

Київський національний університет імені Тараса Шевченка

Економічний факультет

Кафедра економічної кібернетики

КВАЛІФІКАЦІЙНА РОБОТА БАКАЛАВРА

**“Економіко-математичне моделювання ланцюга постачання сировини
для біогазових комплексів України”**

Студентки 4-го курсу

Спеціальності 051 “Економіка”

ОПП “Економічна кібернетика”

Денної форми навчання

Мінько Наталії Василівни

Науковий керівник:

Доктор економічних наук, професор

Баженова Олена Володимирівна

Засвідчую, що в цій роботі немає запозичень із
праць інших авторів без відповідних посилань

Студент _____

Роботу допущено до захисту перед ЕК

Рішенням кафедри економічної кібернетики

Від 12.06.2025 р., протокол № 15

Завідувач кафедри:

Доктор економічних наук, професор

Ляшенко Олена Ігорівна _____

Київ - 2025

АНОТАЦІЯ

Кваліфікаційна робота бакалавра присвячена економіко-математичному моделюванню ланцюга постачання сировини для біогазових комплексів в Україні. У роботі розглянуто теоретичні основи біоенергетики, технології виробництва біогазу, а також особливості логістики сировини. Розроблено економіко-математичну модель для оптимізації постачання сировини з різних видів органічних матеріалів, всіх витрат на виробництво та цільової потужності виробництва енергії. Використовуючи мову програмування R, створено алгоритм, який визначає оптимальну кількість сировини від різних постачальників для максимізації прибутку. Робота має практичне значення в контексті підвищення ефективності біогазових комплексів, зниження логістичних витрат та сприяння енергетичній безпеці України. Результати можуть бути застосовані в аграрному секторі та енергетичних проєктах.

Ключові слова: біогаз, ланцюг постачання, економіко-математичне моделювання, логістика, оптимізація.

ABSTRACT

The diploma thesis focuses on the economic-mathematical modeling of the supply chain for raw materials used in biogas complexes in Ukraine. The study covers the theoretical foundations of bioenergy, biogas production technologies, and the specifics of raw material logistics. An economic-mathematical model was developed to optimize the supply chain, considering different types of organic raw materials, costs of production, and a target energy production capacity. Using the R programming language, an algorithm was created to determine the optimal quantity of raw materials from various suppliers to maximize profit. The work has practical significance for enhancing the efficiency of biogas complexes, reducing logistics

costs, and contributing to Ukraine's energy security. The results can be applied in the agricultural sector and energy projects.

Keywords: biogas, supply chain, economic-mathematical modeling, logistics, optimization.

ЗМІСТ

ВСТУП	6
РОЗДІЛ 1: БІОЕНЕРГІЯ ТА БІОГАЗ: ОСНОВИ, ВИРОБНИЦТВО, ВИКОРИСТАННЯ ТА ПЕРСПЕКТИВИ В УКРАЇНІ.....	12
1.1. Вступ до біоенергетики.....	12
1.2. Біогаз: визначення та склад.....	13
1.3. Виробництво біогазу.....	15
1.3.1. Процес анаеробного бродіння.	15
1.3.2. Сировина для виробництва біогазу.	17
1.3.3. Устаткування та структура біогазової станції.....	19
1.4. Використання біогазу	21
1.5. Важливість та переваги біогазу	24
1.5.1. Екологічні переваги.	24
1.5.2. Економічні переваги.	25
1.5.3. Соціальні переваги.	27
1.6 Значення біогазу для енергетичної безпеки	28
1.7. Аналіз поточної енергетичної ситуації в Україні.....	30
Висновки до розділу 1	32
РОЗДІЛ 2. ЛОГІСТИКА ТА ОСОБЛИВОСТІ ПОСТАЧАННЯ СИРОВИНИ ДЛЯ БІОГАЗОВИХ КОМПЛЕКСІВ	34
2.1. Основи логістики біогазового виробництва.....	34
2.1.1. Визначення ланцюга постачання та його компоненти.....	34
2.1.2. Особливості сировини.....	36
2.1.3. Кейс МХП: логістичні рішення на комплексах.	37
2.2. Аналіз логістичних витрат	39
2.2.1. Структура витрат: транспорт, зберігання, підготовка сировини.....	40
2.2.2. Вплив географії та сезонності на витрати.....	41

