

**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 ПИВОВАРНОГО ВИРОБНИЦТВА»**

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

_____ Микола ЗАТУЛА

Керівник: _____ Олена КОВАЛЬОВА

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

Затулі Миколі Миколайовичу

(прізвище, ім'я, по батькові)

1. Тема роботи: «Обґрунтування технології утилізації відходів пивоварного виробництва», керівник роботи Ковальова Олена Сергіївна, 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 (крафтова пивоварня MOVA Brewing Co. (м. Дніпро)); 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 пивоварного підприємства; Розділ 4. Еколого-економічна ефективність запроєктованих рішень; Розділ 5. Охорона праці та санітарна безпеки під час робіт з утилізації відходів пивоварного 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	01.05-8.05.2026	
2	Розділ 2. Методика та характеристика об'єкту досліджень	09.05-15.05.2026	
3	Розділ 3. Технологічні розрахунки процесу утилізації відходів пивоварного підприємства	16.05-30.05.2026	
4	Розділ 4. Еколого-економічна ефективність запроєктованих рішень	31.05-03.06.2026	
5	Розділ 5. Охорона праці та санітарна безпеки під час робіт з утилізації відходів пивоварного підприємства	04.06-09.06.2026	
6	Вступ, висновки, бібліографія, підготовка презентації	10.06-12.06.2026	

Дата видачі завдання: 02 травня 2026 р.

Здобувач вищої освіти _____ (Микола ЗАТУЛА)
(підпис)

Керівник роботи _____ (Олена КОВАЛЬОВА)
(підпис)

ЗМІСТ

РЕФЕРАТ	6
ВСТУП	8
РОЗДІЛ 1. ОГЛЯД ЛІТЕРАТУРНИХ ДЖЕРЕЛ ЗА ТЕМОЮ ДОСЛІДЖЕНЬ	11
1.1. Сучасний стан галузі пивоваріння та проблеми накопичення вторинних сировинних ресурсів	11
1.2. Сучасні підходи до переробки (утилізації) побічних продуктів пивоварного виробництва	15
1.3. Перспективні напрями та шляхи використання вторинних сировинних ресурсів пивоварного виробництва	17
РОЗДІЛ 2. МЕТОДИКА ТА ХАРАКТЕРИСТИКА ОБ'ЄКТУ ДОСЛІДЖЕНЬ	19
2.1. Загальні відомості про об'єкт дослідження	19
2.2. Загальні методичні підходи до визначення характеристик вторинних сировинних ресурсів пивоварного підприємства ...	23
2.3. Методика технологічних розрахунків утилізації та повторного використання відходів пивоварного виробництва .	28
РОЗДІЛ 3. ТЕХНОЛОГІЧНІ РОЗРАХУНКИ ПРОЦЕСУ УТИЛІЗАЦІЇ ВІДХОДІВ ПИВОВАРНОГО ПІДПРИЄМСТВА	34
3.1. Обґрунтування технологічної схеми очищення дріжджових стоків пивоваріння	34
3.2. Розрахунки роботи очисного обладнання при фільтрації та очистці дріжджових стоків	38
3.3. Обґрунтування технології очистки стічних вод	43
3.4. Обґрунтування технологічної лінії роботи біогазової установки на відходах пивоваріння	47

РОЗДІЛ 4. ЕКОЛОГО-ЕКОНОМІЧНА ЕФЕКТИВНІСТЬ ЗАПРОЕКТОВАНИХ РІШЕНЬ	53
4.1. Загальна характеристика фінансових витрат при облаштуванні очисних споруд та системи рециклінгу відходів пивоварного підприємства	53
4.2. Економічна ефективність запроєктованих рішень	55
РОЗДІЛ 5. ОХОРОНА ПРАЦІ ТА САНІТАРНА БЕЗПЕКИ ПІД ЧАС РОБІТ З УТИЛІЗАЦІЇ ВІДХОДІВ ПИВОВАРНОГО ПІДПРИЄМСТВА	58
5.1. Організація системи охорони праці на підприємстві	58
5.2. Виробнича санітарія та безпеки при роботі з відходами пивоварного підприємства	60
ВИСНОВКИ	64
БІБЛІОГРАФІЯ	67

РЕФЕРАТ

Структура роботи. Кваліфікаційна робота складається зі вступу, п'яти розділів, загальних висновків та списку бібліографічних джерел. Повний обсяг текстової частини роботи становить 68 сторінок комп'ютерного тексту. Робота містить 13 таблиць і 5 рисунків.

Актуальність теми. Розвиток пивоварної індустрії в Україні, зокрема стрімке зростання сегменту крафтового пивоваріння, супроводжується утворенням значних обсягів концентрованих органічних відходів (пивної дробини, залишкових дріжджів, хмелевого осаду) та високо забруднених стічних вод. Малі підприємства, розташовані в межах урбанізованих територій, часто не мають локальних очисних споруд, що призводить до критичного перевантаження міських систем водовідведення за показниками ХСК та БСК. Традиційні методи утилізації відходів (вивезення на сміттєзвалища чи використання у тваринництві) є екологічно небезпечними або економічно неефективними для міських умов через логістичні витрати. Тому обґрунтування та розрахунок компактних, енерго- та водоефективних систем рециклінгу на засадах циркулярної економіки та анаеробної біоконверсії є актуальним науково-практичним завданням промислової екології.

Мета дослідження: обґрунтування, інженерно-технологічний розрахунок та розробка комплексної безвідходної системи утилізації вторинних сировинних ресурсів і очищення стічних вод крафтової пивоварні MOVA Brewing Co. (м. Дніпро) на основі інтеграції процесів механічного розділення, кавітаційного лізису та метанового зброджування.

Об'єкт дослідження: процес локального очищення висококонцентрованих ефлюентів та технологічного рециклінгу багатотоннажних вторинних сировинних ресурсів крафтового пивоварного підприємства.

Предмет дослідження: еколого-технологічні та біоенергетичні закономірності відцентрового сепарування, гідродинамічного кавітаційного кондиціювання та анаеробного субстратного зброджування суміші органічних відходів пивоваріння в умовах обмежених виробничих площ.

Ключові слова: *пивоварне виробництво, крафтова пивоварня, вторинні сировинні ресурси, пивна дробина, залишкові дріжджі, дріжджові стоки, анаеробне зброджування, метантенк, біогаз, когенерація, циркулярна економіка, еколого-економічна ефективність.*

ВСТУП

Сучасна світова індустрія пивоваріння демонструє стабільні темпи зростання та є одним із найбільших секторів харчової промисловості. Згідно з останніми аналітичними даними, світові доходи броварної індустрії прогножуються на рівні близько 610 млрд доларів США. Очікується, що в період до 2027 року глобальний ринок пива розширюватиметься з щорічним темпом приросту у 5,44%, а загальний обсяг виробництва сягне понад 189,3 млрд літрів. Середнє споживання напою на душу населення у світі становить понад 22,6 літра на рік. Глобальним лідером галузі залишається Китай, де щорічно виготовляється близько 40 мільярдів літрів пива.

В Україні пивоварний ринок також є високорозвиненим і консолідованим навколо кількох потужних міжнародних та національних гравців, серед яких ключові позиції займають «Оболонь», «Carlsberg Ukraine», «AB InBev Efes» та «Anadolu Efes Ukraine». Поряд із великими індустріальними підприємствами активно розвивається сегмент крафтового пивоваріння, що орієнтується на створення унікальних сортів із використанням локальних інгредієнтів.

Разом із тим, стрімке нарощування обсягів виробництва неминуче призводить до загострення екологічних та технологічних проблем, пов'язаних із утворенням величезної кількості відходів бродильних виробництв.

В умовах переходу світової економіки до моделі циркулярної економіки та концепції безвідходних технологій наукові дослідження спрямовані на відхід від низькотехнологічного спалювання чи простого згодовування відходів худобі. Сучасна система управління відходами повинна не лише мінімізувати екологічні ризики, а й максимізувати додану вартість та знижувати викиди CO_2 . Серед перспективних високотехнологічних напрямків

утилізації ВСР виділяють екстракцію біологічно активних речовин, збагачення продуктів харчування, біоконверсію, а також анаеробне зброджування з отриманням біогазу (біоенергетика).

Анаеробна переробка суміші пивної дробини, залишкових дріжджів, хмелевого осаду та висококонцентрованих дріжджових стоків є ідеальним комплексним субстратом для метанового бродіння. Вона дозволяє повністю дезінфікувати та стабілізувати відходи, згенерувати значні обсяги біогазу для когенераційного отримання власної теплової та електричної енергії, а також отримати високоякісне екологічно чисте біодобриво (дигестат).

Особливу актуальність дана проблема набуває для підприємств малої потужності (крафтових пивоварень). Об'єктом дослідження обрано крафтову пивоварню MOVA Brewing Co. (м. Дніпро) з номінальною проєктною потужністю 100 тон готової продукції на рік. Малі підприємства часто не мають повноцінних локальних споруд для утилізації концентрованих побічних продуктів. Специфіка крафтового варіння призводить до утворення відходів із високим і нестабільним питомим забрудненням.

Мета дослідження: обґрунтування, розрахунок та розробка комплексної енерго- і водоефективної інженерно-екологічної системи локального очищення стічних вод і циркулярного рециклінгу багатотоннажних органічних відходів крафтової пивоварні на засадах безвідходних технологій та анаеробної біоконверсії.

Для досягнення поставленої мети визначено та вирішено такі **завдання:**

1. Проаналізувати сучасний стан пивоварної галузі, динаміку накопичення та фізико-хімічні характеристики вторинних сировинних ресурсів і стічних вод.
2. Обґрунтувати комбіновану технологічну схему локального очищення та кавітаційного кондиціонування концентрованих дріжджових стоків.
3. Виконати добові та річні матеріально-потоківі розрахунки процесів відцентрового сепарування, дискової мікрофільтрації та кінетики кавітаційного руйнування органічних забруднень.

4. Розробити та обґрунтувати компактну триступеневу схему очищення загальнозаводських стічних вод до нормативних вимог скидання у міську комунальну каналізацію.

5. Розрахувати біоенергетичні та конструктивні параметри анаеробного метантенка для субстратного зброджування суміші щільних відходів та активованого фугату.

6. Оцінити електричний та тепловий потенціал інтегрованого когенераційного модуля, а також розрахувати капітальні інвестиції, операційні витрати та термін окупності проєкту.

7. Розробити комплекс інженерно-технічних, організаційних та санітарно-гігієнічних заходів із забезпечення охорони праці та пожежо- і вибухобезпеки утилізаційного комплексу.

Об'єкт дослідження: процес локального очищення концентрованих ефлюентів та технологічної утилізації багатотоннажних вторинних сировинних ресурсів крафтового пивоварного підприємства.

Предмет дослідження: еколого-технологічні закономірності відцентрового розділення, гідродинамічного кавітаційного лізису та анаеробного субстратного зброджування суміші пивної дробини, залишкових дріжджів та хмелевого осаду в умовах крафтової пивоварні.

РОЗДІЛ 1. ОГЛЯД ЛІТЕРАТУРНИХ ДЖЕРЕЛ ЗА ТЕМОЮ ДОСЛІДЖЕНЬ

1.1. Сучасний стан галузі пивоваріння та проблеми накопичення вторинних сировинних ресурсів

Сучасна світова індустрія пивоваріння демонструє стабільні темпи зростання та є одним із наймасштабніших секторів харчової промисловості [2]. Згідно з останніми аналітичними даними, світові доходи броварної індустрії прогножуються на рівні близько 610 млрд доларів США [2]. Очікується, що в період до 2027 року глобальний ринок пива розширюватиметься з щорічним темпом приросту у 5,44%, а загальний обсяг виробництва сягне понад 189,3 млрд літрів [2]. Середнє споживання напою на душу населення у світі становить понад 22,6 літра на рік [2]. Глобальним лідером галузі залишається Китай, де щорічно виготовляється близько 40 мільярдів літрів пива [4].

В Україні пивоварний ринок також високорозвинений і консолідований навколо кількох потужних міжнародних та національних гравців (рис. 1.1), серед яких ключові позиції займають «Оболонь», «Carlsberg Ukraine», «AB InBev Efes» та «Anadolu Efes Ukraine» [4]. Поряд із великими індустріальними підприємствами активно розвивається сегмент крафтового пивоваріння, що орієнтується на створення унікальних сортів із використанням локальних інгредієнтів [4]. Сучасні споживчі тренди стимулюють попит на нові стилі пива (ІРА, стаути, кислі елі), а також на безалкогольні та низькоалкогольні варіації напою, зумовлені популяризацією здорового способу життя [4].

