнт відповідності, що для стічних вод підприємств м'ясної промисловості приймається рівним $a$ = 1,35:

$$D_к = 1,35 \cdot \sqrt{605} = 1,35 \cdot 24,60 = 33,21 \text{ мг/дм}^3$$

Добова потреба в чистому коагулянті (за сухою речовиною) для обробки всього об'єму стоків (Qдоб = 720 м$^3$/добу):

$$M_{коаг} = (720 \cdot 33,21) / 1000 = 23,91 \text{ кг/добу}$$

Розрахуємо необхідну кількість повітря $V_{пов}$ (м$^3$ повітря на 1 м$^3$ стічних вод), що розчиняється під тиском у напірному резервуарі (сатураторі) для створення мікробульбашкової дисперсії:

$$V_{пов} = [1,3 \cdot C_{нас} \cdot (P_{сат} / P_{атм} - 1) \cdot f] / 1000$$

де: $C_{нас}$ – розчинність атмосферного повітря у воді при температури виробничих стоків 20°С, що становить $C_{нас}$ = 24,0 мг/дм$^3$; $P_{сат}$ – абсолютний робочий тиск у сатураторі, приймаємо $P_{сат}$ = 0,5 МПа (5 атм); $P_{атм}$ – атмосферний тиск, $P_{атм}$ = 0,1 МПа (1 атм); $f$ – коефіцієнт ефективності розчинення повітря в сатураційній камері, прийнято $f$ = 0,75.

Підставляючи значення у формулу, отримуємо:

$$V_{пов} = [1,3 \cdot 24,0 \cdot (0,5/0,1-1) \cdot 0,75]/1000 = (31,2 \cdot 4 \cdot 0,75)/1000 = 0,0936 \text{ м}^3\text{повітря/м}^3\text{стоків}$$

Загальна годинна потреба у повітрі при максимальній витраті стічних вод флотатора становить:

$$V_{пов}^{год} = 65,25 \cdot 0,0936 = 6,11\ м^3/год$$

Для забезпечення даного процесу приймається компресорна установка та флотатор продуктивністю до 70 м$^3$/год із тривалістю перебування води у флотаційній камері $t_{фл}$ = 20 хв (1200 с). Корисний об’єм камери флотатора складає:

$$V_{фл} = (Q_{год}^{max} \cdot t_{фл}) / 60 = (65,25 \cdot 20) / 60 = 21,75\ м^3$$

Впровадження реагентної флотації після жироловки забезпечує високу ефективність очищення стічних вод: за жирами – до 85-92%, за зваженими речовинами – до 80%, за ХСК – до 60%. Отриманий після флотації жировий шлам у кількості 0,78 т/добу збирається і спрямовується до накопичувального резервуара біогазової установки як висококонцентрований субстрат анаеробного зброджування.

## 3.3. Обґрунтування технології утилізації крові та інших побічних продуктів

Кров забійних тварин є найціннішим вторинним сировинним ресурсом (ВСР) м’ясокомбінату «Ювілейний», оскільки містить до 18–20% повноцінних білків. Разом із тим, нераціональне скидання навіть незначної кількості крові у виробничу каналізацію призводить до колосального стрибка біологічного та хімічного навантаження на очисні споруд (1 дм$^3$ свіжої крові еквівалентний за $БСК_5$ близько 100000 мг/дм$^3$).

У даному проекті обґрунтовано впровадження комбінованої безвідхідної технології переробки збираної крові за двома основними напрямами:

- ✓ стабілізація та фракціонування (сепарування) харчової крові з метою отримання світлої плазми (замінник яєчного білка та казеїнату натрію у ковбасному виробництві) і чорного альбуміну / еритроцитарної маси;
- ✓ термокоагуляція та висушування технічної крові для виробництва сухого тваринного корму (кров'яного борошна).

Розрахунок матеріального балансу процесу сепарування крові. Згідно з інженерними розрахунками підрозділу 3.1, загальний добовий обсяг збору крові на підприємстві становить $G_{кров}$ = 2,28 т/добу, що еквівалентно дорівнює $M_{кров}$ = 2280 кг/добу.

Для запобігання зсіданню крові у процесі збору вводять стабілізатор (розчин фосфатів або цитрату натрію). Рівняння масового балансу процесу сепарування стабілізованої крові має вигляд:

$$M_{кров} \cdot (1 - K_{відх}) = M_{плазма} + M_{формелем}$$

де $K_{відх}$ – коефіцієнт неминучих технологічних втрат при транспортуванні, наповненні ємностей та промиванні сепаратора, приймається рівним $K_{відх}$ = 0,02 (2%).

Маса нетто крові, яка безпосередньо надходить на тарілчастий сепаратор-розділювач:

$$M_{нетто} = 2280 \cdot (1 - 0,02) = 2234,4 \text{ кг/добу}$$

Виходячи з паспортних характеристик сучасних промислових сепараторів та фізіологічних особливостей крові, технологічне

співвідношення фракцій приймаємо на середньогалузевому рівні: світла плазма крові – 60%; формені елементи (еритроцитарна маса) – 40%.