2.3. Проблеми логістики в Україні	42
2.3.1. Інфраструктурні обмеження.	42
2.3.2. Вплив воєнного стану на поставки.	43
2.3.3. Екологічні аспекти транспортування.....	44
Висновки до розділу 2	45
РОЗДІЛ 3. ЕКОНОМІКО-МАТЕМАТИЧНЕ МОДЕЛЮВАННЯ ЛАНЦЮГА	
ПОСТАЧАННЯ СИРОВИНИ: ПРАКТИЧНІ СЦЕНАРІЇ ТА РЕЗУЛЬТАТИ...	47
3.1. Методи моделювання ланцюга постачання.....	47
3.1.1. Лінійне програмування: принципи та застосування.	47
3.1.2. Системний аналіз для оптимізації логістики.	48
3.1.3. Огляд інструментів програмування (R, lpSolve).....	49
3.2. Розробка моделі оптимізації	50
3.2.1. Формулювання цільової функції (максимізація прибутку).	50
3.2.2. Обмеження.	53
3.3. Програмна реалізація моделі	56
3.3.1. Алгоритм у R для вибору постачальників та обсягів сировини.	56
3.3.2. Візуалізація результатів.	59
3.3.3. Аналіз чутливості моделі.....	61
3.3.4. Сценарії для різних умов.	62
3.4. Адаптація моделі для інших біогазових комплексів	64
3.5. Інтеграція з біометановими проєктами.....	65
3.6. Перспективи для аграрного сектору та громад.....	66
3.7. Економічна оцінка масштабування	67
Висновки до розділу 3	70
ВИСНОВКИ.....	73
СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ.....	76
ДОДАТКИ	82

ВСТУП

Актуальність теми дослідження

Енергетична безпека та сталий розвиток є ключовими викликами сучасної України, особливо в умовах війни, зростання цін на енергоносії та руйнування інфраструктури. Біоенергетика, зокрема виробництво біогазу, пропонує рішення для децентралізованого енергозабезпечення, утилізації органічних відходів та зниження залежності від імпорту палива [1]. Однак ефективність біогазових комплексів значною мірою залежить від оптимізації ланцюга постачання сировини, що включає вибір постачальників, обсяги закупівель та логістичні витрати. Економіко-математичне моделювання ланцюга постачання сировини дозволяє знизити витрати, підвищити прибутковість та забезпечити стабільну роботу біогазових установок. З огляду на значний сировинний потенціал України (понад 50 млн тон гною щороку) та цільові показники виробництва біометану (10 млрд м³), розробка моделей оптимізації постачання є актуальною для аграрного сектору, енергетики та економіки країни загалом [1].

Об'єктом дослідження є ланцюг постачання сировини для біогазових комплексів в Україні.

Предметом дослідження є економіко-математичні методи оптимізації постачання сировини для забезпечення цільової потужності виробництва біогазу з максимізацією прибутку.

Метою кваліфікаційної роботи є розробка економіко-математичної моделі оптимізації ланцюга постачання сировини для біогазових комплексів, яка забезпечує цільову потужність виробництва енергії та максимізує прибуток за рахунок ефективного вибору постачальників, обсягів сировини та мінімізації витрат.

Завдання дослідження включають:

1. Проаналізувати теоретичні основи біоенергетики та технології виробництва біогазу.
2. Визначити особливості логістики сировини для біогазових комплексів.
3. Описати методи економіко-математичного моделювання, придатні для оптимізації ланцюга постачання.
4. Розробити модель оптимізації постачання сировини з урахуванням різних видів сировини та всіх витрат на виробництво.
5. Створити програмний код на мові R для реалізації моделі та оцінки її ефективності.
6. Оцінити економічні результати впровадження моделі та її вплив на прибутковість біогазового комплексу.

Для досягнення мети використано наступні **методи**:

- Аналіз теоретичних джерел : вивчення наукових джерел, звітів та аналіз практичних кейсів для формування теоретичної бази [2].
- Системний аналіз: визначення ключових компонентів ланцюга постачання та їх взаємозв'язків.
- Методи економіко-математичного моделювання: застосування лінійного програмування для оптимізації вибору сировини та постачальників.
- Програмування: розробка алгоритму в R для розв'язання задачі оптимізації.
- Порівняльний аналіз: оцінка ефективності моделі за критеріями прибутку, витрат та стабільності виробництва.

Наукова новизна: розроблено економіко-математичну модель оптимізації ланцюга постачання сировини для біогазових комплексів. Модель інтегрує методи лінійного програмування та програмування на R, що дозволяє адаптувати її до різних умов виробництва.