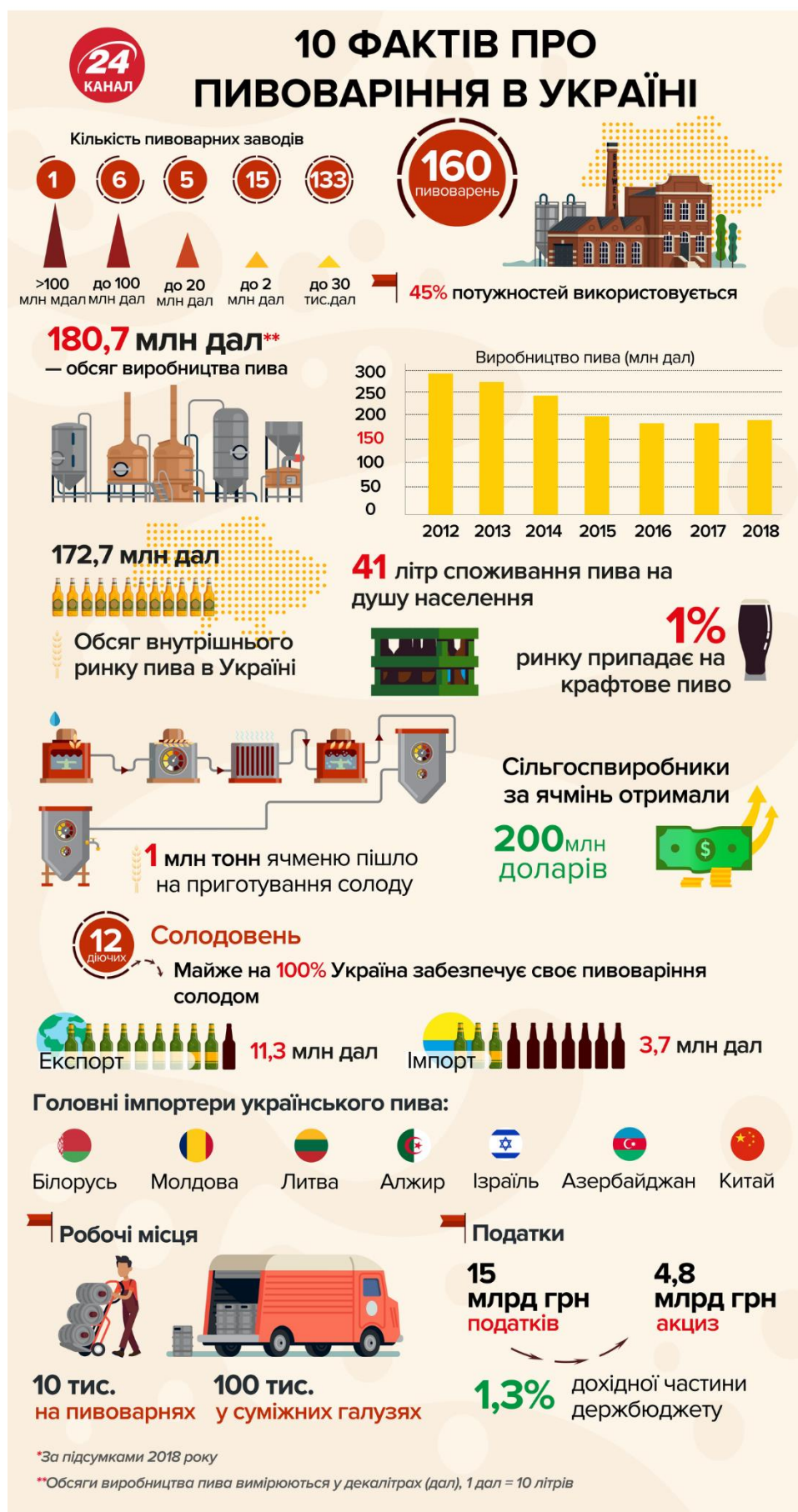


Рисунок 1.1. Загальна інфографіка фактів про пивоваріння в Україні

(за даними 24 каналу: https://24tv.ua/economy/pivo_v_ukrayini_tsikavi_fakti_pro_pivovarinnya_v_ukrayini_n1186670)

За даними офіційної експертної оцінки галузевої компанії ПрАТ «Укрпиво», у 2024 році обсяг виробництва пива в Україні (без урахування безалкогольного зі вмістом спирту до 0,5% об.) становив близько 140,0 млн декалітрів (або 1,4 млрд літрів). У 2025 році, попри складні макроекономічні умови та воєнні виклики, вітчизняні підприємства зварили 134,3 млн декалітрів (1,343 млрд літрів) пива. Хоча ці показники через об'єктивні чинники становлять близько 78,8% від довоєнного рівня 2021 року, загальні обсяги виробництва залишаються колосальними.

Разом із тим, стрімке нарощування обсягів виробництва неминуче призводить до загострення екологічних та технологічних проблем, пов'язаних із утворенням величезної кількості відходів бродильних виробництв [5]. Ефективна організація системи менеджменту пивоварні покликана мінімізувати забруднення довкілля за мінімальних фінансових витрат підприємства [6]. Пивоваріння належить до матеріало- та водомістких технологічних процесів, де на кожному етапі генеруються значні обсяги побічних продуктів біотичного та абіотичного походження, які потребують раціонального поводження для зниження антропогенного навантаження на довкілля [5].

Основними видами вторинних сировинних ресурсів (ВСР) пивоварного підприємства є [2, 5]:

- пивна дробина – твердий залишок, що утворюється після фільтрації затору і становить близько 85% від загальної кількості всіх щільних відходів підприємства [2, 5]. На кожні 100 літрів готового пива припадає близько 20 кг вологої дробини [2], що еквівалентно показнику 20-22 кг на гектолітр [5];
- залишкові пивні дріжджі – біомаса, що накопичується після завершення процесів бродіння та дозрівання пива [5]. Питомий вихід цього відходу становить від 1,5 до 2,6 кг на гектолітр напою [5];
- хмелевий осад та брух – гарячий осад, який виділяється під час кип'ятіння та освітлення суслу у гідроциклонних апаратах (вірпулах), обсяг якого досягає приблизно 1,4 кг на гектолітр [5];

→ рідкі стоки та відпрацьовані фільтрувальні матеріали – значні обсяги промислових стічних вод із високим рівнем органічного забруднення, а також відпрацьований діатоміт (кізельгур), що використовується на стадії фінішної фільтрації готового продукту [5].

Спираючись на питомі норми утворення побічних продуктів [2, 5] та офіційні дані компанії «Укрпиво» про обсяги виробництва за 2025 рік, було розраховано загальну кількість відходів, які щорічно утворюються на вітчизняних browарнях (таблиця 1.1).

Таблиця 1.1. Розрахункові обсяги утворення основних відходів пивоваріння в Україні за підсумками 2025 року

Вид вторинного ресурсу / відходу	Питома норма утворення (на 1 гектолітр пива)	Загальний обсяг утворення в Україні за 2025 рік, тон
Пивна дробина (волога)	20,0 – 22,0 кг	268 600 – 295 460
Залишкові пивні дріжджі	1,5 – 2,6 кг	20 145 – 34 918
Хмелевий осад і брук	1,4 кг	18 802

Головна екологічна небезпека накопичення цих відходів полягає в їхній фізико-хімічній природі [3]. Свіжа пивна дробина та хмелевий осад мають надзвичайно високу вологість: вологість сирої дробини становить 76-78%, а хмелевого осаду – 80-85% [3]. Через високий вміст залишкових цукрів, білків та води ці відходи є ідеальним поживним середовищем для патогенної мікрофлори [1, 3]. Вони починають інтенсивно псуватися та гнити вже через 24-48 годин після вивантаження, виділяючи у повітря стійкий неприємний запах, приваблюючи шкідників і вимиваючи висококонцентровані органічні інфільтрати в ґрунт [1, 3].

1.2. Сучасні підходи до переробки (утилізації) побічних продуктів пивоварного виробництва

Історично склалося, що найпоширенішим способом утилізації багатотоннажних відходів пивоваріння є їх пряме використання у тваринництві [2]. Понад 70% усього обсягу пивної дробини у світі спрямовується на годівлю сільськогосподарських тварин [2]. Цей підхід зумовлений високою поживною цінністю відходу, який містить значну кількість сирого протеїну, жирів та клітковини, які не деградують у рубці жуйних тварин [1].

Усереднені показники хімічного складу пивної дробини порівняно з іншими відходами бродильної індустрії наведено в таблиці 1.2 [3].

Таблиця 1.2. Склад сухих відходів бродильних виробництв (%)

Продукт	Вологість	Сирий протеїн	Клітковина	Зола	Сирий жир	Безазотисті екстрактивні речовини (БЕР)
Дробина пивна	11,5	20–22	15–17	3–5	5–7	35–45
Дробина спиртова	12,0	23–25	11–13	3–4	6–8	40–55
Барда спиртова	12,2	14–16	24–26	5–7	5–7	35–40

Поживна цінність 1 кг сирої дробини коливається в межах 0,17-0,23 кормових одиниць [3]. До складу пивної дробини входять амінокислоти (гістидин, лізин, лейцин, ізолейцин, метіонін, валін, гліцин, треонін, серії, аланін, аргінін, фенілаланін, тирозин) та мінерали (фосфор, калій, кальцій та магній) [3, 5]. Вона має високу засвоюваність; встановлено, що згодовування сирої дробини підвищує приріст при відгодівлі свиней і великої рогатої худоби.

Проте використання дробини в сирому вигляді має критичні технологічні обмеження: через велику кількість води її неможливо зберігати тривалий час і транспортувати на значні відстані, оскільки логістичні витрати на перевезення «води» нівелюють економічну вигоду від дешевого корму. Більше того, у чистому вигляді сира маса дуже швидко закисає [3].

Для вирішення проблеми короткого терміну зберігання на сучасних підприємствах застосовують технології консервування або сушіння [3]. Сушіння дозволяє знизити вологість маси до 10-11,5%, концентруючи поживні речовини. Отриманий продукт (суха пивна дробина) є стабільним під час зберігання, зручним для транспортування та може реалізовуватися як самостійний комбікорм або компонент складних кормових сумішей. В Україні якість та технічні умови виробництва цього продукту регламентуються національним стандартом ДСТУ 7345:2021 «Дробина пивоваріння. Технічні умови» [3].

Щодо інших видів побічних продуктів:

- надлишкові пивні дріжджі (BSY) є концентратом білка та вітамінів групи B [5]. В Україні вимоги до них закріплені у ДСТУ 7344:2022 «Дріжджі пивні. Технічні умови» [4]. Проте їх утилізація у тваринництві ускладнена гіркотою, яку вони сорбують із хмелю, а також необхідністю автолізу чи температурної інактивації живих клітин [2, 5];
- хмелева дробина (гарячий брук) має вкрай низьку поживність (0,08 кормової одиниці на 1 кг) і швидко псується, що робить її утилізацію на полях неефективною [3].

Ринкова вартість вологої дробини у світі коливається в межах €35-50 за тону [5], що є порівняно низьким фінансовим показником і спонукає підприємства шукати більш технологічні шляхи її переробки.

1.3. Перспективні напрями та шляхи використання вторинних сировинних ресурсів пивоварного виробництва

В умовах переходу світової економіки до моделі циркулярної економіки та концепції безвідходних технологій наукові дослідження спрямовані на відхід від низькотехнологічного спалювання чи простого згодовування відходів худобі [1, 2, 5]. Сучасна система управління відходами на підприємстві повинна не лише мінімізувати екологічні ризики, а й максимізувати додану вартість та знижувати викиди CO_2 [2, 4].

Серед найбільш перспективних високотехнологічних напрямків утилізації ВСР пивоваріння виділяють такі:

- ✓ *екстракція біологічно активних речовин (БАР)*: наявність цінних білків (гордеїнів), фенольних сполук, лігніну та арабіноксиланів дозволяє розглядати дробину як сировину для вилучення антиоксидантів, функціональних харчових волокон та гідролізатів [1, 5];
- ✓ *збагачення продуктів харчування*: суху очищену пивну дробину інтегрують до рецептур хлібобулочних виробів, кондитерської продукції та дієтичних снеків для підвищення вмісту протеїну та клітковини [5];
- ✓ *біоконверсія та біотехнологічний синтез*: використання щільних відходів пивоваріння як субстратів для культивування вищих грибів, ферментативного синтезу промислових ензимів, органічних кислот та біорозкладних полімерів [1, 2];

- ✓ *анаеробне зброджування з отриманням біогазу (біоенергетика)*: це один із найефективніших та екологічно виправданих шляхів утилізації концентрованих органічних відходів пивоваріння [2, 4].

Суміш пивної дробини, залишкових дріжджів, хмелевого осаду та висококонцентрованих дріжджових стоків є ідеальним комплексним субстратом для метанового бродіння. Анаеробна переробка дозволяє одночасно досягти трьох цілей:

- 1) повністю дезінфікувати та стабілізувати небезпечні органічні відходи, усунувши ризики їхнього гниття та утворення запахів [2];
- 2) згенерувати значні обсяги біогазу (метану), який спалюється у когенераційних установках для отримання власної теплової та електричної енергії, покриваючи внутрішні потреби заводу та знижуючи собівартість продукції [4];
- 3) отримати високоякісний екологічно чистий біодобрило (дигестат), очищене від патогенів, яке може безпечно вноситися на сільськогосподарські угіддя [2].

Таким чином, обґрунтування та розрахунок технологічної лінії біогазової установки та систем попереднього очищення і розділення дріжджових стоків є ключовим інноваційним рішенням для модернізації сучасного пивоварного підприємства на засадах екологічної безпеки та ресурсозбереження.

РОЗДІЛ 2. МЕТОДИКА ТА ХАРАКТЕРИСТИКА ОБ'ЄКТУ ДОСЛІДЖЕНЬ

2.1. Загальні відомості про об'єкт дослідження

Об'єктом дослідження у даній кваліфікаційній роботі обрано сучасне вітчизняне підприємство малої потужності (крафтову пивоварню) – ТОВ «МОВА БРЕВІНГ КО» (торгова марка MOVA Brewing Co.), яка розташована у місті Дніпро. Підприємство є яскравим представником нової генерації українського крафтового пивоваріння, що поєднує в собі класичні світові традиції із сучасними інноваційними інженерно-технологічними рішеннями (рис. 2.1).

Історія бренду MOVA розпочалася у 2017 році як формат контрактного пивоваріння, після чого підприємство здійснило масштабний запуск власного інноваційного заводу та мультифункціонального простору «Півний Простір» площею понад 1160 м². Філософія підприємства базується на використанні виключно високоякісної натуральної сировини (добірному солоду, хмелю, спеціальних штамів пивоварних дріжджів та підготовленої води), відмові від штучних стабілізаторів та консервантів, а також на впровадженні оригінальних авторських рецептур. Асортиментна лінійка продукції охоплює як традиційні європейські та американські сорти (*Lager, Pilsner, Stout, Porter*), так і експериментальні серії пива з додаванням натуральних локальних компонентів.

Відповідно до техніко-економічного завдання та цілей даного дослідження, номінальна проєктна потужність виробничої лінії пивоварні

становить 100 тон готової продукції на рік (що еквівалентно 10 000 декалітрів або 100 000 літрів напою на рік). Такий масштаб виробництва дозволяє віднести об'єкт до категорії мікро- чи міні-броварень, що є найбільш динамічним і водночас екологічно вразливим сегментом галузі, оскільки малі підприємства часто не мають повноцінних локальних споруд для утилізації концентрованих побічних продуктів.

Технологічний комплекс пивоварні оснащений високоефективним устаткуванням провідних світових брендів, адаптованим під умови компактного міського виробництва. Високий рівень механізації та автоматизації процесів забезпечує стабільні якісні показники пива, проте специфіка крафтового варіння (часта зміна сортів, підвищена норма задачі хмелю для ІРА, щільні засипи солоду для стаутів) призводить до утворення відходів із високим і нестабільним питомим забрудненням.

Розташування пивоварні MOVA Brewing Co. в межах урбанізованої території міста Дніпро накладає жорсткі обмеження на скидання промислових стоків у міську каналізаційну мережу та вимагає суворого контролю за утилізацією щільних залишків. Беручи за основу затверджену потужність у 100 тон/рік та усереднені галузеві коефіцієнти питомого виходу побічних продуктів, у таблиці 2.1 наведено розрахунковий баланс річного накопичення основних видів органічних відходів для досліджуваного об'єкта.