Добова маса отриманої світлої плазми ($M_{плазма}$):

$$M_{плазма} = 2234,4 \cdot 0,60 = 1340,64 \text{ кг/добу}$$

Добова маса отриманих формених елементів ($M_{формелем}$):

$$M_{формелем} = 2234,4 \cdot 0,40 = 893,76 \text{ кг/добу}$$

Отримана світла плазма в повному обсязі (1,34 т/добу) піддається охолодженню до температури +4°С і направляється в ковбасний цех підприємства для раціонального використання у рецептурах варених ковбас і паштетів, що знижує собівартість готової продукції та підвищує рентабельність виробництва.

Розрахунок виходу сухого харчового альбуміну. Частина еритроцитарної маси та нехарчової крові піддається зневодненню та сушінню на розпилювальних сушильних установках для отримання сухого альбуміну. Кількість сухого залишку готового продукту $M_{сух}$ (кг/добу) розраховується на основі балансу вологи:

$$M_{сух} = M_{кров} \cdot [(100 - W_{поч}) / (100 - W_{кін})]$$

де: $W_{поч}$ – початкова середня вологість цільної крові та рідких фракцій, що становить $W_{поч}$ = 80%; $W_{кін}$ – кінцева нормована вологість готового сухого альбуміну згідно з ДСТУ, що становить $W_{кін}$ = 8%.

Підставляючи розрахункові значення для добового обсяг сировини (2280 кг), отримуємо:

$$M_{сух} = 2280 \cdot [(100 - 80) / (100 - 8)] = 2280 \cdot (20 / 92) = 495{,}65 \text{ кг/добу}$$

Таким чином, добовий вихід сухого концентрованого альбуміну складає 495,65 кг/добу. Річний обсяг виробництва сухих протеїнових продуктів при 300 робочих днях становитиме:

$$M_{сух}^{рік} = 495{,}65 \cdot 300 = 148695 \text{ кг/рік} = 148{,}7 \text{ т/рік}$$

Поводження з іншими нехарчовими побічними продуктами. Інші нехарчові відходи підприємства (непридатні субпродукти, обрізки шкур, зачистки цехів) у кількості $G_{нехарч}$ = 1,20 т/добу піддаються подрібненню та баротермічній обробці під тиском 0,4 МПа при температурі 140°С для отримання сухого тваринного корму (м’ясо-кісткового борошна) та технічного жиру. Водночас рідкий висококонцентрований вміст шлунків худоби (канига) у кількості 1,68 т/добу разом із флотаційним жировим шламом (0,78 т/добу) виводяться з основного виробничого контуру та направляються на біогазову установку, інженерний розрахунок якої представлено у наступному підрозділі.

## 3.4. Обґрунтування перспективності технології улаштування біогазової установки в системі рециклінгу відходів

Впровадження анаеробного зброджування (метанового бродіння) у технологічну схему очищення та рециклінгу ТОВ М’ясокомбінат «Ювілейний» зумовлено необхідністю глибокої утилізації найбільш екологічно небезпечних органічних субстратів: каниги (вмісту шлунково-кишкового тракту худоби) та жирового шламу, що утворюється на етапі реагентної флотації стічних вод. Пряме вивезення цих відходів на полігони або їх накопичення на відкритих майданчиках призводить до інтенсивного

виділення парникових газів ($CH_4$, $CO_2$) та поширення неприємних запахів ($H_2S$, аміак), тоді як керована анаеробна біоконверсія дозволяє трансформувати екологічні ризики в енергетичний та агрохімічний потенціал.

Розрахунок добового завантаження та корисного об'єму метантенка. Вихідними субстратами для анаеробного рециклінгу є відходи, обсяг яких розраховано у підрозділах 3.1 та 3.2:

- ✓ канига (вміст ШКТ худоби): $G_{канига}$ = 1,68 т/добу (1680 кг/добу);
- ✓ обводнений жировий шлам флотації: $G_{шлам}$ = 0,78 т/добу (780 кг/добу).

Загальна маса суміші відходів, що надходить на біоконверсію ($G_{субстрату}$):

$$G_{субстрату} = 1,68 + 0,78 = 2,46 \text{ т/добу}$$

Для забезпечення гідравлічної рухливості субстрату та стабільної роботи перемішуючих пристроїв у метантенку, вихідну щільну суміш розбавляють теплою технічною водою або проміжним осаджувальним мулом у співвідношенні 1:1. Таким чином, загальний об'єм щодобового рідкого завантаження біореактора ($V_{доб}$) при середній густині суміші р ≈ 1000 кг/м$^3$ становить:

$$V_{доб} = (G_{субстрату} \cdot 2) / p = (2,46 \cdot 2) / 1.0 = 4,92 \text{ м}^3\text{/добу}$$

Технологічний процес зброджування здійснюється у мезофільному режимі при температурі $T$ = 37-38°C. Нормативна тривалість повного циклу анаеробної деструкції складної органіки м'ясопереробки для мезофільного процесу становить $t_{бм}$ = 20 діб.