Практична новизна: створено алгоритм, який забезпечує оптимальний вибір постачальників та обсягів сировини, знижуючи логістичні витрати та підвищуючи прибутковість біогазових комплексів. Результати можуть бути використані аграрними підприємствами, енергетичними компаніями та місцевими громадами.

Результати впровадження роботи

Запропонована модель дозволяє:

- Забезпечити стабільне виробництво біогазу з потужністю не менше 12 МВт/год.
- Знизити транспортні витрати на 15–20% за рахунок оптимального вибору постачальників.
- Підвищити прибутковість біогазового комплексу на 10–12% шляхом раціонального розподілу сировини.
- Сприяти утилізації органічних відходів, зниженню викидів парникових газів та зміцненню енергетичної безпеки.

Результати можуть бути застосовані в реальних біогазових проєктах, таких як комплекси МХП, та масштабуватися на національний рівень.

Інформаційна база дослідження включає:

- Наукові статті та звіти: UABIO, IEA, Держенергоефективності, Європейська біогазова асоціація [3].

- Практичні кейси: звіти МХП про біогазові комплекси «Оріль-Лідер» та «Вінницька птахофабрика» [1].
- Нормативні документи: постанови НКРЕКП про «зелений» тариф, стратегії розвитку біоенергетики.
- Дані про сировину: оцінки потенціалу гною, сільськогосподарських залишків та енергетичних культур в Україні.
- Технічні характеристики: інформація про вихід біогазу з різних видів сировини та теплотворну здатність метану.

Рівень наукової розробленості теми в Україні

У контексті глобального переходу до відновлюваних джерел енергії та зменшення залежності від викопного палива, дослідження у сфері біоенергетики, зокрема біогазових технологій, набувають особливої актуальності. В Україні ця тематика поступово інтегрується в науковий дискурс, охоплюючи аспекти енергетичного менеджменту, аграрної економіки, екології та логістики.

Значний внесок у розвиток теоретико-методичних засад виробництва біогазу зроблено в рамках дисертаційних досліджень. Зокрема, у дисертації Зеленчук Н.В. розглянуто еколого-економічну ефективність виробництва біогазу в домогосподарствах та на підприємствах України. Авторка акцентує увагу на оцінці потенціалу біомаси, а також на соціально-економічних вигодах, пов'язаних із виробництвом біогазу [43]. Важливою є також праця Печки С.С., яка аналізує диверсифікацію діяльності аграрних підприємств з урахуванням інструментів управління ланцюгами постачань. Хоча робота не присвячена виключно біогазу, її висновки можна адаптувати до специфіки галузі біоенергетики [53].

Певний внесок зроблено і в технічному напрямі: магістерські роботи, захищені в НТУУ "КПІ імені Ігоря Сікорського", зокрема Любецького А. та Гончара Р., висвітлюють аспекти автоматизації та енергоефективності біогазових установок. Вони містять аналітичні підходи до оцінки технологічних процесів анаеробного зброджування, що важливо для планування енерговиробництва [54, 55]. Окрім того, наукові звіти та статті, такі як роботи Скидана О.В. та Шевченка О.Є., розкривають практичні аспекти використання біомаси та дигестату, надаючи емпіричні дані для моделювання [11, 13, 14, 16, 18, 20, 22, 23].

Також варто зазначити наступні роботи, зокрема Жук В.М. розглядає спроможності інституціональної теорії для забезпечення сталого розвитку агробізнесу в повоєнній Україні, що підкреслює важливість інноваційних підходів до використання сільськогосподарських відходів [56]. Аналіз торгівлі агропродовольчою продукцією між Україною та ЄС у умовах воєнного стану, проведений Козаком О.А., Грищенком О.Ю., Пугачовим В.М., акцентує на логістичних аспектах, які впливають на постачання сировини [57]. Крім того, праці Добровольського В.К., Стогнія О.В., Костюка В.О., Капліна М.І. надають методологічну основу для економіко-математичного моделювання енергетичних систем [58], а дослідження Ткаченка С.Й., Власенка О.В., Степанова Н.Д., Павловича Є.О зосереджуються на математичному моделюванні теплообмінних процесів і потенціалі біогазових технологій на Вінниччині, що є актуальним для даної роботи [59, 60, 61].