Наведені кількісні та якісні характеристики показують, що навіть за відносно невеликих річних обсягів виробництва (100 тон), сумарна маса концентрованої органіки, яка потребує щоденного чи щотижневого виведення з цехів, сягає понад 25 тон на рік щільних залишків та десятків кубічних метрів забрудненої рідкої фази. Пряме скидання таких дріжджових та хмелевих концентратів у міську систему водовідведення Дніпра є неприпустимим через критичне перевищення лімітів за біологічним (БСК) та хімічним (ХСК) споживанням кисню.

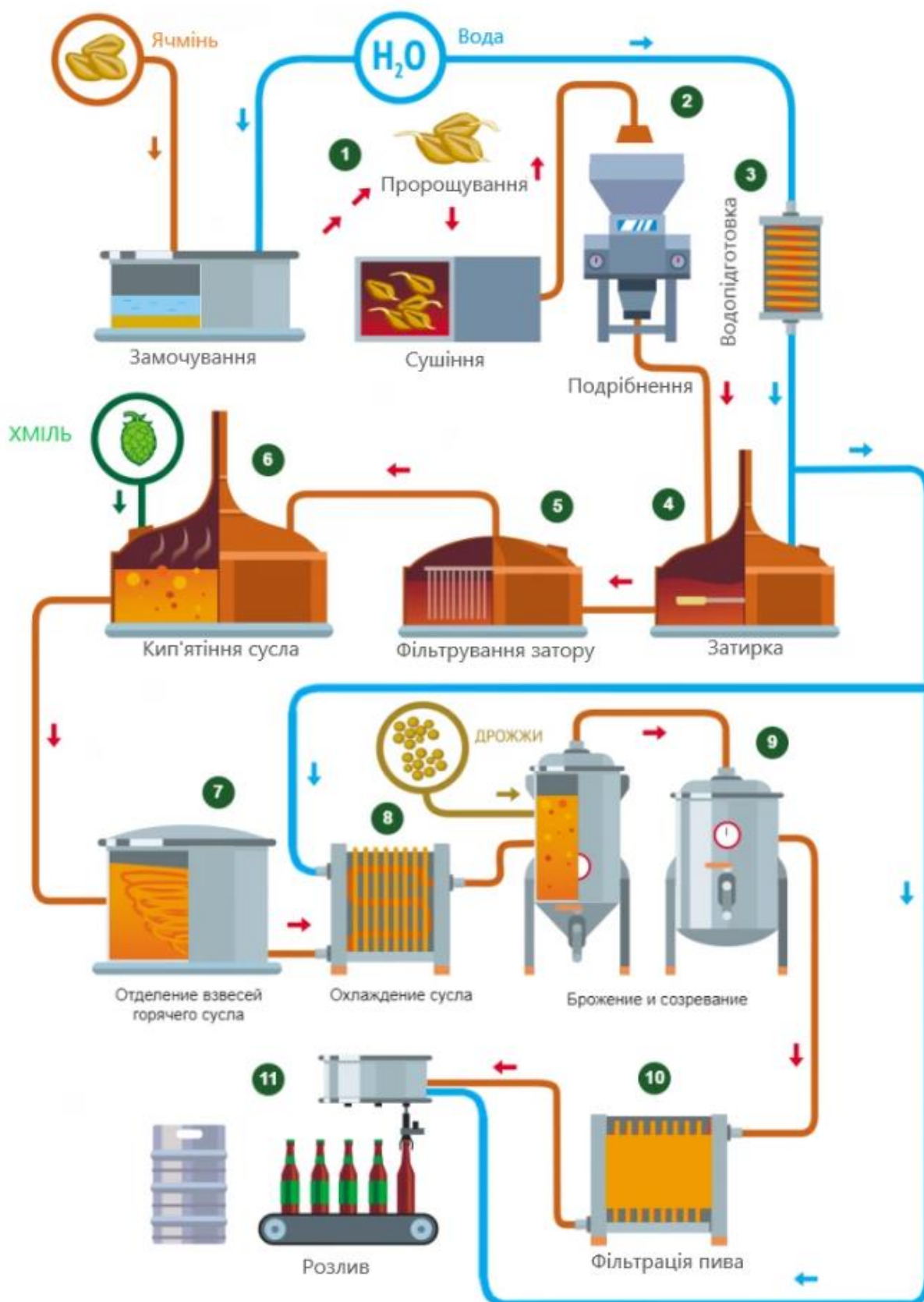


Рисунок 2.1. Технологічна схема роботи крафтової пивоварні
(рисунок з мережі Інтернет)

Таблиця 2.1. Оціночний річний баланс утворення вторинних сировинних ресурсів на пивоварні MOVA Brewing Co. (при потужності 100 т/рік)

Найменування відходу / побічного продукту	Питома норма утворення (на 100 л пива)	Річний обсяг накопичення, кг	Фізичний стан та вологість, %
Пивна дробина (волога)	20,0 – 22,0 кг	20 000 – 22 000	Тверда паста (76–78%)
Залишкові пивні дріжджі (рідкі)	1,5 – 2,6 кг	1 500 – 2 600	Суспензія (85–88%)
Хмелевий осад і гарячий брук (trub)	1,4 кг	1 400	В'язкий осад (80–85%)
Висококонцентровані дріжджові стоки	залежно від миття	~ 45 000 – 60 000	Рідкий (ХСК до 8000 мг/л)

Таким чином, вибір пивоварні MOVA Brewing Co. як об'єкта дослідження є повністю обґрунтованим з інженерно-екологічної точки зору. Опрацювання раціональної локальної технології, яка дозволить ефективно розділяти дріжджові стоки, зневоднювати щільну біомасу та піддавати її анаеробній біоконверсії (метаноутворенню) в умовах лімітованих міських площ, має високу практичну значущість для розвитку екологічно безпечного крафтового бізнесу в Україні.

2.2. Загальні методичні підходи до визначення характеристик вторинних сировинних ресурсів пивоварного підприємства

Для обґрунтування технології утилізації та повторного використання вторинних сировинних ресурсів (ВСР) пивоварного виробництва, зокрема на прикладі крафтової пивоварні MOVA Brewing Co., першочерговим завданням є детальне інженерно-екологічне та фізико-хімічне оцінювання властивостей утворюваних відходів. Надійна атестація матеріальних потоків та ефлюентів пивоварні базується на застосуванні комплексу стандартизованих лабораторних методів дослідження, які дозволяють кількісно охарактеризувати субстрати як для процесів механічного розділення, так і для наступного анаеробного метанового зброджування [3, 4].

Збирання та підготовка аналізованих зразків здійснюється відповідно до базових вимог регламентів ДСТУ ISO 5667 (для рідких промислових стоків) та ДСТУ ISO 6497 (для щільних кормових та зернових відходів). Оскільки крафтове пивоваріння відрізняється високою циклічністю і мінливістю фізико-хімічного складу напівпродуктів (через варіння різних за щільністю та рецептурою сортів пива), відбір середньодобових та точкових проб проводиться безпосередньо з технологічних ліній (фільтр-чану, гідроциклону, дріжджових танків та збірників стічних вод) з обов'язковим фіксуванням температурних та об'ємних параметрів.

Гравіметричний (ваговий) аналіз є первинним інструментом для оцінки вологомісткості та сухого залишку відходів (пивної дробини, хмелевого осаду та залишкової дріжджової суспензії). Масова частка води визначає технологічні підходи до транспортування, інтенсивність мікробіологічного псування, а також необхідність гідравлічного розбавлення при подачі в анаеробний біореактор згідно з вимогами ДСТУ ISO 6496:2005. Метод

базується на видаленні вільної та зв'язаної вологи шляхом висушування наважки субстрату за температури $(105 \pm 2)^\circ\text{C}$ до досягнення постійної маси.

Для визначення масової частки вологи (W , %) використовують аналітичні ваги з похибкою вимірювання не більше 0,0001 г. Обчислення здійснюють за формулою:

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

де m_0 – маса порожньої сухої ємності (бюкса або тигля), г; m_1 – маса ємності з наважкою вологого вихідного субстрату, г; m_2 – маса ємності з наважкою субстрату після висушування при 105°C до постійної ваги, г.

Масову частку загальної сухої речовини (TS , %) визначають як доповнення до вологості за формулою:

$$TS = 100 - W, \quad (2.2)$$

Вміст органічної речовини (летких твердих речовин, VS , % від маси сухого залишку) є ключовим біоенергетичним параметром, оскільки він репрезентує частку вуглецьмісткого субстрату, що підлягає біодеградації метаногенною мікрофлорою згідно з ДСТУ ISO 5984:2004. Визначення виконують шляхом термічного озолення сухої наважки субстрату в порцелянових тиглях у лабораторній муфельній печі за температури $(550 \pm 20)^\circ\text{C}$ протягом 3-4 годин до повного вигорання вуглецю та отримання чистої сірої золи. Розрахунок летких речовин (VS , %) проводять за формулою:

$$VS = ((m_2 - m_3) / (m_2 - m_0)) \cdot 100, \quad (2.3)$$

де m_0 – маса порожнього прожареного тигля, г; m_2 – маса тигля з сухою речовиною субстрату (після висушування при 105°C), г; m_3 – маса тигля з залишком неорганічної золи після прожарювання при 550°C , г.

Активна реакція середовища (pH) безпосередньо впливає на життєдіяльність ацетогенних та метаногенних мікроорганізмів, а її контроль дозволяє попередити закислення метантенка. Визначення pH для рідких стоків та водних витяжок щільних відходів (у співвідношенні 1:10 з дистильованою водою) проводять потенціометричним методом згідно з ДСТУ ISO 10523:2014 за допомогою цифрового лабораторного pH -метра з комбінованим електродом, попередньо каліброваного за стандартними буферними розчинами з pH 4,01; 6,86 та 9,18.

Для рідкої фази (висококонцентрованих промислових стоків, фугату та загальних стічних вод пивоварні) визначальними екологічними критеріями є показники хімічного споживання кисню (ХСК) та біохімічного споживання кисню (БСК), які відображають сумарну концентрацію розчинених та суспендованих органічних забруднювачів [1, 2].

Дихроматний метод визначення ХСК ґрунтується на повному рідкофазному руйнуванні й окисненні органічних сполук дихроматом калію ($K_2Cr_2O_7$) у середовищі концентрованої сульфатної кислоти за наявності сульфату срібла (Ag_2SO_4) як каталізатора та сульфату ртуті ($HgSO_4$) для маскування заважаючого впливу хлорид-іонів згідно з ДСТУ ISO 6060:2003. Аналіз здійснюють у круглодонних колбах із зворотним холодильником шляхом кип'ятіння реакційної суміші протягом 2 годин. Надлишок невідновленого дихромату калію титрують робочим розчином солі Мора $((NH_4)_2Fe(SO_4)_2 \cdot 6H_2O)$ у присутності редокс-індикатора N-фенілантранілової кислоти до переходу забарвлення від темно-фіолетового до світло-зеленого. Величина ХСК ($mg\ O_2/dm^3$) розраховується за формулою:

$$ХСК = ((V_1 - V_2) \cdot K \cdot T \cdot 1000) / V, \quad (2.4)$$

де V_1 – об'єм розчину солі Мора з концентрацією 0,2 моль/ dm^3 , витрачений на титрування контрольної (холостої) проби з дистильованою водою, cm^3 ; V_2 – об'єм розчину солі Мора з концентрацією 0,2 моль/ dm^3 , витрачений на титрування досліджуваного зразка стічної води, cm^3 ; K –

коефіцієнт поправки для встановлення точної титрованої концентрації розчину солі Мора; T – масовий еквівалент кисню, що відповідає 1 см³ розчину дихромату калію концентрацією точно 0,2 моль/дм³ (приймається $T = 1,6$ мг); V – об'єм вихідної проби стічної води, взятий для лабораторного аналізу, см³.

Біохімічне споживання кисню за 5 діб (БСК₅, мг О₂/дм³) відображає кількість розчиненого кисню, яка витрачається аеробними мікроорганізмами на біохімічне окиснення та стабілізацію легкорозкладних органічних речовин у воді протягом 5 діб в аеробних умовах за температури (20±1)°С без доступу світла відповідно до ДСТУ 1899-1:2003. Визначення концентрації розчиненого кисню до та після інкубації виконують електрохімічним (амперометричним) методом за допомогою киснеміра-оксиметра зі спеціалізованим занурювальним мембранним гальванічним датчиком.

Вміст завислих речовин (грубодисперсних домішок, мг/дм³) визначає ефективність механічного освітлення стоків та розраховується гравіметрично після фільтрування відомого об'єму проби ($V_{\text{вод}}$, см³) крізь стандартний скловолокнистий фільтр типу та висушування осаду при 105°С згідно з ДСТУ 872:2005.

Мікробіологічний контроль відіграє вирішальну роль при оцінці стабільності дріжджових суспензій та контролі екологічного стану об'єкта. Визначення загальної кількості мезофільних аеробних та факультативно-анаеробних мікроорганізмів (загальне мікробне число, МЧ, КУО/мл) здійснюють методом глибинного посіву серійних десятикратних розведень проби у стерильні чашки Петрі. Підрахунок колоній проводять на чашках, що містять від 30 до 300 колоній. Вихідну концентрацію бактеріальних клітин (X , КУО/мл) коригують з урахуванням ступеня розведення за формулою:

$$X = a \cdot 10^n, \quad (2.5)$$

де a – середня кількість колоній, що вирости на поживній пластині в чашці Петрі; n – порядковий номер десятикратного розведення вихідного зразка (наприклад, для розведення 1:100, $n = 2$).

Для систематизації та візуалізації експериментальної програми у таблиці 2.2 наведено детальну зведену характеристику лабораторно-аналітичних методів, діапазонів вимірювання та приладового забезпечення дослідження.