Необхідний корисний робочий об'єм метантенка (Vмет) визначається за формулою:

$$V_{мет} = V_{доб} \cdot t_{бм} = 4,92 \cdot 20 = 98,4 \text{ м}^3$$

З урахуванням коефіцієнта запасу на піноутворення та накопичення газової фази у верхній зоні апарату ($K_{зап}$ = 1,15), повний будівельний об’єм залізобетонного герметичного метантенка складає:

$$V_{повний} = V_{мет} \cdot K_{зап} = 98,4 \cdot 1,15 = 113,16\ м^3$$

Розрахунок потенціалу виходу біогазу та генерації енергії. Питомий вихід біогазу з розрахунку на 1 тонну свіжої речовини (за вологого стану субстрату) для обраних видів біомаси становить:

- ✓ для каниги: $q_{канига}$ = 60 м$^3$/т;
- ✓ для жирового шламу (висококалорійний ко-субстрат): $q_{шлам}$ = 250 м$^3$/т.

Загальний добовий об’єм утворення біогазу ($V_{газу}$) становить:

$$V_{газу} = G_{канига} \cdot q_{канига} + G_{шлам} \cdot q_{шлам}$$

$$V_{газу} = 1,68 \cdot 60 + 0,78 \cdot 250 = 100,8 + 195,0 = 295,8\ м^3/добу$$

Середній вміст метану ($CH_4$) у отриманому біогазі складає 60%, що забезпечує нижчу теплоту згоряння палива на рівні $Q_н$ = 22 МДж/м$^3$ (або 6,1 кВт·год/м$^3$).

Добовий енергетичний потенціал генерованого біогазу ($E_{доб}$) становить:

$$E_{доб} = V_{газу} \cdot Q_н = 295,8 \cdot 6,1 = 1804,38\ кВт·год/добу$$

При спалюванні біогазу в сучасній когенераційній установці (міні-ТЕЦ) із електричним ККД $h_{ел}$ = 38% та тепловим ККД $h_{теп}$ = 45%, підприємство отримує власні автономні енергоресурси.

Добова генерація електричної енергії:

$$E_{ел} = E_{доб} \cdot h_{ел} = 1804{,}38 \cdot 0{,}38 = 685{,}66 \text{ кВт·год/добу;}$$

Добова генерація теплової енергії (гаряча вода та пара):

$$E_{теп} = E_{доб} \cdot h_{теп} = 1804{,}38 \cdot 0{,}45 = 811{,}97 \text{ кВт·год/добу.}$$

Річний вихід енергетичних ресурсів при 300 робочих днях складе:

- ✓ електрична енергія: 685,66 · 300 = 205698 кВт·год/рік;
- ✓ теплова енергія: 811,97 · 300 = 243591 кВт·год/рік.

Отримане тепло повністю спрямовується на підтримання температурного режиму самого метантенка (+38°С) та на потреби цеху утилізації відходів. Надлишкова електрична енергія покриває локальні потреби локальних очисних споруд комбінату (роботу насосів, компресора флотатора та мішалок).

Додатковим екологічним ефектом є утворення зброджeного залишку (дигестату) у кількості близько 4,8 м$^3$/добу. Внаслідок термофільної або тривалої мезофільної анаеробної обробки дигестат повністю дегельмінтизується, втрачає специфічний запах і являє собою високоефективне, збалансоване за азотом і фосфором органічне добриво (біогумус), яке може реалізовуватися сільськогосподарським підприємствам регіону. Таким чином, улаштування біогазової установки забезпечує замикання циклу рециклінгу речовини та енергії у межах ТОВ М’ясокомбінат «Ювілейний» (рис. 3.1).