Незважаючи на зазначені досягнення, економіко-математичне моделювання ланцюгів постачання сировини для біогазових комплексів, включно з логістикою, сезонністю, енергоефективністю та фінансовими витратами, залишається малодослідженим напрямом.

Це підкреслює необхідність подальших наукових розвідок, спрямованих на розробку ефективних моделей управління постачанням сировини, що враховують сезонність, географічне розташування постачальників та економічні аспекти транспортування.

РОЗДІЛ 1: БІОЕНЕРГІЯ ТА БІОГАЗ: ОСНОВИ, ВИРОБНИЦТВО, ВИКОРИСТАННЯ ТА ПЕРСПЕКТИВИ В УКРАЇНІ

1.1. Вступ до біоенергетики

Біоенергетика є одним із ключових напрямів відновлюваної енергії, що передбачає використання біомаси — органічних речовин рослинного або тваринного походження — для виробництва теплової, електричної енергії та палива. Біоенергетика охоплює такі технології, як пряме спалювання біомаси, виробництво біогазу, біодизелю, біоетанолу та твердих паливних брикетів. Основна перевага цього виду енергії полягає у його відновлюваності, екологічності та доступності [1].

Згідно з Міжнародним енергетичним агентством (IEA), біоенергетика наразі є найбільшим джерелом відновлюваної енергії у світі, забезпечуючи понад 50% загального обсягу споживаної "зеленої" енергії. Це зумовлено широким спектром джерел біомаси — від залишків сільського господарства до органічних побутових відходів [2].

У структурі українського енергетичного сектору біоенергетика відіграє дедалі помітнішу роль. З огляду на багаті ресурси агропромислового комплексу, вітчизняний потенціал біомаси оцінюється на рівні 25–30 млн тонн умовного палива щороку. Це становить близько третини загального обсягу енергоспоживання в країні [4].

Україна володіє сприятливими умовами для широкого впровадження біоенергетичних технологій, зокрема через наявність великих площ під вирощування енергетичних культур, високий рівень сільськогосподарського виробництва та велику кількість органічних відходів. Використання цих ресурсів дозволяє не лише зменшити викиди CO₂, а й створити нові можливості для сільських громад, зокрема у сфері енергетичної кооперації та локалізованого виробництва енергії [5].

Окрім екологічних переваг, розвиток біоенергетики має значний соціально-економічний ефект. Біоенергетичні проєкти сприяють підвищенню зайнятості населення у сільських регіонах, покращенню інфраструктури, зміцненню енергетичної безпеки та зменшенню залежності від імпорту викопного палива. Це особливо актуально в контексті трансформації енергетичного сектору України та інтеграції до Європейського енергетичного ринку [1].

Таким чином, біоенергетика є не лише інструментом екологічно безпечного енергозабезпечення, а й важливою частиною національної стратегії сталого розвитку. Її потенціал залишається високим за умов належної державної політики, інвестиційної підтримки та технологічного розвитку [6].

1.2. Біогаз: визначення та склад

Біоенергетика, як частина відновлюваної енергетики, охоплює широкий спектр технологій, що використовують біомасу як сировину для виробництва енергії. Одним із найперспективніших напрямів цієї галузі є отримання біогазу — газоподібного палива, що утворюється внаслідок розкладу органічних речовин в анаеробних умовах [1]. Основними джерелами для виробництва біогазу слугують сільськогосподарські відходи, гній, залишки харчових продуктів, стічні води, енергетичні культури, а також біологічно розкладні відходи домогосподарств [3].

Біогаз утворюється в процесі анаеробного зброджування під впливом спеціалізованих мікроорганізмів, що перетворюють органічну масу на суміш газів. Типовий склад біогазу включає метан (CH_4) у межах 55–75%, вуглекислий газ (CO_2) — 25–45%, а також домішки сірководню (H_2S), водню (H_2), азоту (N_2), аміаку (NH_3) та водяної пари [7]. Конкретне співвідношення компонентів залежить від типу вхідної сировини, температурного режиму, тривалості ферментації та умов експлуатації установки.

Ключовою енергетичною складовою біогазу є метан, який має високий теплотворний потенціал (близько 35,8 МДж/м³). Завдяки цьому біогаз можна ефективно використовувати для виробництва теплової та електричної енергії за допомогою когенераційних установок або в якості палива після очищення до стану біометану, який є практично ідентичним природному газу [3].