Таблиця 2.2. Комплексна характеристика методів дослідження вторинних матеріальних потоків пивоварні

Аналізований показник	Метод дослідження	Діапазон / одиниці виміру	Лабораторне обладнання
Масова частка вологи / сухого залишку	Гравіметричний (термічне висушування при 105°C за ДСТУ ISO 6496:2005)	0,1 – 99,9%	Сушильна шафа СЕШ-3М, ваги аналітичні Radwag AS 220.R2
Вміст органічної речовини (<i>VS</i>)	Гравіметричний (муфельне прожарювання при 550°C за ДСТУ ISO 5984:2004)	1,0 – 99,5% від TS	Муфельна піч SNOL 7.2/1100, тиглі порцелянові, ексікатор
Активна реакція середовища (<i>pH</i>)	Потенціометричний (вимірювання ЕРС електродної системи за ДСТУ ISO 10523:2014)	0,00 – 14,00 од. <i>pH</i>	Лабораторний рН-метр I-160МІ з комбінованим електродом ЕСП-01
Хімічне споживання кисню (<i>XCK</i>)	Біхроматний рефлюкс-метод із титруванням сіллю Мора за ДСТУ ISO 6060:2003	15 – 80 000 мг O ₂ /дм ³	Колби круглодонні, зворотні холодильники ХШ-1-400, бюретки
Біохімічне споживання кисню (<i>БСК₅</i>)	Амперометричний метод після інкубації при 20°C за ДСТУ 1899-1:2003	0,5 – 40 000 мг O ₂ /дм ³	Термостат ТСО-1/80 СПУ, оксиметр солемір Milwaukee MW600
Вміст завислих речовин	Гравіметричний (фільтрування крізь скловолокно за ДСТУ 872:2005)	1,0 – 15 000 мг/дм ³	Вакуумна фільтраційна установка ВФУ-1, диски фільтрувальні
Загальне мікробне число (<i>МЧ</i>)	Мікробіологічний (глибинний посів на агар МПА, інкубація при 37°C)	10 ⁰ – 10 ⁹ КУО/мл	Термостат біологічний ТС-80М-2, чашки Петрі, автоклав ВК-75

Таким чином, сформований комплекс взаємопов'язаних аналітичних методів дослідження забезпечує отримання всебічної кількісної та якісної оцінки фізико-хімічних параметрів вторинних матеріальних потоків пивоварні MOVA Brewing Co. Одержані за наведеними методиками експериментальні дані складають фундаментальну вихідну базу для проведення інженерно-технологічних розрахунків обладнання рециклінгу, очищення ефлюентів та систем анаеробної біоконверсії, які представлені у третьому розділі роботи.

2.3. Методика технологічних розрахунків утилізації та повторного використання відходів пивоварного виробництва

Важливим етапом проектування комплексної інженерно-екологічної системи рециклінгу вторинних сировинних ресурсів (ВСР) для умов крафтової пивоварні MOVA Brewing Co. є розробка, систематизація та детальне обґрунтування математичних моделей та методик технологічних розрахунків. Дані інженерні методики складають фундаментальну теоретичну базу для здійснення переходу від вихідних техніко-економічних показників пивоварні (обсягів річного виробництва) до визначення точних конструктивних, геометричних, гідравлічних та енергетичних параметрів проектного очисного й біоенергетичного обладнання.

Технологічний розрахунок утилізаційного комплексу пивоварні виконується у три послідовні взаємопов'язані етапи: математичне моделювання матеріального балансу потоків побічних продуктів; розрахунок гідравлічних та кінетичних параметрів систем механічного розділення й ультрафільтрації дріжджових ефлюентів; а також термодинамічний та біокінетичний розрахунок реакторів анаеробного метанового зброджування (метантенків) та когенераційних енергетичних модулів [3, 5].

Методика розрахунку матеріального балансу вторинних матеріальних потоків пивоварні. Вихідною інженерною величиною для побудови

матеріального балансу системи є номінальна річна продуктивність крафтової пивоварні за готовим товарним продуктом ($M_{пива} = 100$ тон/рік). Для забезпечення точності гідравлічних обчислень зазначена масова величина перераховується в об'ємні одиниці виміру за формулою:

$$V_{пива} = M_{пива} / \rho_{пива} , \quad (2.6)$$

де $V_{пива}$ – річний об'єм виробленого готового пива, м³/рік; $\rho_{пива}$ – середня густина готового пива при температурі 20°C, кг/м³ (для стандартних світлих та темних крафтових сортів приймається у межах $\rho_{пива} \approx 1015$ кг/м³).

Для узгодження з нормативно-технічними специфікаціями пивоварного обладнання отриманий річний об'єм переводять у загальноприйнятій галузевій одиниці – гектолітри (гл), де $1 \text{ м}^3 = 10 \text{ гл}$. Розрахунок загальної річної маси утворення конкретного виду вторинного сировинного ресурсу (вологої пивної дробини, хмелевого осаду чи залішкових дріжджів) проводиться на основі експериментально підтверджених питомих коефіцієнтів виходу за формулою:

$$M_i = (V_{пива} \cdot 10) \cdot q_i \cdot 10^{-3} , \quad (2.7)$$

де M_i – річна маса утворення i -го виду відходу або побічного продукту, тон/рік; q_i – питома експериментальна норма утворення i -го відходу на одиницю об'єму готової продукції, кг/гл.

Враховуючи періодичний характер роботи крафтового виробництва (циклічність варіння сусла та вивантаження ЦКТ), розрахунок накопичувальних бункерів та усереднювачів виконується за середньодобовими та максимальними годинними витратами. Середньодобова маса накопичення побічних продуктів визначається за формулою:

$$M^{доб}_i = (M_i \cdot 1000) / N_{rob} , \quad (2.8)$$

де $M^{доб}_i$ – середньодобова маса утворення i -го відходу, кг/добу; N_{rob} – кількість робочих днів пивоварні на рік, у які безпосередньо здійснюються процеси варіння, зброджування та миття ємностей (для умов MOVA Brewing Co. приймається $N_{rob} = 250$ днів/рік).

Методика розрахунку процесів механічного розділення та фільтраційного очищення дріжджових стоків. Промислові дріжджові ефлюенти та перші промивні води від миття циліндро-конічних танків (ЦКТ) характеризуються екстремально високим вмістом дисперсної біомаси (завислих речовин). Локальна схема очищення передбачає їх попереднє розділення у відцентрових сепараторах (або декантерних центрифугах) з метою отримання прозорого фугату (рідкої фази) та щільного зневодненого дріжджового кеку. Матеріальний баланс безперервного або періодичного процесу механічного розділення описується системою класичних рівнянь збереження маси потоків та забруднювачів:

$$Q_{сток} = Q_{фуг} + Q_{кек} ;$$

$$Q_{сток} \cdot C_{сток} = Q_{фуг} \cdot C_{фуг} + Q_{кек} \cdot C_{кек} , \quad (2.9)$$

де $Q_{сток}$, $Q_{фуг}$, $Q_{кек}$ – об'ємні добові витрати вихідного висококонцентрованого стоку, очищеного рідкого фугату та виділеного зневодненого кеку відповідно, м³/добу; $C_{сток}$, $C_{фуг}$, $C_{кек}$ – масова концентрація завислих твердих речовин у відповідних потоках матеріального балансу, кг/м³.

Ефективність сепарування (коефіцієнт затримання дисперсної фази, E , %) визначає рівень зниження навантаження завислих речовин на наступні стадії очищення і розраховується за формулою:

$$E = [1 - (C_{фуг} / C_{сток})] \cdot 100\% , \quad (2.10)$$

Для фінішного доочищення рідкого фугату від залишків мікроколоній та дріжджових лізатів передбачено використання пористих дискових фільтрів. Необхідна робоча площа поверхні фільтрації (F , м²) для забезпечення заданої гідравлічної продуктивності споруди розраховується за формулою:

$$F = Q_{\text{фуг}}^{\text{доб}} / (v_f \cdot t_f), \quad (2.11)$$

де $Q_{\text{фуг}}^{\text{доб}}$ – розрахунковий добовий об'єм фугату, що надходить на ультрафільтрацію, м³/добу; v_f – питома швидкість фільтрації (потік) крізь обрану перегородку при заданому робочому тиску, м³/(м²·год); t_f – чиста тривалість експлуатації фільтраційного модуля протягом робочої зміни з урахуванням часу на автоматичну регенерацію, год/добу.

Методика розрахунку біоенергетичних параметрів анаеробного зброджування та генерації біогазу. Щільні побічні продукти (волога пивна дробина, хмелевий осад) разом із концентрованим згущеним дріжджовим кеком надходять у змішувач-гомогенізатор, де формується єдиний комплексний субстрат для метаноутворення. Розрахунок сумарного добового надходження сухої речовини ($S_{\text{доб}}$, кг TS/добу) та абсолютної маси летких (органічних) твердих речовин ($VS_{\text{доб}}$, кг VS/добу) у метантенк здійснюється методом адитивного зведення компонентів.

Розрахунковий геометричний корисний об'єм анаеробного біореактора (V_p , м³) визначається двома паралельними методами: за критерієм необхідного гідравлічного часу утримання біомаси та за гранично допустимим об'ємним органічним навантаженням [2]:

$$V_p(HRT) = Q_{\text{суб}} \cdot HRT, \quad (2.12)$$

де $Q_{\text{суб}}$ – сумарна добова витрата гомогенізованої пульпи субстрату, $\text{м}^3/\text{добу}$; HRT – гідравлічний час утримання середовища в метантенку, діб (при мезофільному режимі 37°C зазвичай $HRT = 20\text{-}25$ діб).

$$V_p(OLR) = VS_{\text{доб}} / OLR, \quad (2.13)$$

де OLR – швидкість об'ємного органічного навантаження на біореактор, $\text{кг VS}/(\text{м}^3 \cdot \text{добу})$ (для мезофільних реакторів норма становить $OLR = 2,5\text{-}3,5 \text{ кг VS}/(\text{м}^3 \cdot \text{добу})$). Для фінального проектування конструкції метантенка приймається найбільше кубічне значення об'єму.

Прогнозований добовий об'єм генерації сирого біогазу ($V_{\text{бг}}$, $\text{м}^3/\text{добу}$) розраховується на основі питомого виходу газу з органічної сухої речовини за формулою:

$$V_{\text{бг}} = VS_{\text{доб}} \cdot Y_{\text{бг}}, \quad (2.14)$$

де $Y_{\text{бг}}$ – питомий вихід біогазу з 1 кг завантажених летких речовин суміші відходів пивоварні, визначений відповідно до вимог стандарту 4630, $\text{м}^3/\text{кг VS}$.

Енергетичний потенціал утилізації біогазу оцінюється за номінальною електричною потужністю інтегрованого когенераційного модуля ($P_{\text{ел}}$, кВт), що здійснює комбіноване виробництво теплової та електричної енергії за формулою:

$$P_{\text{ел}} = (V_{\text{бг}} \cdot Q_n \cdot \eta_{\text{ел}}) / (24 \cdot 3,6), \quad (2.15)$$

де Q_n – нижча теплота згоряння отриманого біогазу (при середній концентрації метану CH_4 на рівні 60% $Q_n \approx 21,5 \text{ МДж}/\text{м}^3$); $\eta_{\text{ел}}$ – електричний коефіцієнт корисної дії когенераційної установки (приймається у межах 0,38); 24 – години роботи; 3,6 – коефіцієнт переведення теплової енергії з мегаджоулів у кіловат-години.

Для наочності та узагальнення структури інженерного проектування у таблиці 2.3 наведено зведену матрицю розрахункових параметрів та математичних моделей, які будуть реалізовані при виконанні обчислень у технологічному розділі.

Таблиця 2.3. Взаємозв'язок вхідних даних та розрахункових інженерних моделей утилізаційного комплексу пивоварні

№ з/п	Проектований технологічний параметр споруди	Одиниці виміру	Визначальний фактор / основне математичне рівняння та вхідні дані
1	Річний об'єм готової продукції ($V_{\text{пива}}$)	м ³ /рік, гл/рік	Розрахунок об'єму на основі заданої маси виробництва (100 т/рік)
2	Добова маса накопичення відходів ($M_{\text{доб}_i}$)	кг/добу	Питомий вихід відходів на 1 гл готового продукту та тривалість виробничого року пивоварні (250 днів).
3	Робоча площа поверхні фільтрації (F)	м ²	Гідравлічний об'єм дріжджового фугату та питома швидкість мембранного потоку
4	Добова маса летких речовин субстрату ($VS_{\text{доб}}$)	кг VS/добу	Сумування часток сухої речовини (TS) та органічної фази (VS) всіх щільних відходів
5	Корисний геометричний об'єм метантенка (V_p)	м ³	Максимальне значення з двох моделей: за гідравлічним часом утримання ($HRT = 20\text{-}25$ діб) та за лімітом органічного навантаження (OLR).
6	Добовий об'єм утворення біогазу ($V_{\text{бг}}$)	м ³ /добу	Питомий біогазовий потенціал зброджуваної суміші
7	Електрична потужність когенератора ($P_{\text{ел}}$)	кВт	Теплотворна здатність метану (21,5 МДж/м ³ при 60% CH ₄) та електричний ККД двигуна внутрішнього згоряння (38%).

РОЗДІЛ 3. ТЕХНОЛОГІЧНІ РОЗРАХУНКИ ПРОЦЕСУ УТИЛІЗАЦІЇ ВІДХОДІВ ПИВОВАРНОГО ПІДПРИЄМСТВА

3.1. Обґрунтування технологічної схеми очищення дріжджових стоків пивоваріння

Специфіка крафтового пивоварного виробництва на базі пивоварні MOVA Brewing Co. у місті Дніпро з проектною потужністю 100 тон готової продукції на рік зумовлює періодичність та високу нерівномірність утворення рідких відходів та концентрованих стічних вод. Найбільш проблемною та екологічно небезпечною фракцією рідких відходів підприємства є дріжджові стоки. Вони формуються внаслідок знімання залишкових пивних дріжджів після завершення головного бродіння та доброджування, декантації танків, а також під час виконання перших промивних операцій циліндро-конічних танків (ЦКТ), ємностей дозрівання та шлангових комунікацій.

Зазначені технологічні потоки характеризуються екстремальним рівнем органічного забруднення: концентрація завислих речовин (переважно за рахунок суспендованої біомаси залишкових дріжджів) коливається в межах 10000-15000 мг/дм³, показник хімічного споживання кисню (ХСК) для чистих дріжджових концентратів може сягати 80000-100000 мг О₂/дм³, а для перших промивних вод становить від 4000 до 8000 мг О₂/дм³. Пряме скидання таких висококонцентрованих субстратів у міську каналізаційну мережу Дніпра суворо заборонено чинними правилами приймання стічних вод, оскільки це призводить до перевантаження біологічних очисних споруд міста,

замулювання трубопроводів та закислення колекторів через активне бродіння залишкових цукрів та автоліз дріжджів.

З огляду на обмежені виробничі площі крафтової пивоварні MOVA Brewing Co., локальна очисна система повинна бути компактною, високоавтоматизованою та інтегрованою з загальною концепцією безвідходного виробництва. Спираючись на аналіз сучасних науково-технічних рішень та матеріали детальних досліджень у галузі екологічної безпеки броварень, для досліджуваного об'єкта обґрунтовано комбіновану інноваційну технологічну схему локального очищення, яка поєднує процеси механічного розділення фаз та інтенсифікуючу кавітаційну обробку рідкого ефлюенту перед його спрямуванням на анаеробну біоконверсію.