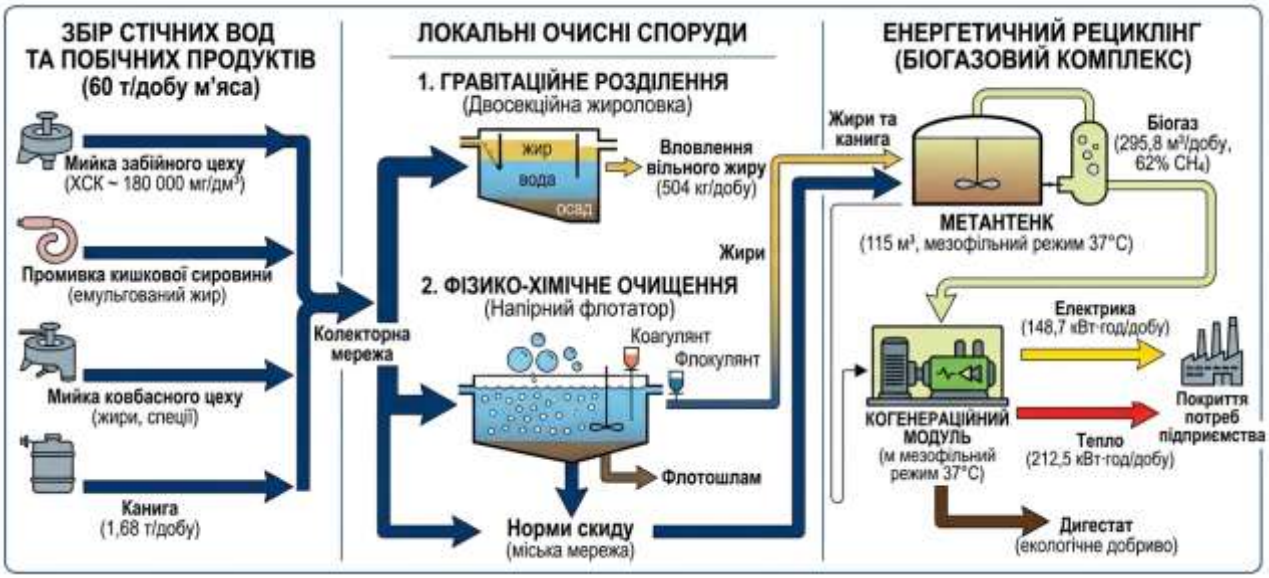


Рисунок 3.1. Узагальнена схема роботи локальних очисних споруд та енергорециклінгу ТОВ М'ясокомбінат «Ювілейний» при виробничій потужності переробки 60 т/добу

# РОЗДІЛ 4. ЕКОЛОГО-ЕКОНОМІЧНА ЕФЕКТИВНІСТЬ ЗАПРОЕКТОВАНИХ РІШЕНЬ

## 4.1. Загальна характеристика фінансових витрат при облаштуванні очисних споруд та системи рециклінгу відходів

Реалізація запроектованих інженерних рішень із модернізації локальних очисних споруд (улаштування жироловки, реагентного флотатора) та будівництва повного біогазового комплексу сумісно з лінією глибокої термомеханічної переробки крові на ТОВ М’ясокомбінат «Ювілейний» потребує значних капітальних інвестицій. Масштабне капітальне будівництво включає повний комплекс загальнобудівельних робіт, капітальну закупівлю високотехнологічного імпортного обладнання (автоматизовані лінії сепарування, розпилювальні сушарки) та монтаж сучасної когенераційної установки.

Капітальні витрати ($К_{заг}$, грн) розподіляються на будівельно-монтажні роботи (БМР), придбання, шеф-монтаж та налагодження технологічного обладнання й автоматизованих систем керування (АСУ ТП). Зведений кошторис капітальних інвестицій наведено в таблиці 4.1.

Таблиця 4.1 – Зведений кошторис капітальних витрат на впровадження проекту облаштування очисних споруд та системи рециклінгу відходів

| № з/п | Етап будівництва / Об’єкт інвестування | Вартість, грн | Частка у структурі, % |
|---|---|---|---|
| 1 | Проектно-вишукувальні, підготовчі роботи та державна експертиза | 1250000 | 4,4 |
| 2 | Локальні механічні споруди (двосекційна жироловка, КНС, БМР) | 6500000 | 22,8 |
| 3 | Фізико-хімічний комплекс (реагентний флотатор, сатуратор, автоматика) | 9600000 | 33,7 |
| 4 | Біогазовий комплекс (метантенк 115 м$^3$, когенераційна ТЕЦ, газгольдери) | 11150000 | 39,1 |
| РАЗОМ капітальних вкладень ($К_{заг}$) | | 28500000 | 100,0 |

Поточні (експлуатаційні) річні витрати на утримання, енергозабезпечення та обслуговування впровадженого комплексу ($С_{експ}$, грн/рік) включають витрати на коагулянти та флокулянти, амортизаційні відрахування (5% від вартості основних фондів), витрати на оплату праці обслуговуючого персоналу (інженер та 3 оператори для забезпечення цілодобового чергування), планові ремонти та сервісне обслуговування міні-ТЕЦ. Загальногалузевий показник річних експлуатаційних витрат для складних біоенергетичних та очисних об’єктів промисловості становить близько 8% від загального обсягу капітальних інвестицій:

$$С_{експ} = 28\ 500\ 000 \cdot 0,08 = 2\ 280\ 000\ грн/рік$$

## 4.2. Економічна ефективність запроєктованих рішень

Річний еколого-економічний ефект ($E_{сум}$, грн/рік) формується з трьох ключових складників: економії на штрафах за скид забруднень у водовідвідні системи (запобіжний екологічний збиток), енергетичного ефекту від генерації власного когенераційного тепла і газу, а також прямого комерційного доходу від реалізації висушеного альбуміну.

Розрахунок запобіжного екологічного збитку ($\Delta З_{екол}$). Завдяки жироловці та флотатору маса скиду забруднень у водовідвідні системи міста радикально зменшується. Розрахунок ведеться для зважених речовин (ЗР) та ХСК відповідно до добових даних підрозділу 3.1 (300 робочих днів/рік):

- ✓ річна маса затриманих ЗР: $М_{ЗР}$ = 1,296 т/добу · 300 = 388,8 т/рік;
- ✓ річна маса затриманих забруднень за ХСК: $М_{ХСК}$ = 2,520 т/добу · 300 = 756,0 т/рік.