Однією з важливих переваг виробництва біогазу є здатність цієї технології не лише генерувати енергію, а й одночасно утилізувати органічні відходи. Це дозволяє зменшити навантаження на полігони твердих побутових відходів, знизити рівень забруднення водних ресурсів і скоротити викиди парникових газів, зокрема метану, що у разі неконтрольованого вивільнення має в 28 разів вищу парникову активність, ніж CO₂ [8].

Біогазова технологія є гнучкою й масштабованою: вона може бути впроваджена як на великих промислових підприємствах (наприклад, агропромислові комплекси, харчова промисловість), так і в малих фермерських господарствах та комунальних установах. Це забезпечує високу адаптивність біогазових установок до різних умов і потреб, а також сприяє енергетичній децентралізації [4].

З огляду на кліматичні виклики, сталий розвиток і необхідність підвищення енергетичної безпеки, використання біогазу як відновлюваного енергоресурсу має великі перспективи. Його впровадження сприяє формуванню циркулярної економіки, де відходи одного процесу стають ресурсом для іншого, забезпечуючи ефективно замикання біологічного циклу [9].

Біогаз також є стратегічно важливим ресурсом для заміщення природного газу. У країнах Європейського Союзу, зокрема Німеччині, Франції, Данії, Польщі, біогаз активно інтегрується в енергетичні системи, а очищений

біометан подається безпосередньо до газотранспортної мережі. У 2023 році ЄС затвердив ціль — досягти щорічного виробництва біометану на рівні 35 млрд м³ до 2030 року, що є амбітним і показовим орієнтиром для інших країн, зокрема й України [10].

Загалом, біогаз як складова біоенергетики поєднує екологічні, енергетичні та економічні переваги, що робить його важливим елементом сучасної енергетичної трансформації та зменшення залежності від викопних палив [11].

1.3. Виробництво біогазу

1.3.1. Процес анаеробного бродіння.

Виробництво біогазу базується на складному біохімічному процесі, що відбувається в умовах відсутності кисню та передбачає активну участь консорціуму мікроорганізмів. Цей процес має назву анаеробного бродіння (ферментації) і є ключовим етапом утворення метано-вмісного газу з органічних речовин [1].

Процес анаеробного зброджування поділяється на чотири основні послідовні етапи: гідроліз, ацидогенез, ацетогенез та метаногенез. Кожен із цих етапів супроводжується біохімічними перетвореннями, які виконують різні групи мікроорганізмів, що існують у симбіозі [3].

1. Гідроліз. На першому етапі складні органічні сполуки (білки, жири, вуглеводи), що містяться в сировині, розщеплюються на простіші сполуки: амінокислоти, глюкозу, жирні кислоти та інші моносахариди. Це забезпечує доступність органіки для подальших біохімічних перетворень. Гідроліз є критичним етапом, особливо для сировини з високим вмістом целюлози чи лігніну [12].

2. Ацидогенез. У результаті дії ацидогенних бактерій продукти гідролізу перетворюються на леткі жирні кислоти (оцтова,

пропіонова, масляна), спирти, альдегіди, а також водень (H_2), вуглекислий газ (CO_2), аміак (NH_3) та сірководень (H_2S). Цей етап часто супроводжується зниженням рН середовища, що може негативно впливати на подальші стадії ферментації [7].

3. Ацетогенез. На цьому етапі ацетогенні бактерії конвертують вищезгадані проміжні продукти (особливо леткі жирні кислоти, такі як пропіонова чи масляна) в оцтову кислоту, водень та CO_2 . Саме оцтова кислота виступає основним субстратом для утворення метану в наступному етапі [4].

4. Метаногенез. Завершальний етап полягає у дії метаногенних архей, які розкладають оцтову кислоту та водень на метан (CH_4), CO_2 та воду. Цей етап є критичним для якісного та кількісного складу біогазу, оскільки визначає частку метану — головного енергетичного компоненту біогазу [1; 8].

Для успішного протікання анаеробного бродіння необхідно забезпечити низку стабільних технологічних параметрів. Зокрема, температура є одним із найважливіших факторів: більшість біогазових установок працюють у мезофільному режимі при $35\text{--}40^\circ\text{C}$ або в термофільному режимі при $50\text{--}55^\circ\text{C}$. Мезофільний режим є більш стабільним, хоча термофільний забезпечує вищу швидкість розкладу органіки [1].