Запропонована та обґрунтована технологічна схема локального очищення дріжджових стоків складається з чотирьох основних послідовних модулів (рис. 3.1):

1. Модуль акумуляції, гомогенізації та первинного кондиціонування. Рідкі дріжджові концентрати від ЦКТ та перші промивні висококонцентровані води самопливом надходять до підземного локального збирача-усереднювача. Ємність оснащується лопатевим міксером низької частоти обертання для запобігання седиментації дріжджових клітин та забезпечення однорідності складу суспензії за гідравлічними та хімічними параметрами. Також передбачено контур дозування розчину гідроксиду натрію (NaOH) для стабілізації рівня pH у межах 6,8-7,2, що нівелює закислення середовища внаслідок залишкового бродіння вуглеводів.

2. Модуль механічного декантування та відцентрового розділення. З усереднювача гомогенізована суспензія гвинтовим насосом подається на блок механічного зневоднення. Для умов малої потужності (100 т пива/рік) обґрунтовано вибір компактного герметичного тарілчастого відцентрового сепаратора тверде фази. У полі відцентрових сил відбувається високоефективне розділення потоку на два продукти:

- згущений дріжджовий кек (щільна фаза) з вологістю 80-85%, який містить основну масу сирого протеїну. Цей концентрат безпосередньо шнековим транспортером спрямовується до бункера-змішувача біогазової установки, де виступає високопродуктивним ко-субстратом анаеробного зброджування разом із пивною дробиною;
- освітлений рідкий дріжджовий фугат (рідка фаза), у якому концентрація завислих речовин знижується на 92-95%, проте рівень розчиненого ХСК залишається високим (в межах 2500-4000 мг $O_2/дм^3$) через наявність розчинених екстрактивних речовин, цукрів та продуктів часткового лізису клітин.

3. Модуль гідродинамічної / акустичної кавітаційної обробки. Виділений рідкий фугат спрямовується у блок інтенсифікації, що є ключовим інноваційним елементом схеми. Відповідно до наукових засад екомодернізації крафтових броварень, фугат піддається обробці в кавітаційному полі, що створюється спеціалізованим двотактним вібраційним електронасосом-кавітатором. При проходженні рідини крізь кавітаційні деки збурювача утворюються мікроскопічні кавітаційні бульбашки. При їхньому захлопуванні виникають екстремальні локальні мікросфекти: гідродинамічні удари, тиск до 100 МПа та локальні мікротемператури до 1000-1500 К. Цей процес забезпечує глибокий механічний та термічний лізис залишкових живих клітин дріжджів та супутньої мікрофлори; деструкцію високомолекулярних органічних сполук (білків, полісахаридів) та їх трансформацію у низькомолекулярні, легкозасвоювані форми (амінокислоти, жирні кислоти), що суттєво підвищує індекс біодеградації субстрату ($БСК_5/ХСК$); а також звукохімічне окиснення частини стійких забруднювачів за рахунок утворення вільних радикалів, що безпосередньо знижує вихідні показники ХСК фугату на 25-35%.

4. Модуль фінішної дискової ультрафільтрації та інтеграції. Активований та знезаражений кавітацією фугат проходить крізь блок автоматичних дискових або патронних мікрофільтрів для вловлювання випадкових механічних домішок і зважених пластівців лізату. Очищений,

гомогенізований рідкий потік із високим вмістом доступних поживних речовин слугує ідеальним рідким агентом для розбавлення щільної пивної дробини у гомогенізаторі біогазового комплексу. Це дозволяє повністю відмовитися від використання чистої водопровідної води для технологічного розрідження біогазового субстрату, забезпечуючи замкнений екологічний цикл водокористування підприємства.

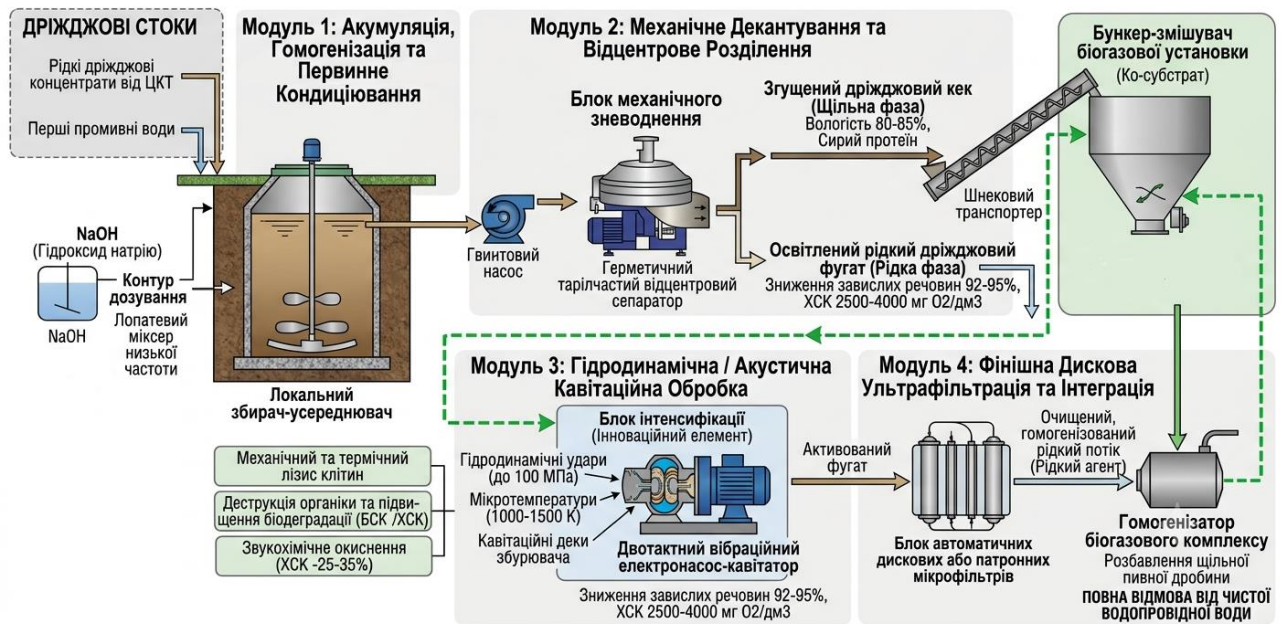


Рисунок 3.1. Технологічна схема локального очищення дріжджових стоків

Таким чином, запропонована комбінована технологічна схема (усереднення → центрифугування → кавітація → фільтрація) є повністю обґрунтованою для пивоварні MOVA Brewing Co. Вона дозволяє локалізувати найбільш забруднені потоки в межах цеху, виключити ризики штрафних санкцій за скидання концентрованої органіки у водоканал м. Дніпро, а також трансформувати екологічно небезпечні дріжджові відходи у підготовлену високоцінну сировину для локального енергетичного спалювання у метантенку.

3.2. Розрахунки роботи очисного обладнання при фільтрації та очистці дріжджових стоків

Практична реалізація та впровадження комбінованої технологічної схеми локального очищення дріжджових стоків крафтової пивоварні потребує виконання детальних інженерних розрахунків. Метою цього підрозділу є кількісне визначення матеріального балансу потоків відходів, розрахунок конструктивно-технологічних параметрів відцентрового сепаратора, пористого дискового фільтра та математичне моделювання кінетики руйнування органічних забруднень у полі акустичної / гідродинамічної кавітації.

Розрахунки виконуються на основі методичних підходів, обґрунтованих у підрозділі 2.3, та вихідної проектної потужності підприємства, що становить $M_{пива} = 100$ тон готової продукції на рік. Розрахунок добових матеріальних потоків та балансу відцентрового сепарування. Річний об'єм готової продукції з урахуванням середньої густини напою $\rho_{пива} = 1015$ кг/м³ становить:

$$V_{пива} = (100 \cdot 1000) / 1015 \approx 98,52 \text{ м}^3/\text{рік}$$

У перерахунку на загальноприйнятій галузевій гектолітрі річний обсяг становить 985,2 гл/рік.

Відповідно до річного балансу, наведеного у підрозділі 2.1, загальний обсяг утворення висококонцентрованих дріжджових стоків (включаючи перші промивні води) для пивоварні малої потужності 50 тон/рік. При тривалості виробничого року 250 днів середньодобова маса надходження дріжджових стоків на очищення становить:

$$M_{\text{стоків}}^{\text{доб}} = 50\,000 / 250 = 200 \text{ кг/добу}$$

Беручи усереднену густину дріжджових стоків крафтового виробництва на рівні $\rho_{\text{стоків}} = 1020 \text{ кг/м}^3$, розрахункова добова об'ємна витрата становить:

$$Q_{\text{стоків}} = 200 / 1020 \approx 0,196 \text{ м}^3/\text{добу} = 196,08 \text{ л/добу}$$

Вхідна концентрація завислих речовин (дріжджової біомаси) у вихідному стоці зафіксована на рівні $C_{\text{поч}} = 12,0 \text{ кг/м}^3$ (12000 мг/дм³). Ефективність затримання дисперсної фази в тарілчастому відцентровому сепараторі прийнята на рівні $E = 95\%$ (0,95 у долях одиниці).

Згідно з рівнянням ефективності, залишкова концентрація завислих речовин в освітленому дріжджовому фугаті становитиме:

$$C_{\text{фуг}} = C_{\text{поч}} \cdot (1 - E) = 12,0 \cdot (1 - 0,95) = 0,6 \text{ кг/м}^3 \text{ (600 мг/дм}^3\text{)}$$

Концентрація зваженої сухої речовини у виділеному щільному зневодненому дріжджовому кеці на виході зі шнекового затвора сепаратора досягає $C_{\text{кек}} = 150 \text{ кг/м}^3$ (що відповідає близько 15% вмісту сухих речовин).

Визначення добових об'ємних потоків кеку:

$$Q_{\text{кек}} = 0,19608 \cdot (12,0 - 0,6) / (150 - 0,6) = 0,19608 \cdot 11,4 / 149,4 \approx 0,01496 \text{ м}^3/\text{добу} = 14,96 \text{ л/добу}$$

Відповідно, добовий об'єм утворення рідкого освітленого дріжджового фугату дорівнює:

$$Q_{\text{фуг}} = 196,08 - 14,96 = 181,12 \text{ л/добу} = 0,18112 \text{ м}^3/\text{добу}$$

Розраховані параметри добового балансу відцентрового розділення ефлюентів пивоварні зведено у таблицю 3.1.

Таблиця 3.1. Матеріальний баланс процесу відцентрового сепарування дріжджових стоків

Назва технологічного потоку	Об'ємна витрата, л/добу	Концентрація завислих речовин, мг/дм ³	Абсолютна маса сухих речовин, кг/добу
Вихідний дріжджовий стік	196,08	12 000	2,353
Згущений дріжджовий кек (щільний)	14,96	150 000	2,244
Освітлений дріжджовий фугат (рідкий)	181,12	600	0,109

Розрахунок конструктивних параметрів дискового мікрофільтра. Освітлений дріжджовий фугат об'ємом 0,18112 м³/добу підлягає захисному фінішному фільтруванню перед кавітаційним блоком для стабілізації потоку. Розрахунок необхідної робочої площі поверхні фільтрації (F) проводиться з урахуванням об'єму стоків на крафтовому підприємстві, очищення добової порції фугату раціонально з періодичністю протягом $t_{\phi} = 2,0$ годин в кінці робочої зміни. Питома швидкість (потік) фільтрації крізь мікропористу полімерну дискову перегородку при робочу тиску 0,15 МПа становить $v_{\phi} = 0,15 \text{ м}^3/(\text{м}^2 \cdot \text{год})$.

Необхідна площа робочої поверхні фільтрації становить:

$$F = 0,18112 / (0,15 \cdot 2,0) = 0,18112 / 0,30 \approx 0,6037 \text{ м}^2$$

Враховуючи коефіцієнт запасу на поступове забивання пор ($K_z = 1,2$), проектна площа фільтрації повинна становити:

$$F_{\text{проект}} = 0,6037 \cdot 1,2 = 0,7244 \text{ м}^2$$

Для реалізації процесу обирається промисловий дисковий фільтраційний патрон із загальною корисною площею дисків не менше $0,75 \text{ м}^2$, що повністю перекриває потреби цеху.

Тривалість рециркуляційної обробки добової порції фугату в акустичному полі апарату-кавітатора становить $t = 2,0$ години. Визначимо ступінь зниження органічного забруднення (співвідношення розпаду органіки):

$$XCK_0 / XCK_t = e^{(k_{\text{зод}} \cdot t)} = e^{(0,432 \cdot 2,0)} = e^{(0,864)} \approx 2,373$$

Таким чином, залишковий відсоток органічних забруднень після кавітаційного лізису становитиме:

$$\omega = 100\% / 2,373 \approx 42,1\%$$

Абсолютне кінцеве значення показника ХСК активованого фугату перед його спрямуванням у змішувач біогазової лінії дорівнює:

$$XCK_{\text{фінал}} = XCK_0 / 2,373 = 4500 / 2,373 \approx 1896,3 \text{ мг } O_2/\text{дм}^3$$

Кавітаційна деструкція забезпечує зниження ХСК на 57,9% ($2603,7 \text{ мг } O_2/\text{дм}^3$). Органічні речовини, що залишилися в розчині, трансформуються з високомолекулярних полімерів у низькомолекулярні лізати, що істотно інтенсифікує першу (гідролітичну) стадію метаногенезу.

Вибір та енергетичні параметри очисного обладнання. На основі проведених матеріальних та кінетичних розрахунків сформовано специфікацію основного технологічного обладнання локальної очисної лінії дріжджових стоків для крафтової пивоварні (таблиця 3.2).

Таблиця 3.2. Специфікація та енергетичні характеристики очисного обладнання лінії

№ з/п	Найменування обладнання	Марка / Виробник	Технічні характеристики	Потужність електродвигуна, кВт
1	Локальний усереднювач-гомогенізатор	ТОВ «НВП «Екополімер»	Об'єм $V = 0,5 \text{ м}^3$, лопатева мішалка ($n = 45 \text{ об/хв}$)	0,37
2	Гвинтовий дозуючий насос	Netzsch (Німеччина)	Продуктивність $Q = 0,1\text{--}0,5 \text{ м}^3/\text{год}$, тиск до 0,4 МПа	0,55
3	Тарілчастий відцентровий сепаратор	Alfa Laval (Швеція)	Продуктивність по рідкій фазі до $0,5 \text{ м}^3/\text{год}$, автоматичне вивантаження кеку	1,50
4	Дисковий патронний мікрофільтр	Arkal (Ізраїль)	Площа поверхні фільтрації $F = 0,75 \text{ м}^2$, ступінь фільтрації 100 мкм	автоматичний
5	Акустичний віброкавітатор	Дослідне виробництво за патентом	Двотактний електромагнітний збурювач, частота 50 Гц, об'єм камери 10 дм^3	2,20
Всього		Енергетичний комплекс лінії		4,62

Сумарна встановлена потужність локального вузла очищення дріжджових стоків становить 4,62 кВт. З огляду на те, що сепаратор, фільтр та кавітаційний апарат працюють послідовно та експлуатуються сумарно не

більше 2 годин на добу, добове споживання електроенергії очисним комплексом є мінімальним і становить:

$$E_{доб} \approx P_{сер} \cdot t = 3,5 \text{ кВт} \cdot 2 \text{ год} = 7,0 \text{ кВт} \cdot \text{год/добу}$$

Це підтверджує високу енергетичну та екологічну ефективність розроблених інженерних рішень для умов крафтового бізнесу.