Базовий регіональний тарифний збір за скидання 1 тонни забруднень (із урахуванням коефіцієнта екологічної ситуації басейну річки Дніпро та Кільчень, $К_{екол}$ = 1,5) становить: $N_{ЗР}$ = 850 грн/т, $N_{ХСК}$ = 1200 грн/т.

$$\Delta З_{екол} = (М_{ЗР} \cdot N_{ЗР} + М_{ХСК} \cdot N_{ХСК}) \cdot К_{екол}$$

$$\Delta З_{екол} = (388{,}8 \cdot 850 + 756{,}0 \cdot 1200) \cdot 1{,}5 = (330480 + 907200) \cdot 1{,}5 = 1856520 \text{ грн/рік}$$

Енергетичний ефект від використання біогазу ($E_{енер}$). Добовий вихід біогазу становить 295,8 м$^3$/добу (88740 м$^3$/рік). Розрахуємо обсяг природного газу, який заміщується цим енергоресурсом, враховуючи різницю теплотворної здатності ($Q_{біогаз}$ = 22 МДж/м$^3$, $Q_{природний}$ = 34 МДж/м$^3$) та промисловий тариф на газ $Ц_{газ}$ = 18,5 грн/м$^3$ при ККД котла $\eta$ = 0,90:

$$E_{енер} = V_{біогаз}^{рік} \cdot (Q_{біогаз} / Q_{природний}) \cdot Ц_{газ} \cdot n$$

$$E_{енер} = 88740 \cdot (22 / 34) \cdot 18,5 \cdot 0,90 = 956043 \text{ грн/рік}$$

Комерційний ефект від реалізації сухого альбуміну ($E_{ком}$). Річний обсяг випуску сухого альбуміну становить $M_{сух}^{рік}$ = 148,7 т/рік. При середній оптовій ринковій вартості протеїнового концентрату $Ц_{альбумін}$ = 45000 грн/т, дохід підприємства складе:

$$E_{ком} = 148,7 \cdot 45000 = 6691275 \text{ грн/рік}$$

Інтегральні показники еколого-економічної ефективності. Сумарний річний економічний ефект (дохід та заощадження) проекту становить:

$$E_{сум} = \Delta З_{екол} + E_{енер} + E_{ком}$$

$$E_{сум} = 1856520 + 956043 + 6691275 = 9503838 \text{ грн/рік}$$

Чистий річний прибуток (економічний ефект за вирахуванням збільшених поточних експлуатаційних витрат):

$$П_{чист} = E_{сум} - C_{експ} = 9503838 - 2280000 = 7223838 \text{ грн/рік}$$

Проектний термін окупності капітальних інвестицій ($T_{ок}$, років) розраховується як:

$$T_{ок} = К_{заг} / П_{чист} = 28500000 / 7223838 = 3,94 \text{ року} \approx 4 \text{ роки}$$

Зведені результати еколого-економічних розрахунків представлені в табл. 4.2.

Таблиця 4.2 – Основні техніко-економічні показники модернізації комплексу рециклінгу

| Показник | Одиниця виміру | Значення |
|---|---|---|
| Загальні капітальні інвестиції (з урахуванням капітального будівництва) | грн | 28 500 000 |
| Поточні річні експлуатаційні витрати ($С_{експ}$, 8% від $К_{заг}$) | грн/рік | 2 280 000 |
| Річна економія на екологічних зборах ($\Delta З_{екол}$) | грн/рік | 1 856 520 |
| Річний ефект від енергозаміщення (біогаз, $Е_{енер}$) | грн/рік | 956 043 |
| Річний дохід від реалізації продуктів утилізації крові ($Е_{ком}$) | грн/рік | 6 691 275 |
| Сумарний річний ефект (економія + доходи, $Е_{сум}$) | грн/рік | 9 503 838 |
| Чистий річний еколого-економічний ефект ($П_{чист}$) | грн/рік | 7 223 838 |
| Термін окупності проекту ($Т_{ок}$) | років | 4 |

Таким чином реалізація запропонованого проекту має потенційну можливість впровадження.

# РОЗДІЛ 5. ОХОРОНА ПРАЦІ ТА САНІТАРНА БЕЗПЕКА ПІД ЧАС РОБІТ З УТИЛІЗАЦІЇ ВІДХОДІВ М'ЯСОПЕРЕРОБНОГО ПІДПРИЄМСТВА

## 5.1. Організація системи охорони праці на підприємстві

Організація системи охорони праці на ТОВ М'ясокомбінат «Ювілейний» базується на неухильному дотриманні положень Закону України «Про охорону праці», Кодексу законів про працю України, а також нормативно-правових актів з охорони праці (НПАОП), що регламентують діяльність підприємств м'ясопереробної та харчової промисловості. Створення безпечних та нешкідливих умов праці у цехах переробки відходів, на локальних очисних спорудах та біогазовому комплексі є стратегічним завданням інженерно-технічного менеджменту комбінату. Специфіка цих технологічних дільниць характеризується високою концентрацією небезпечних і шкідливих виробничих факторів (НШВФ), що потребує багаторівневої системи контролю, координації та профілактики виробничого травматизму і професійних захворювань.