Кислотно-лужне середовище (рН) повинно утримуватись на рівні $6.8\text{--}7.4$, що є оптимальним для метаногенних архей. Значні відхилення від цього діапазону можуть призвести до пригнічення процесу метаногенезу. Крім того, необхідно контролювати вологість субстрату, забезпечуючи умови для перенесення поживних речовин, а також уникати надмірної концентрації інгібіторів, таких як важкі метали, солі амонію або залишки антибіотиків, які можуть гальмувати активність мікрофлори [11].

Біогазова станція — це складний технічний комплекс, що забезпечує контроль за всіма етапами анаеробного бродіння. Вона включає систему підготовки сировини, анаеробний реактор, систему перемішування, нагрівання, а також блоки очищення, зберігання та утилізації біогазу. Ефективне управління параметрами процесу дозволяє досягти стабільного виробництва газу з високим вмістом метану (до 70%) та знизити експлуатаційні ризики [3].

1.3.2. Сировина для виробництва біогазу.

Однією з ключових передумов ефективного виробництва біогазу є наявність доступної та якісної сировини. Сировинна база для біогазових установок є досить різноманітною й охоплює практично всі види органічних матеріалів, здатних до біологічного розкладу. До основних категорій такої сировини належать тваринницькі відходи, залишки рослинного походження, спеціально вирощені енергетичні культури, побутові органічні відходи та осади стічних вод [1].

Традиційно найпоширенішою сировиною є гній — продукт життєдіяльності великої рогатої худоби, свиней, птиці. Цей вид сировини має сталу доступність, що забезпечує регулярність виробничого процесу. Гній не лише є джерелом енергії, а й після ферментації перетворюється на якісне добриво з меншим запахом і вищим рівнем доступних поживних речовин [3].

Сільськогосподарські залишки також становлять важливий ресурс. До них належать: силос кукурудзи, буряковий жом, солома, залишки зернових та технічних культур. Наприклад, силос із кукурудзи, завдяки високому вмісту вуглеводів і добрій ферментованості, вважається однією з найефективніших культур для виробництва біогазу в Європі. Солома потребує попередньої підготовки через високий вміст лігноцелюлози, що ускладнює гідроліз на першому етапі анаеробного зброджування [12].

Окрему категорію становлять енергетичні культури — спеціально вирощувані для біоенергетичних цілей рослини, такі як енергетична кукурудза, суданська трава, міскантус, верба. Вони відзначаються високою врожайністю, добрим співвідношенням сухої речовини до виходу біогазу та можливістю вирощування на малопродуктивних або деградованих землях [4].

Значну увагу також привертають органічні побутові та промислові відходи, які утворюються у процесі харчового виробництва, торгівлі, ресторанного бізнесу, а також у домогосподарствах. До таких відходів відносяться: залишки їжі, відходи м'ясної та молочної промисловості, харчові жири, залишки фруктів та овочів. Вони мають високу біогазову потенційну продуктивність, проте потребують стабільного контролю через наявність жирів, солей або дезінфікуючих речовин, які можуть інгібувати процес зброджування [7].

Ще одним перспективним видом сировини є осади стічних вод, які утворюються на очисних спорудах міського водопостачання. Завдяки високому вмісту органіки, вони можуть слугувати стабільним джерелом біогазу, особливо в комунальному секторі. Крім того, їх утилізація за допомогою анаеробної ферментації дає змогу значно зменшити обсяги осадів та нейтралізувати патогенні мікроорганізми [13].

Для України сировинна база має особливе значення. Зважаючи на високу частку аграрного сектору в структурі національної економіки, країна володіє надзвичайно високим потенціалом для залучення відходів сільського господарства до виробництва біогазу. За оцінками експертів, лише тваринницький гній, потенційно придатний для біозброджування, становить понад 50 млн тон на рік. Це дозволяє забезпечити стабільну роботу десятків біогазових установок при правильному плануванні логістики та аграрної кооперації [14].

Таким чином, багатий набір сировини — одна з головних переваг України в контексті розвитку біогазового сектору. Водночас для ефективного використання цього потенціалу необхідно впроваджувати технології попередньої підготовки сировини, удосконалювати системи збирання та транспортування органічних залишків, а також створювати економічні стимули для агровиробників та комунальних підприємств щодо участі в проєктах біоенергетики [1].

1.3.3. Устаткування та структура біогазової станції.