3.3. Обґрунтування технології очистки стічних вод

Окрім концентрованих дріжджових ефлюентів, технологічний розрахунок яких виконано у підрозділі 3.2, у процесі повсякденної діяльності крафтової пивоварні утворюються загальнозаводські стічні води. Вони формуються під час санітарної обробки варильного порядку, промивання шлангових комунікацій, миття технологічного обладнання (CIP-станції), ополіскування склотари та кегів, а також внаслідок вологого прибирання виробничих цехів.

Кількісна та якісна характеристика загальнозаводських стоків пивоварні. Для малих крафтових підприємств питомий коефіцієнт водовідведення є дещо вищим, ніж для великих пивзаводів, і становить у середньому 5,0-6,0 м³ стічних вод на 1 м³ готового пива (через часті переналагодження ліній, зміну сортів та обмежені можливості оборотного водопостачання).

Виходячи з річного об'єму виробництва пива, загальний річний об'єм утворення стічних вод становить:

$$V_{стоків_{річ}} = 98,52 \cdot 6,0 \approx 591,12 \text{ м}^3/\text{рік}$$

Враховуючи, що концентровані дріжджові стоки ($50 \text{ м}^3/\text{рік}$) відводяться за окремою локальною схемою, загальний об'єм загальнозаводських стічних вод становить:

$$V_{\text{річ}}^{\text{заг}} = 591,12 - 50,0 = 541,12 \text{ м}^3/\text{рік}$$

При тривалості виробничого року $N_{\text{роб}} = 250$ днів середньодобова витрата загальнозаводських стічних вод дорівнює:

$$Q_{\text{заг}}^{\text{доб}} = 541,12 / 250 \approx 2,16 \text{ м}^3/\text{добу} = 2160 \text{ л/добу}$$

Головною особливістю цих стоків є різка циклічна зміна активної реакції середовища (pH від 3,5 до 11,5 одиниць) протягом доби. Кисла реакція зумовлена використанням нітратної чи сульфамінової кислот для нейтралізації пивного каменю в ємностях, а лужна – застосуванням розчинів каустичної соди (NaOH) для видалення білково-жирових забруднень. Фізико-хімічні показники загальнозаводських стоків до очищення характеризуються такими усередненими значеннями: ХСК – $2500\text{--}3500 \text{ мг } \text{O}_2/\text{дм}^3$, БСК₅ – $1500\text{--}2200 \text{ мг } \text{O}_2/\text{дм}^3$, завислі речовини (залишки солодового пилу, дробини, білкові пластівці) – $500\text{--}800 \text{ мг}/\text{дм}^3$.

Обґрунтування етапів технологічної схеми локального очищення. Враховуючи розташування пивоварні MOVA Brewing Co. в урбанізованій зоні м. Дніпро, мета локального очищення – доведення параметрів стічних вод до нормативних вимог КП «Дніпроводоканал» щодо скидання у міську комунальну каналізацію. Для очищення загального потоку обґрунтовано компакту триступеневу схему (рис. 3.2):

1. Механічне та термічне кондиціювання (І ступінь). Стічні води з цехів самопливом надходять на блок механічного очищення, де встановлено дугове сито з розміром комірок $1,0 \text{ мм}$. Тут затримуються грубодисперсні домішки

(залишки зерна, лушпиння, етикетки). Освітлена вода спрямовується до підземного резервуара-усереднювача об'ємом 3,0 м³ (з розрахунку на 1,2-1,5 добового припливу). Усереднювач обладнано барботажною системою стисненого повітря, яка виконує три функції: постійне змішування кислих та лужних потоків для самонейтралізації; охолодження гарячих стоків варильного цеху (з 60-70°C до безпечних 25-30°C); попереднє окиснення легколетких органічних сполук і запобігання загниванню стоків. Для гарантованого забезпечення стабільного рН (у межах 6,5-8,5) усереднювач інтегровано з автоматичним дозуючим вузлом корекції, який за сигналами датчика впорскує 5% розчин HCl або NaOH.

2. Реагентна флокуляція та кавітаційна деструкція (II ступінь). Гомогенізований за добу стік насосом подається у змішувач, куди вводиться органічний високомолекулярний флокулянт у дозі 2,5-3,0 мг/л. Флокуляція забезпечує укрупнення дрібнодисперсних колоїдних білкових сполук у великі пластівці. Далі потік проходить крізь проточний гідродинамічний кавітатор. Акустичні мікроудари та локальні зсувні напруги кавітаційного поля руйнують оболонки колоїдів, забезпечують тонке емульгування залишків пивних жирів та інтенсифікують окиснення розчинених вуглеводів киснем повітря, який попередньо інжектуються в потік. Після кавітатора вода надходить у вертикальний тонкошаровий відстійник, де пластівці шламу швидко осаджуються протягом 45-60 хвилин. Виділений осад (вологістю ~96%) періодично скидається автоматичним клапаном у шламонакопичувач і згодом вивозиться, а освітлена вода йде на фінішну стадію.

3. Сорбційне доочищення (III ступінь). Для стабілізації показників ХСК та видалення залишків дезінфікуючих речовин (активного хлору, надोцтової кислоти), стоки пропускають крізь напірний сорбційний фільтр, завантажений активованим вугіллям марки БАУ-А. Фільтр повністю затримує залишкові мікробруднення, усуває специфічний запах та забезпечує повну прозорість ефлюенту.



Рисунок 3.2. Триступенева система очищення стічних вод пивоварні

Ефективність роботи локальних очисних споруд загального стоку. На основі усереднених результатів досліджень біодеградації броварних ефлюентів за аналогічними схемами, розраховано очікувану ефективність роботи запроєктованого комплексу (таблиця 3.3).

Таблиця 3.3. Проектні показники очищення загальнозаводських стічних вод пивоварні MOVA Brewing Co.

Контрольований показник забруднення	Вихідна концентрація у стоках, мг/дм ³	Концентрація після очищення, мг/дм ³	Загальний ступінь очищення, %	Нормативні ліміти, мг/дм ³
Завислі речовини	650	25	96,1	≤ 300
ХСК (хімічне споживання кисню)	3000	450	85,0	≤ 500
БСК ₅ (біохімічне споживання кисню)	1800	180	90,0	≤ 300
Активна реакція середовища, од. pH	3,5 – 11,5	7,2 – 7,6	–	6,5 – 8,5
Жири та макролії	120	4	96,6	≤ 50

Аналіз даних таблиці 3.3 підтверджує, що впровадження запропонованої технологічної схеми локального очищення забезпечує зниження органічного навантаження за ХСК на 85%, за БСК₅ – на 90%, а за завислими речовинами – понад 96%. Кінцеві параметри очищеної води повністю задовольняють вимогам міського водоканалу Дніпра, що нівелює екологічні ризики та виключає нарахування штрафних санкцій за понадлімітне забруднення гідросфери.

3.4. Обґрунтування технологічної лінії роботи біогазової установки на відходах пивоваріння

Завершальним та найбільш екологічно виправданим етапом комплексної модернізації системи рециклінгу відходів крафтової пивоварні MOVA Brewing Co. є проектування локальної біогазової установки. Об'єднання багатотоннажних щільних побічних продуктів (вологої пивної дробини та хмелевого осаду) із згущеним дріжджовим кеком в одному технологічному потоці дозволяє реалізувати процес субстратного анаеробного зброджування. Це інноваційне рішення забезпечує повну утилізацію небезпечної концентрованої органіки безпосередньо в межах пивоварні, генеруючи власну теплову й електричну енергію та мінімізуючи викиди парникових газів відповідно до принципів циркулярної економіки [1, 2].

Розрахунок добового біогазового завантаження та летких речовин субстрату. Для визначення біогазового потенціалу суміші відходів пивоварні за основу беруться середньодобові маси утворення побічних продуктів, визначені у Розділах 2.1 та 3.2 для річної потужності 100 тон пива на рік при 250 робочих днях:

- ✓ пивна дробина (волога) – $M^{доб}_{др} = 84,0$ кг/добу (вологість $W = 77\%$, вміст сухої речовини $t_{сyx} = 23\%$, леткі речовини $v_{лет} = 80\%$ від $T_{сyx}$);
- ✓ залишкові дріжджі (зневоднений кек) – $M^{доб}_{дріж} = 15,0$ кг/добу (вологість $W = 85\%$, вміст сухої речовини $t_{сyx} = 15\%$, леткі речовини $v_{лет} = 90\%$ від $T_{сyx}$);
- ✓ хмелевий осад і брух – $M^{доб}_{хм} = 5,5$ кг/добу (вологість $W = 82\%$, вміст сухої речовини $t_{сyx} = 18\%$, леткі речовини $v_{лет} = 85\%$ від $T_{сyx}$).

Використовуючи формули адитивного зведення компонентів, розрахуємо сумарну добову масу завантаження сухої речовини ($T_{сyx}^{доб}$) та абсолютної маси летких органічних речовин ($V_{лет}^{доб}$), що надходять у камеру метантенка:

$$\begin{aligned} T_{сyx}^{доб} &= (84,0 \cdot 0,23) + (15,0 \cdot 0,15) + (5,5 \cdot 0,18) = \\ &= 19,32 + 2,25 + 0,99 = 22,56 \text{ кг } T_{сyx}/\text{добу} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} V_{лет}^{доб} &= (84,0 \cdot 0,23 \cdot 0,80) + (15,0 \cdot 0,15 \cdot 0,90) + (5,5 \cdot 0,18 \cdot 0,85) = \\ &= 15,456 + 2,025 + 0,8415 = 18,3225 \text{ кг } V_{сyx}/\text{добу} \end{aligned}$$

Згідно з регламентом експлуатації біореакторів, оптимальна початкова вологість змішаного субстрату для рідкого зброджування повинна становити $W_{суб} = 90\%$ (концентрація сухої речовини 10% , або 100 кг $T_{сyx}/\text{м}^3$ пульпи). Тоді сумарний розрахунковий добовий об'єм гомогенізованого субстрату становить:

$$Q_{субстр} = T_{сyx}^{доб} / 100 = 22,56 / 100 = 0,2256 \text{ м}^3/\text{добу} = 225,6 \text{ л/добу}$$

Для доведення сумарної маси відходів ($84,0 + 15,0 + 5,5 = 104,5$ кг/добу) до необхідного об'єму пульпи $225,6$ л, у змішувач-гомогенізатор необхідно додати $225,6 - 104,5 = 121,1$ літра рідкої фази. В якості рідкого розріджувача в системі використовується $121,1$ л освітленого гарячого дріжджового фугату,

активованого кавітацією (із наявних 181,12 л/добу, розрахованих у підрозділі 3.2). Це повністю виключає використання чистої водопровідної води для технологічних потреб біогазової установки.

Розрахунок конструктивного об'єму анаеробного метантенка. Корисний геометричний об'єм біореактора розраховується за критерієм необхідного гідравлічного часу утримання субстрату (HRT). Для мезофільного режиму варіння метану при температурі 37°C з урахуванням розпаду щільної клітковини пивної дробини приймаємо $HRT = 25$ діб:

$$V_p(HRT) = Q_{субстр} \cdot HRT = 0,2256 \cdot 25 = 5,64 \text{ м}^3$$

Перевіримо отриманий об'єм за граничним рівнем швидкості об'ємного органічного навантаження (OLR) за формулою:

$$OLR = V_{сух}^{доб} / V_p(HRT) = 18,3225 / 5,64 \approx 3,25 \text{ кг } V_{сух} / (\text{м}^3 \cdot \text{добу})$$

Отримане значення 3,25 повністю задовольняє вимогам мікробіологічної стабільності одноступеневих мезофільних реакторів і лежить у межах нормативного діапазону 2,5-3,5 кг $V_{сух} / (\text{м}^3 \cdot \text{добу})$, що гарантує відсутність ризиків накопичення кислот.

Враховуючи необхідність створення буферної зони для збирання газу у верхній частині реактора (близько 20% від загального об'єму, коефіцієнт запасу $K_z = 1,2$), повний проектний об'єм метантенка дорівнює:

$$V_{повний} = V_p \cdot K_z = 5,64 \cdot 1,2 = 6,768 \text{ м}^3$$

Для практичного впровадження на пивоварні MOVA Brewing Co. обирається стандартний вертикальний циліндричний метантенк заводської готовності з нержавіючої сталі корисним об'ємом 7,0 м³, обладнаний

герметичним люком, водяною сорочкою підігріву та повільнодіючою гвинтовою мішалкою для руйнування кірки.

Розрахунок виходу біогазу та потенціалу когенераційної установки. Згідно з вимогами стандарту, питомий середній вихід біогазу з комплексного зброджуваного субстрату пивоваріння (суміш дробини, дріжджів та хмелю) становить $Y_{\text{бг}} = 0,60 \text{ м}^3/\text{кг } V_{\text{сyx}}$ при об'ємному вмісті метану CH_4 на рівні 60%. Очікуваний добовий об'єм генерації біогазу становить:

$$V_{\text{бг}} = 18,3225 \cdot 0,60 \approx 11,0 \text{ м}^3/\text{добу}$$

Річний обсяг утворення біогазу при 250 робочих днях становить:

$$V_{\text{річ}} = 11,0 \cdot 250 = 2750 \text{ м}^3/\text{рік}$$

Розрахунок номінальної електричної потужності когенераційного модуля ($P_{\text{ел}}$, кВт), що працює на отриманому паливі при нижчій теплоті згоряння біогазу $Q_{\text{н}} = 21,5 \text{ МДж/м}^3$ та електричному ККД установки $\eta_{\text{ел}} = 38\%$:

$$P_{\text{ел}} = (11,0 \cdot 21,5 \cdot 0,38) / (24 \cdot 3,6) = 89,87 / 86,4 \approx 1,04 \text{ кВт}$$

Номінальна теплова потужність когенератора ($P_{\text{тепл}}$, кВт) при тепловому ККД двигуна $\eta_{\text{тепл}} = 50\%$ становить:

$$P_{\text{тепл}} = (11,0 \cdot 21,5 \cdot 0,50) / (24 \cdot 3,6) = 118,25 / 86,4 \approx 1,37 \text{ кВт}$$

Загальна кількість виробленої електричної енергії за рік становить:

$$E_{\text{річ}} = 1,04 \text{ кВт} \cdot 24 \text{ год} \cdot 250 \text{ днів} = 6240 \text{ кВт} \cdot \text{год}/\text{рік}$$

Отримана теплова енергія у кількості:

$$Q_{pic} = 1,37 \cdot 24 \cdot 250 = 8220 \text{ кВт} \cdot \text{год/рік (або 29,6 ГДж/рік)}$$

Ця енергія повністю спрямовується через теплообмінний контур на підтримання мезофільного температурного режиму метантенка (+37°C) та підігрів вихідного субстрату, що робить установку повністю автономною за теплом. Основні розраховані інженерно-технологічні характеристики біогазового комплексу крафтової пивоварні зведені в таблицю 3.4.