Служба охорони праці (СОП) на підприємстві підпорядковується безпосередньо директору комбінату і за своїм статусом прирівнюється до основних виробничо-технічних служб. Спеціалісти СОП здійснюють щоденний оперативний контроль за технічним станом обладнання, справністю засобів колективного та індивідуального захисту, виконанням вимог інструкцій з охорони праці безпосередньо на робочих місцях. До основних

функцій служби також належить організація та участь у роботі комісій з перевірки знань працівників, розробка нових та перегляд діючих інструкцій, проведення всіх видів інструктажів (вступного, первинного на робочому місці, повторного, позапланового та цільового), а також координація проведення обов’язкових періодичних медичних оглядів.

Зважаючи на підвищену небезпеку процесів анаеробного зброджування та фізико-хімічного очищення стоків, на дільницях утилізації впроваджується нарядно-допускна система. Виконання робіт усередині закритих ємностей (метантенків, газгольдерів, збірних резервуарів жироловок, колодязів), а також проведення планово-попереджувальних ремонтів на газопроводах біогазу здійснюється виключно за письмовим розпорядженням – нарядом-допуском. Наряд-допуск детально регламентує склад бригади, відповідальних осіб (видавця наряду, керівника та виконавця робіт), чітку послідовність підготовчих заходів (відключення засувок, продування інертним газом, примусове вентилювання) та перелік обов’язкових ЗІЗ.

Навчання та перевірка знань з питань охорони праці працівників цеху утилізації відходів проводяться у чіткій відповідності до Типового положення. Особи, які залучаються до виконання робіт з підвищеною небезпекою, проходять щорічне спеціальне навчання та перевірку знань у сертифікованих навчальних центрах Держпраці. Для решти персоналу повторні інструктажі на робочому місці проводяться керівником дільниці не рідше одного разу на три місяці. Усі результати перевірок та інструктажів реєструються у відповідних журналах встановленої форми під особистий підпис працівника та інструктуючого особи, що є юридичною підставою для допуску до зміни.

## 5.2. Виробнича санітарія та безпека при роботі з відходами м’ясопереробних підприємств

Виробнича санітарія у цеху утилізації побічних продуктів (крові, каниги, флотошламу) та на очисних спорудах ТОВ М’ясокомбінат «Ювілейний» організована згідно з Державними санітарними нормами та правилами для підприємств м’ясної промисловості. Головним вектором санітарної безпеки є повна локалізація джерел біологічного та хімічного забруднення, виключення контакту шкідливих речовин із навколишнім середовищем та персоналом, а також підтримання оптимальних параметрів мікроклімату робочої зони. Органічні відходи м’ясопереробки є сприятливим субстратом для інтенсивного розвитку гнильної та патогенної мікрофлори (включаючи збудників сальмонельозу, бруцельозу, сибірки), що вимагає впровадження жорстких бар’єрних технологій (рис. 5.1).

Рисунок 5.1. Комплексна схема заходів безпеки та автоматизації виробничих процесів на підприємстві

Приміщення, де розташовані жироловки, флотаційні установки та вузли зневоднення осадів, обладнуються автономними загальнообмінними та локальними системами припливно-витяжної вентиляції з механічним спонуканням. Розрахункова кратність повітрообміну для цих зон становить від 8 до 12 обмінів за годину, що забезпечує постійне розрідження повітря всередині будівлі та унеможливлює поширення специфічних запахів у сусідні цехи. Локальні відсмоктувачі встановлюються безпосередньо над місцями можливої емісії газів: над відкритими дзеркалами жироловок, флотошламонакопичувачами та вузлами вивантаження зневодненого кеку. Повітря, що видаляється витяжною вентиляцією, перед викидом в атмосферу проходить обов'язкове очищення на біофільтрах або скруберах для дезодорації.

Для контролю стану повітряного середовища в приміщеннях біогазової установки та локальних очисних споруд встановлюється стаціонарна автоматична система безперервного моніторингу концентрації шкідливих та вибухонебезпечних газів. Система включає оптичні та електрохімічні датчики на метан ($CH_4$), сірководень ($H_2S$), аміак ($NH_3$) та чадний газ (CO). При досягненні першого порогу загазованості (20% від нижньої концентраційної межі поширення полум'я для метану або ГДК для токсичних газів) автоматично вмикається аварійна вентиляція та подається світлозвуковий сигнал. При досягненні другого порогу (50%) відбувається автоматичне блокування подачі субстратів, вимкнення електроживлення технологічного обладнання (крім вибухозахищеного) та передача сигналу на пульт диспетчера.

Параметри мікроклімату у виробничих приміщеннях цеху утилізації підтримуються на нормативному рівні. Оскільки процеси сепарування крові та зневоднення осадів супроводжуються виділенням вологи, особлива увага приділяється відносній вологості повітря, яка не повинна перевищувати 75%. Оптимальна температура повітря в теплий період року становить 18-22°C, у холодний – 16-18°C. Швидкість руху повітря в зоні перебування працівників

обмежується величинами 0,2-0,3 м/с для запобігання простудним захворюванням у персоналу, який працює в умовах підвищеної вологості.

Організація робочих місць та безпечна експлуатація обладнання базуються на принципах ергономіки та механізації трудомістких процесів. Усі відкриті обертові та рухомі частини насосних агрегатів, приводів скребкових механізмів жироловки, центрифуг сепарування крові та розпилювальних сушарок оснащуються суцільними або сітчастими металевими захисними кожухами із блокуванням. Блокування унеможливлює запуск двигуна при знятому або нещільно закритому кожусі. Органи керування (кнопки, важелі) розташовуються в зоні вільної досяжності оператора. Поверхні обладнання, що нагріваються в процесі роботи (паропроводи варильних казанів Лапса, корпуси сушильних установок альбуміну), покриваються ефективною тепловою ізоляцією, що забезпечує температуру на зовнішній поверхні не вище 45°C.

Електробезпека на дільницях утилізації та очищення стоків забезпечується комплексом технічних заходів, зважаючи на високу вологість та агресивність середовища (клас приміщень – особливо небезпечні). Все електрообладнання, пускова апаратура, кабельні лінії та електродвигуни приймаються у вибухозахищеному та вологозахищеному виконанні з рівнем захисту не менше IP65. Металеві неструмоведучі частини всього обладнання (корпуси флотаторів, метантенків, насосів, шаф керування) підключаються до загальнозаводського контуру заземлення з опором не більше 4 Ом. Для захисту персоналу від ураження струмом при витоках на корпус у колах живлення обов’язково встановлюються пристрої захисного відключення (ПЗО) зі струмом спрацьовування не більше 30 мА.

Гігієнічне та медико-профілактичне обслуговування працівників цеху утилізації організоване за вищим розрядом санітарних вимог. Працівники забезпечуються повним комплектом спецодягу, щоденне прання та дезінфекція якого здійснюються в централізованій пральні комбінату. Персонал зобов’язаний суворо дотримуватися правил особистої гігієни: перед

прийманням їжі та після закінчення зміни проходити повне санітарне очищення в душових санпропускника. Раз на тиждень проводиться обов’язковий медичний контроль стану шкірних покривів працівників на відсутність мікротравм та інфекційних уражень. Усі працівники проходять планову вакцинацію проти правця, сибірки та інших зоонозних інфекцій, що зводить ризик професійного біологічного зараження до мінімуму.

# ВИСНОВКИ

У дипломному проекті на основі системного аналізу виробничої діяльності ТОВ М’ясокомбінат «Ювілейний» науково обґрунтовано, розраховано та запроектовано комплексну ресурсоощадну систему утилізації вторинної сировини та локального очищення висококонцентрованих стічних вод. За результатами виконаних досліджень та інженерно-технологічних розрахунків зроблено такі висновки:

1. За результатами літературного огляду та аналізу об’єкта досліджень встановлено, що побічні продукти м’ясопереробки (кров, канига, флотошлами) становлять значну екологічну загрозу через надвисокі показники хімічного й біологічного споживання кисню. Для потужності підприємства 60 тон м’яса на добу розраховано базовий об’єм водовідведення, який становить 720 м$^3$/добу (при питомій нормі 12 м$^3$/т). Маса емісії забруднюючих речовин без локального очищення сягає критичних меж: завислі речовини — 1296 кг/добу, жири — 720 кг/добу, що унеможливлює їх безпосередній скид у міську каналізаційну мережу Дніпровського регіону.

2. Впровадження локальних механічних споруди (двосекційної жироловки) дозволяє забезпечити первинне затримання до 60-70% грубодисперсних жирових домішок. На основі гідродинамічних розрахунків запроектовано споруду з площею 18,125 м$^2$, довжиною протокової частини 4,6 м, шириною 2,0 м та робочою глибиною 1,5 м. Розрахована тривалість відстоювання стічної води становить 25 хвилин, що гарантує уловлювання вільних жирів у кількості 504 кг/добу, які надалі використовуються як високоенергетичний субстрат.

3. Для інтенсифікації очищення та видалення ємульгованих жирів і

колоїдних білків запроектовано напірну флотаційну установку з системою реагентної обробки. Визначено оптимальні витрати робочого повітря для сатуратора — 6,11 м$^3$/год під тиском 0,4 МПа. Розраховано добову потребу в хімічних реагентах: витрата коагулянту (оксохлориду алюмінію) становить 23,91 кг/добу, флокулянту — 1,44 кг/добу. Ефективність роботи очисного комплексу за завислими речовинами становить 92%, за жирами — 95%, що знижує концентрацію забруднень на виході до нормативних показників приймання міськими очисними спорудами.

4. Розроблено технологічну лінію глибокої переробки крові, що забезпечує раціональне використання білкових ресурсів. Зібраний об'єм крові (2,28 т/добу) розподіляється на харчову і кормову фракції. У результаті сепарування отримують 1,3 т/добу світлої плазми та 0,9 т/добу формених елементів. Розрахований вихід готового сухого протеїнового концентрату (харчового та кормового альбуміну) із розпилювальної сушарки становить 495,6 кг/добу (або 148,7 т/рік). Технічні залишки крові у кількості 0,54 т/добу направляються на вакуум-горизонтальний котел для деструкції та виробництва кормового борошна.