Таблиця 3.4. Проектно-технічні параметри біогазової установки пивоварні

Найменування технологічного параметра	Значення параметра	Одиниці виміру
Добова маса завантаження сухої речовини (T_{cux})	22,56	кг T_{cux} /добу
Добова маса завантаження летких речовин (V_{cux})	18,32	кг V_{cux} /добу
Добова витрата суміші субстрату (при вологості 90%)	0,226	м ³ /добу
Розрахунковий корисний об'єм метантенка (HRT = 25 діб)	5,64	м ³
Прийнятий повний геометричний об'єм біореактора	7,0	м ³
Добова генерація сирого біогазу ($Y_{bg} = 0,60 \text{ м}^3/\text{кг } V_{cux}$)	11,0	м ³ /добу
Номінальна електрична потужність когенератора	1,04	кВт

Таким чином, розрахована технологічна лінія біогазової установки (рис. 3.3) забезпечує повний закритий рециклінг багатотоннажної органічної маси відходів пивоварні MOVA Brewing Co. Крім значного екологічного ефекту, пов'язаного із запобіганням гниттю біомаси та викидам метану в атмосферу, підприємство безкоштовно отримує 6240 кВт·год електроенергії на рік для покриття власних потреб варильного цеху, а також стабільний мінералізований знезаражений залишок (дигестат), який є високоякісним органічним добривом для сільського господарства Дніпропетровської області.

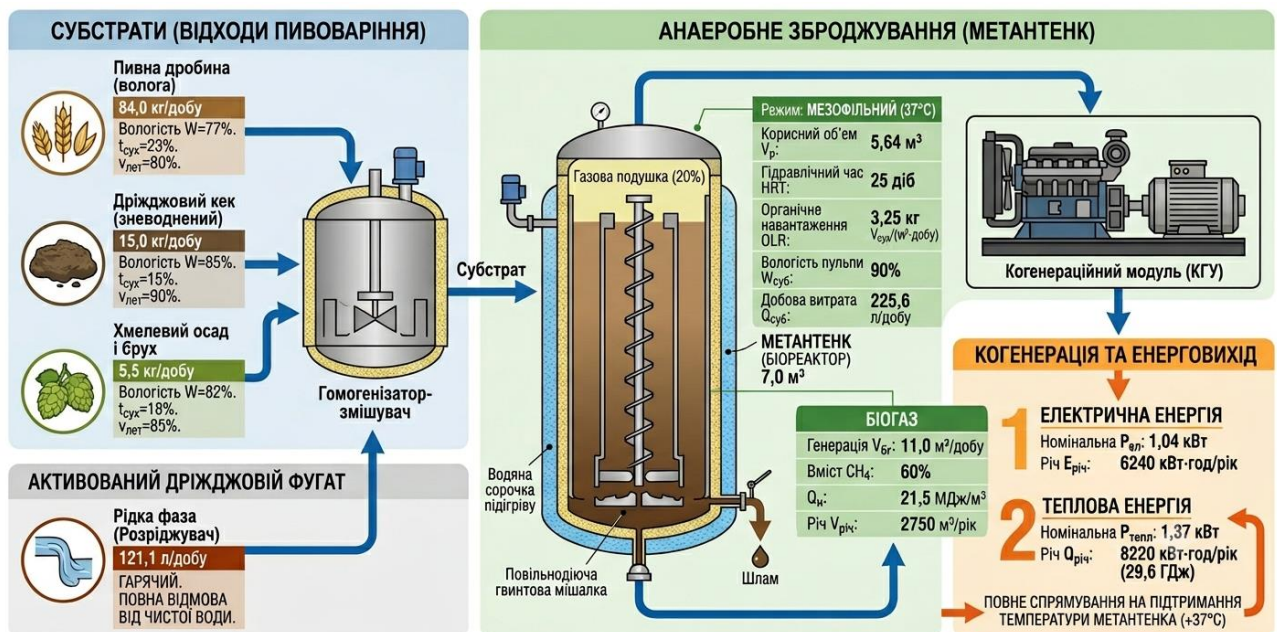


Рисунок 3.3. Технологічний цикл біогазової установки крафтової пивоварні при номінальній потужності виробництва 100 тон/рік

РОЗДІЛ 4. ЕКОЛОГО-ЕКОНОМІЧНА ЕФЕКТИВНІСТЬ ЗАПРОЕКТОВАНИХ РІШЕНЬ

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

Впровадження запропонованого комплексу екологічної модернізації на крафтовій пивоварні MOVA Brewing Co. у місті Дніпро потребує детального техніко-економічного аналізу. Перехід підприємства малої потужності (100 тон пива на рік) до замкненого циклу рециклінгу органічних відходів та локального триступеневого очищення стічних вод пов'язаний із залученням первинних капітальних інвестицій та виникненням щорічних експлуатаційних витрат.

Фінансові витрати на реалізацію екологічного проекту класифікуються за двома основними категоріями. Перша категорія (капітальні вкладення) охоплює витрати на придбання основного технологічного та допоміжного обладнання, закупівлю запірно-регулюючої арматури, приладів автоматизації, виконання будівельно-монтажних, шлангових та пусконаладжувальних робіт. Друга категорія (експлуатаційні витрати) включає щорічні витрати на оплату спожитої електроенергії, закупівлю хімічних реагентів, амортизаційні відрахування, витрати на поточний профілактичний ремонт та оплату праці обслуговуючого персоналу.

Зведений розрахунок необхідних капітальних інвестицій для облаштування очисного та біогазового комплексів на пивоварні виконано на

основі ринкових прайс-листів виробників обладнання станом на 2026 рік та представлено в таблиці 4.1.

Таблиця 4.1. Капітальні витрати на будівництво утилізаційного комплексу

№ з/п	Найменування статей капітальних витрат	Кошторисна вартість, грн.
1	Уніфікований вузол очищення дріжджових стоків (усереднювач, гвинтовий насос Netzsch, тарілчастий сепаратор Alfa Laval, фільтр Arkal, віброкавітатор)	420 000
2	Лінія триступеневого очищення стічних вод (дугове сито, резервуар, автоматика нейтралізації <i>pH</i> , проточний кавітатор, тонкошаровий відстійник, сорбційний вугільний фільтр)	480 000
3	Локальна біогазова установка (вертикальний метантенк 7 м ³ з нержавіючої сталі, водяна сорочка підігріву, мішалка, мокрий газгольдер, когенераційний модуль)	520 000
Всього капітальних витрат (<i>K</i>)		1 846 000

Поточне функціонування утилізаційного та очисного комплексів супроводжується щорічними операційними витратами. Енергетичні витрати розраховані на основі сумарного споживання електроенергії обладнанням (лінії дріжджових та загальнозаводських стоків споживають близько 5500 кВт·год електроенергії за рік) за чинним комерційним тарифом для підприємств м. Дніпро, який у 2026 році становить 8,50 грн. за 1 кВт·год. Витрати на реагенти включають купівлю високомолекулярного флокулянту, технічних розчинів NaOH та HCl для коригування *pH*, а також періодичну

заміну активованого вугілля БАУ-А. Поточні операційні витрати зведені у таблицю 4.2.

Таблиця 4.2. Щорічні експлуатаційні витрати комплексу утилізації

№ з/п	Статті операційних витрат комплексу	Витрати, грн./рік
1	Витрати на електроенергію (5500 кВт·год · 8,50 грн./кВт·год)	46 750
2	Вартість хімічних реагентів та фільтрувальних матеріалів (флокулянти, кислота, луг, вугілля БАУ-А)	22 000
3	Амортизаційні відрахування та поточний профілактичний ремонт (5% від балансової вартості обладнання)	71 000
Всього експлуатаційних витрат (<i>C_{експ}</i>)		175 750

4.2. Економічна ефективність запроєктованих рішень

Економічний ефект від реалізації запропонованих інженерних та екологічних рішень формується за рахунок трьох основних факторів: генерації власної електричної енергії когенераційним модулем; часткового заміщення теплової енергії для потреб гарячого водопостачання; та повного попередження фінансових санкцій і штрафів КП «Дніпроводоканал» за скидання у міську комунальну каналізацію надмірно забруднених стоків пивоварні (перевищення лімітів за ХСК, БСК та завислими речовинами).

Розрахунок фінансових надходжень та відвернених збитків (заощаджень) для пивоварні представлено в таблиці 4.3.

Таблиця 4.3. Фінансові заощадження та річний дохід від модернізації

№ з/п	Джерело формування економічного ефекту	Заощадження / дохід, грн./рік
1	Економія купованої електроенергії за рахунок локальної генерації на біогазі (6240 кВт·год/рік · 8,50 грн./кВт·год)	53 040
2	Економія теплової енергії (8220 кВт·год когенераційного тепла заміщують спалювання ~900 м ³ газу за ціною 25,0 грн./м ³)	22 500
3	Попередження нарахування підвищеної плати та екологічних штрафів водоканалу м. Дніпро за скидання концентрованої органіки	420 000
Загальний річний дохід та заощадження ($D_{\text{заг}}$)		510 540

Розрахунок чистого річного економічного ефекту від модернізації (ΔE , грн./рік) проводиться як різниця між загальним річним доходом/заощадженнями та сумарними операційними витратами за формулою:

$$\Delta E = D_{\text{заг}} - C_{\text{експ}}, \quad (4.1)$$

$$\Delta E = 510\,540 - 175\,750 = 334\,790 \text{ грн./рік}$$

Основним інтегральним показником, що визначає доцільність фінансування екологічного проекту, є простий термін окупності капітальних інвестицій (T_o , років). Він розраховується як відношення сумарних капітальних витрат (K) до чистого річного економічного ефекту за формулою:

$$T_0 = K / \Delta E, \quad (4.2)$$

$$T_0 = 1\,846\,000 / 334\,790 \approx 5,51 \text{ років} = 6 \text{ років}$$

Отриманий показник терміну окупності, який становить близько 6 років, є нормативним та цілком прийнятним для об'єктів промислової екології та відновлюваної енергетики в Україні. Враховуючи тривалий термін експлуатації основного обладнання (сепараторів, дискових фільтрів та метантенка), який складає не менше 15-20 років, за межами терміну окупності броварня MOVA Brewing Co. отримуватиме чистий прибуток, що істотно знизить собівартість готової продукції.

Додатковий екологічний та соціальний ефект, який не піддається прямому грошовому обліку, включає:

- ✓ повне виключення антропогенного навантаження за концентрованою органікою на басейн річки Дніпро;
- ✓ запобігання неконтрольованій генерації парникових газів на звалищах при гнитті пивної дробини; покращення санітарного стану виробничих цехів;
- ✓ підвищення екологічного іміджу бренду MOVA серед сучасних споживачів.

Таким чином, запропоновані технічні рішення є високоефективними як з екологічної, так і з фінансово-економічної точок зору.

РОЗДІЛ 5. ОХОРОНА ПРАЦІ ТА САНІТАРНА БЕЗПЕКА ПІД ЧАС РОБІТ З УТИЛІЗАЦІЇ ВІДХОДІВ ПИВОВАРНОГО ПІДПРИЄМСТВА

5.1. Організація системи охорони праці на підприємстві

Організація системи охорони праці на крафтовій пивоварні MOVA Brewing Co. здійснюється відповідно до Закону України «Про охорону праці», Кодексу законів про працю України, а також чинних міжгалузевих та галузевих нормативно-правових актів броварної індустрії. Створення безпечних та нешкідливих умов праці є першочерговим соціально-економічним завданням керівництва, що особливо загострюється при впровадженні локальних ліній утилізації концентрованої органіки та біогазових споруд. Специфіка обслуговування інтегрованого утилізаційного вузла (відцентрових сепараторів, дискових мікрофільтрів, кавітаційних камер та анаеробного метантенка) пов'язана із наявністю комплексу небезпечних та шкідливих виробничих факторів фізичної, хімічної та біологічної природи.

Загальне керівництво та відповідальність за стан охорони праці на підприємстві покладається на директора пивоварні. Безпосередній контроль і координацію роботи здійснює призначений наказом інженер з охорони праці (або уповноважена особа), який проводить регулярні аудити робочих місць, контролює справність засобів колективного та індивідуального захисту, а також організовує систему навчання та інструктажів. Всі працівники, задіяні в обслуговуванні ліній утилізації та очищення стоків, проходять обов'язкові медичні огляди (при прийнятті на роботу та періодичні), а також комплекс

інструктажів: вступний (при прийомі), первинний на робочому місці, повторний (не рідше одного разу на 3 місяці для робіт з підвищеною небезпекою), позаплановий (при зміні технології чи обладнання) та цільовий (при виконанні разових аварійних операцій).

При експлуатації запроєктованого утилізаційного та очисного комплексів на оператора (пивовара-дослідника) діють такі основні небезпечні та шкідливі виробничі фактори:

1. Фізичні фактори: рухомі частини та елементи обладнання (електроприводи, шнекові транспортери кеку, відкриті вали гвинтових насосів); підвищений тиск у гідравлічних комунікаціях та трубопроводах подачі стоків (до 0,4 МПа) і в лінії мікрофільтрації (0,15 МПа); підвищений рівень шуму та локальної вібрації, що генеруються тарілчастим сепаратором Alfa Laval та двотактним магнітним збурювачем апарату-кавітатора; небезпека ураження електричним струмом (напруга живлення 380 В/50 Гц для приводів насосів та сепаратора); підвищена вологість повітря робочої зони; вибухо- та пожежонебезпека, пов'язана з накопиченням, транспортуванням та спалюванням біогазу (метану) в межах метантенка й газгольдера.

2. Хімічні фактори: токсична дія агресивних хімічних реагентів, що використовуються для періодичного коригування активної реакції (рН) та промивання систем (концентровані технічні розчини гідроксиду натрію NaOH та хлоридної кислоти HCl); небезпека отруєння токсичними та задушливими газами, які можуть виділятися при аварійній розгерметизації анаеробного біореактора або накопичувача (метан CH_4 , діоксид вуглецю CO_2 та сірководень H_2S).

3. Біологічні фактори: наявність у повітрі робочої зони та у складі аерозолів промислових стоків патогенних або умовно-патогенних мікроорганізмів, продуктів автолізу залишкових дріжджових клітин (дріжджових лізатів) та бактеріальної мікрофлори, що викликає гниття біомаси, що може призвести до алергічних, респіраторних чи інфекційних захворювань шкіри та слизових оболонок при відсутності належного бар'єрного захисту.

5.2. Виробнича санітарія та безпека при роботі з відходами пивоварного підприємства

Для нейтралізації дії шкідливих факторів та забезпечення належного рівня виробничої санітарії на ділянці утилізації відходів пивоварні MOVA Brewing Co. передбачено комплекс інженерно-технічних та санітарно-гігієнічних заходів:

1. Організація вентиляції та контролю повітряного середовища. Приміщення очисних споруд та залу змішування субстратів обладнується автономною примусовою загальнообмінною припливно-витяжною вентиляцією з механічним спонуканням, яка розраховується на забезпечення не менше ніж 8-10 кратного обміну повітря за годину. Над вузлами відкритих технологічних переливів стоків, бункером завантаження дробини та дозуючими насосами хімічних реагентів встановлюються локальні витяжні парасолі (місцеві відсмоктувачі) для вловлювання парів кислот, лугів та вологих аерозолів. Враховуючи високу вибухонебезпеку метану (межі вибуховості з повітрям становлять 5-15% за об'ємом) та високу токсичність сірководню, приміщення біогазового вузла в обов'язковому порядку оснащується безперервно діючою системою автоматичного газового контролю. Датчики-газоаналізатори налаштовуються на подачу світлозвукового сигналу та автоматичне включення аварійної витяжної вентиляції у вибухозахищеному виконанні при досягненні 10% від нижньої межі вибуховості метану або при перевищенні ГДК сірководню (понад 10 мг/м³).

2. Виробниче освітлення. Відповідно до вимог ДБН В.2.5-28:2018, у приміщеннях очисної та утилізаційної ліній пивоварні організовується комбіноване освітлення. Природне освітлення забезпечується через віконні

прорізи в стінах (коефіцієнт природної освітленості КПО не менше 1,5%). Штучне робоче освітлення реалізується за допомогою енергоефективних світлодіодних світильників, які забезпечують нормовану освітленість на рівні 200-300 лк на робочих поверхнях і пультах керування. Всі світильники, розташовані в зоні анаеробного метантенка та газгольдера, виконуються у пило-, вологозахищеному та вибухобезпечному виконанні (клас захисту не менше IP65, маркування вибухозахисту). Окрім робочого, передбачено мережу аварійного (евакуаційного) освітлення з живленням від акумуляторних батарей потужністю не менше 5 лк для забезпечення безпечного зупину обладнання при раптовому вимкненні електроенергії.

3. Електробезпека. Все електрообладнання очисного та біогазового комплексів (електродвигуни сепаратора, кавітатора, мішалок, насосів) експлуатується в умовах підвищеної вологості та наявності агресивних середовищ, що відносить приміщення до категорії з підвищеною електробезпекою. Для захисту персоналу від ураження струмом при пошкодженні ізоляції всі металеві неструмоведучі частини та корпуси апаратів підлягають жорсткому заземленню та зануленню за схемою TN-S відповідно до вимог ПУЕ. Опір заземлювального пристрою в будь-яку пору року не повинен перевищувати 4,0 Ом. Всі силові кола живлення обладнання обов'язково захищаються пристроями захисного відключення (ПЗВ) зі струмом спрацьовування не більше 30 мА, а пускова та регулююча апаратура (частотні перетворювачі, реле) розміщується у винесених герметичних шафах керування з класом захисту IP54.

4. Пожежна та вибухобезпека біогазової лінії. Будівля та відкриті майданчики розташування анаеробного метантенка і мокрого газгольдера належать до категорії «А» за вибухопожежною небезпекою, а зони всередині та навколо реактора класифікуються як вибухонебезпечні зони класів 0 та 1 згідно з ДНАОП 0.00-1.32-01. Для запобігання пожежам та вибухам

конструкція метантенка обладнується дворейковими гідрозатворами, вакуумними та вибуховими запобіжними клапанами для скидання надлишкового тиску газу. Трубопроводи біогазу оснащуються сітчастими вогнеперегороджувачами для локалізації можливого зворотного поширення полум'я від когенератора. Всі металеві конструкції, ємності та трубопроводи заземлюються для зняття статичної електрики, а сама установка інтегрується у загальнозаводську систему блискавкозахисту (встановлюються стрижневі блискавковідводи). В зоні утилізації забороняється використання відкритого вогню, проведення зварювальних робіт без спеціального допуску, а інструмент для обслуговування повинен бути виконаний з кольорових металів (бронза, латунь), що унеможливорює утворення іскор при ударах.

5. Засоби індивідуального захисту (ЗІЗ). З огляду на специфіку шкідливих факторів, персонал лінії утилізації відходів пивоварні MOVA Brewing Co. в обов'язковому порядку безкоштовно забезпечується сертифікованими засобами індивідуального захисту згідно з чинними галузевими нормами (таблиця 5.1).

Таким чином, впровадження запропонованого комплексу інженерних, організаційних та санітарно-гігієнічних заходів, жорстке дотримання правил поводження з вибухонебезпечними газами (метаном) та їдкими реагентами (NaOH, HCl) дозволяє повністю мінімізувати ризики виробничого травматизму та професійних захворювань на пивоварні MOVA Brewing Co. Створення безпечного середовища праці забезпечує стабільне функціонування утилізаційної лінії, що є невід'ємною частиною загальної екологічної та соціальної відповідальності сучасного крафтового підприємства в Україні.

Таблиця 5.1. Карта забезпечення засобами індивідуального захисту персоналу лінії утилізації відходів

Технологічна операція / Виробнича зона	Небезпечний фактор	Необхідні засоби індивідуального захисту (ЗІЗ)
Приготування розчинів реагентів, промивка фільтрів, коригування рН в усереднювачі	Хімічні опіки шкіри та очей концентрованими лугами (NaOH) та кислотами (HCl)	Захисні герметичні окуляри ЗМ, прогумований або полівінілхлоридний фартух, щільні нітрилові хімічно стійкі рукавички, спецвзуття
Обслуговування відцентрового сепаратора Alfa Laval та віброкавітаційного апарату	Підвищений рівень шуму (понад 80 дБА), механічні суспензії та бризки	Протишумні вкладки (беруші) або навушники з рівнем захисту не менше SNR=25 дБ, захисний бавовняний костюм, захисні прозорі щитки
Профілактичний огляд метантенка, відбір проб дигестату та очищеного фугату	Біоаерозолі, бактеріальне забруднення, виділення мікродоз сірководню та метану	Захисний респіратор класу FFP2/FFP3 з вугільним фільтром, захисний комбінезон, нітрилові медичні рукавички, спецвзуття на нековзній підшві
Аварійні роботи, ліквідація витоків біогазу, заміна запірної арматури на реакторі	Висока концентрація токсичного сірководню, задушлива дія метану та CO ₂	Шланговий або ізолюючий протигаз ПШ-1/ПШ-2, вибухобезпечний ліхтар, іскробезпечний монтажний інструмент, страхувальний пояс із канатом

ВИСНОВКИ

У кваліфікаційній роботі наведено теоретичне узагальнення та вирішення актуальної інженерно-екологічної проблеми – мінімізації антропогенного навантаження на довкілля та підвищення ресурсоефективності крафтових browарень шляхом обґрунтування та розрахунку замкненої системи утилізації вторинних сировинних ресурсів і очищення стічних вод.

Основні наукові, технологічні та практичні результати досліджень полягають у наступному:

1. Обґрунтовано вибір об'єкта та досліджено баланс відходів. Об'єктом практичного впровадження обрано пивоварню MOVA Brewing Co. (м. Дніпро) з номінальною потужністю 100 тон готової продукції на рік. Встановлено, що за такої продуктивності підприємство щорічно генерує значні обсяги концентрованої органіки: 20-22 т вологої пивної дробини, 1,5-2,6 т залишкових пивних дріжджів, 1,4 т хмелевого осаду та бруху, а також до 60 м³ висококонцентрованих дріжджових стоків. Пряме скидання цих субстратів у міську каналізацію є неприпустимим через екстремально високі показники ХСК та БСК.
2. Розроблено технологічну схему очищення дріжджових стоків. Запропоновано комбіновану схему, яка включає акумуляцію з коригуванням pH , відцентрове сепарування, гідродинамічну/акустичну кавітаційну обробку та фінішну дискову ультрафільтрацію. Інноваційне впровадження кавітаційного віброапарату забезпечує глибокий механічний та термічний лізис живих дріжджових клітин, деструкцію високомолекулярних полімерів та зниження вихідного показника ХСК фугату на 57,9% (з 4500 до 1896,3 мг О₂/дм³).

3. Спроектовано триступеневу систему очищення загальнозаводських стічних вод. Для потоку загальнозаводських стоків об'ємом $2,16 \text{ м}^3/\text{добу}$ обґрунтовано схему, що поєднує дугове сито й барботажний усереднювач-нейтралізатор (І ступінь) , реагентну флокуляцію з кавітаційною деструкцією та тонкошаровим відстоюванням (ІІ ступінь) , а також сорбційне доочищення на фільтрах з активованим вугіллям марки БАУ-А (ІІІ ступінь). Схема забезпечує високу ефективність очищення: за завислими речовинами – 96,1%, за ХСК – 85,0%, за БСК₅ – 90,0% , що дозволяє повністю виконувати нормативні вимоги КП «Дніпроводоканал».
4. Розраховано параметри лінії біогазової установки. Обґрунтовано технологію анаеробного субстратного зброджування суміші щільних відходів (дробини, хмелю, дріжджового кеку) та активованого кавітацією фугату як рідкого розріджувача, що виключає споживання чистої води. Визначено конструктивні параметри вертикального метантенка корисним об'ємом $5,64 \text{ м}^3$ (прийнято повний геометричний об'єм $7,0 \text{ м}^3$) , який працює у мезофільному режимі ($+37^\circ\text{C}$) при тривалості утримання субстрату 25 діб та органічному навантаженні $3,25 \text{ кг } V_{\text{сух}} (\text{м}^3/\text{добу})$. Очікувана добова генерація біогазу становить $11,0 \text{ м}^3$ ($2750 \text{ м}^3/\text{рік}$).
5. Оцінено енергетичний потенціал та еколого-економічну ефективність. Інтеграція когенераційного модуля номінальною електричною потужністю 1,04 кВт та тепловою 1,37 кВт забезпечує щорічне виробництво 6240 кВт·год електроенергії для власних потреб броварні та 8220 кВт·год тепла , яке повністю покриває потреби підігріву метантенка. Загальні капітальні інвестиції у проєкт модернізації становлять 1 846 000 грн , щорічні операційні витрати – 175 750 грн/рік. Чистий річний економічний ефект за рахунок генерації енергоносіїв та відвернення екологічних штрафів водоканалу дорівнює 334 790 грн/рік ,

що зумовлює нормативний і цілком прийнятний термін окупності капіталовкладень – 6 років.

6. Забезпечено вимоги охорони праці та виробничої санітарії. Спроектовано комплексну систему безпеки праці при обслуговуванні утилізаційного блоку. Визначено заходи захисту від небезпечних факторів: розраховано примусову припливно-витяжну вентиляцію приміщень з 8-10 кратним обміном повітря, впроваджено автоматичний світлозвуковий газовий контроль вибухонебезпечного метану й токсичного сірководню, передбачено вибухозахищене штучне освітлення класу захисту IP65 та захисне заземлення електрообладнання (опір до 4,0 Ом). Розроблено розгорнуту карту індивідуального захисту (ЗІЗ) для персоналу при роботі з їдкими реагентами та вибухонебезпечними газами.

Впровадження розробленого утилізаційного комплексу дозволить MOVA Brewing Co. (м. Дніпро) повністю замкнути технологічний цикл за матеріальними та енергетичними потоками, ліквідувати екологічні ризики забруднення басейну річки Дніпро та сформувати імідж екологічно відповідального крафтового бренду в Україні.

БІБЛІОГРАФІЯ:

1. Agrawal D., Gopaliya D., Willoughby N., Khare S. K., Kumar V. Recycling Potential of Brewer's Spent Grains for Circular Biorefineries. *Current Opinion in Green and Sustainable Chemistry*. 2023. Vol. 40. P. 100748. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.cogsc.2022.100748>
2. Chattaraj S., Mitra D., Ganguly A., Thatoi H., Das Mohapatra P. K. A critical review on the biotechnological potential of Brewers' waste: Challenges and future alternatives. *Current Research in Microbial Sciences*. 2024. Vol. 6. P. 100228. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.crmicr.2024.100228>
3. Душечкіна Н. Аналіз стану проблеми утилізації відходів бродильних виробництв. *Природничі науки та природокористування*. 2024. Вип. 1. С. 31–37. UDK [628.477.4.06:663](045).
4. Резвих Н. І., Вогнівенко Л. П. Особливості технологічного процесу виробництва пива в Україні та світі. *Таврійський науковий вісник. Серія: Технічні науки*. 2025. № 1. С. 449–457. DOI: <https://doi.org/10.32782/tnv-tech.2025.1.46>
5. Fernandes P. C. B., Silva J. Brewing By-Products: Source, Nature, and Handling in the Dawn of a Circular Economy Age. *Biomass*. 2025. Vol. 5, No. 3. P. 49. DOI: <https://doi.org/10.3390/biomass5030049>
6. Zhichkin K., Nosov V., Zhichkina L. Waste management system in the brewing industry. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*. 2019. Vol. 337. P. 012009. DOI: <https://doi.org/10.1088/1755-1315/337/1/012009>
7. Тертишний О. О. Теплові процеси та обладнання в харчових виробництвах: навч. посіб. / О. О. Тертишний, О. А. Півоваров, В. С. Кошулько; Дніпровський держ. аграр-екон. ун-т. – Дніпро: ДДАЕУ, 2025. – 362 с.

8. Півоваров О. А. Інноваційні технології та обладнання бродильних виробництв: навч. посіб. / МОН України ; ДДАЕУ ; О. А. Півоваров, О. С. Ковальова, В. С. Кошулько – Дніпро: ФОП Обдимко О.С., 2025. – 396 с.
9. Масообмінні процеси та обладнання в харчових виробництвах: навч. посіб. / О. О. Тертишний, О. А. Півоваров, В. С. Кошулько, О. В. Тертишна; ДДАЕУ. – Дніпро: ДДАЕУ, 2026. – 214 с.