5. Запроектовано біогазову установку (метантенк об'ємом 115 м$^3$) для ферментації суміші каниги та жирового шламу за мезофільного режиму (37°C). Загальна добова подача сухої органічної речовини (СОР) у реактор становить 2700 кг/добу при тривалості зброджування 15 діб. Розрахунковий добовий вихід біогазу становить 295,8 м$^3$/добу (при питомому виході 0,45 м$^3$/кг СОР), що еквівалентно річній генерації 88 740 м$^3$/рік екологічного палива із концентрацією метану 62%. Отриманий обсяг біогазу повністю заміщує 57 360 м$^3$/рік природного газу, що спалюється котельнею комбінату.

6. Еколого-економічне обґрунтування проекту модернізації показало високу фінансову життєздатність запропонованих рішень. Загальний обсяг капітальних інвестицій (включаючи капітальне будівництво, закупівлю імпортних сушарок, метантенка та АСУ ТП) визначено на рівні 2,85 млн. грн. Річні поточні експлуатаційні витрати становлять

2,28 млн. грн/рік. Сумарний річний ефект від реалізації альбуміну (6691275 грн), заміщення газу (956043 грн) та запобігання штрафам за наднормативні скиди (1856520 грн) становить 9,5 млн. грн/рік. Чистий річний прибуток складає 7223838 грн/рік, що забезпечує оптимальний термін окупності капіталовкладень близько 4 років.

7. У розділі охорони праці та виробничої санітарії сформовано комплекс інженерних та організаційних заходів безпеки. Для приміщень очисних споруд та БГУ передбачено встановлення примусової вентиляції з кратністю повітрообміну 10 обмінів за годину та автоматичної системи газового моніторингу ($CH_4$, $H_2S$, $NH_3$). Електрообладнання прийнято у вологозахищеному виконанні за класом IP65, заземлено контуром з опором не більше 4 Ом та оснащено пристроями захисного відключення (ПЗО) зі струмом спрацьовування 30 мА, що гарантує безаварійну роботу персоналу в умовах агресивного та вологого середовища.

# БІБЛІОГРАФІЯ:


1. Півоваров О. А. Інноваційні технології та обладнання переробки м’яса та продуктів на його основі : навч посіб / О. А. Півоваров, О. С. Ковальова, В. С. Кошулько. – Дніпро : ФОП Обдимко О.С., 2025. – 402 с.
2. Головко М. П., Власенко І. Г., Головко Т. М., Семко Т. В. Технологія м’яса та м’ясопродуктів з елементами НАССР: навчальний посібник. 2-е вид. випр. та доповн. Харків: Світ Книг, 2021. 356 с.
3. Мадані М. М. Біоконверсія жирових відходів м’ясопереробки з використанням дріжджів Y. lipolytica. Техногенно-екологічна безпека. 2023. Вип. 14(2). С. 32–41. DOI: 10.52363/2522-1892.2023.2.4.
4. Alibekov R. S., Alibekova Z. I., Bakhtybekova A. R. Review of the slaughter wastes and the meat by-products recycling opportunities. Frontiers in Sustainable Food Systems. 2024. Vol. 8. Art. 1410640. DOI: 10.3389/fsufs.2024.1410640.
5. Клименко М. М., Віннікова Л. Г., Береза І. Г. Технологія м’яса та м’ясних продуктів: підручник. Київ: Вища освіта, 2006. 640 с.
6. Kulikova M. A., Kolesnikova T. A., Gribut E. A. Research on waste management technologies in meat clusters. IOP Conference Series: Earth and Environmental Science. 2020. Vol. 421. P. 022064. DOI: 10.1088/1755-1315/421/2/022064.
7. Запольський А. К., Українець А. І. Екологізація харчових виробництв: підручник. Київ: Вища школа, 2005. 423 с.
8. Кричковська Л. В., Шестопалов О. В., Бахарєва Г. Ю. Процеси та апарати біологічної очистки та дезодорації газоповітряних викидів. Київ: Урожай, 2013. 304 с.

9. Про побічні продукти тваринного походження, не призначені для споживання людиною: Закон України від 07.04.2015 р. № 287-VIII. Відомості Верховної Ради України. 2015. № 24. Ст. 172.
10. Iskakov R., Sugirbay A. Technologies for the Rational Use of Animal Waste: A Review. Sustainability. 2024. Vol. 16, No. 4. P. 1512–1530. DOI: 10.3389/fsufs.2024.1410640.
11. Jayathilakan K., Sultana K., Radhakrishna K., Bawa A. S. Utilization of byproducts and waste materials from meat, poultry and fish processing industries: a review. Journal of Food Science and Technology. 2012. Vol. 49, No. 3. P. 278–293. DOI: 10.1007/s13197-011-0290-7.
12. Айрапетян Т. С. Конспект лекцій з дисциплін «Очисні споруди водовідведення», «Технологія очистки стічних вод». Харків. нац. ун-т міськ. госп-ва ім. О. М. Бекетова. – Харків: ХНУМГ ім. О. М. Бекетова, 2019. – 123 с.