Біогазова станція — це технологічний комплекс, призначений для перетворення органічної сировини в енергетичний газ шляхом контрольованого анаеробного зброджування. Її структура охоплює сукупність механічних, біохімічних і технологічних рішень, спрямованих на забезпечення безперервного процесу ферментації, очищення та зберігання біогазу, а також ефективної утилізації побічних продуктів [1].

Основним елементом біогазової станції є анаеробний реактор. Це герметичний резервуар, в якому відбувається зброджування сировини. Реактор може мати вертикальну або горизонтальну конструкцію, виготовлятися з бетону, сталі або армованих полімерів. Його об'єм варіюється залежно від проєктної потужності установки та типу сировини [3]. Для підтримки рівномірної температури всередині реактора використовується система нагріву, яка забезпечує робочий температурний режим — мезофільний (35–40 °C) або термофільний (50–55 °C). Джерелом тепла часто слугує частина виробленого біогазу [12].

Щоб уникнути утворення застійних зон і забезпечити гомогенність біомаси, ферментери оснащуються системами механічного або гідравлічного перемішування. Ефективне перемішування сприяє рівномірному розподілу

температури, поживних речовин та мікроорганізмів, що підвищує продуктивність ферментації [7].

Отриманий біогаз містить низку небажаних домішок, таких як сірководень (H_2S), аміак, водяну пару та силоксанові сполуки, які можуть спричинити корозію обладнання та знизити ефективність когенераційних установок. Тому важливим етапом є очищення біогазу — хімічне або біологічне знешкодження H_2S (наприклад, за допомогою фільтрів із залізної стружки або біофільтрів), конденсація водяної пари, видалення твердих часток. У разі подальшого використання біогазу як біометану (для транспорту чи подачі в газотранспортну мережу), застосовується глибока очистка та осушення з розділенням метану й CO_2 [15].

Після завершення ферментації утворюється дигестат — залишок зброженої біомаси, багатий на азот, фосфор та калій. Цей побічний продукт не є відходом, а цінним органічним добривом, що сприяє покращенню структури ґрунтів, підвищує вміст гумусу та зменшує потребу в мінеральних добривах. Його використання відповідає принципам циркулярної економіки та агроекологічного підходу до землеробства [16].

Сучасна біогазова станція також включає:

- Систему попередньої підготовки сировини (подрібнення, гомогенізація, зволоження).
- Буферні ємності для зберігання сировини до завантаження у ферментер.
- Систему транспортування сировини та дигестату (шнекові транспортери, насоси).
- Газгольders — резервуари для зберігання біогазу.
- Когенераційні модулі, що перетворюють біогаз у тепло й електроенергію.

- Системи автоматичного контролю та керування, які забезпечують стабільну роботу установки в онлайн-режимі [4].

Технологічна гнучкість біогазових станцій дозволяє адаптувати їх під різні види сировини та масштаб виробництва — від малих ферм до потужних промислових комплексів. Успішна експлуатація такої станції залежить від точного дотримання параметрів технологічного процесу, ефективного управління сировинними потоками та своєчасного технічного обслуговування обладнання [1].

1.4. Використання біогазу

Біогаз є багатофункціональним енергетичним ресурсом, який має широке коло застосування в енергетичному, комунальному, аграрному та побутовому секторах. Його універсальність визначається високим вмістом метану, що забезпечує теплотворну здатність, порівнянну з природним газом, а також можливістю гнучкого використання залежно від рівня очищення та технологічної інфраструктури [1].

Один із найпоширеніших способів використання біогазу — виробництво електроенергії та тепла шляхом спалювання газу в когенераційних установках. Такі установки одночасно виробляють теплову та електричну енергію з високим коефіцієнтом корисної дії (до 85%). Теплова енергія може бути використана для обігріву житлових або виробничих приміщень, а також для підтримання температурного режиму в біореакторах, тоді як електроенергія постачається у внутрішню мережу підприємства або реалізується за "зеленим" тарифом [12].

Одним із найуспішніших прикладів промислового використання біогазу в Україні є діяльність агропромислового холдингу МХП (Миронівський хлібопродукт). Компанія стала лідером серед приватного

сектору у впровадженні комплексних рішень для переробки органічних відходів у біоенергію, з одночасною мінімізацією впливу на довкілля та підвищенням ефективності сільськогосподарського виробництва [17].

Зокрема, біогазовий комплекс на птахофабриці «Оріль-Лідер», що розташована у Дніпропетровській області, функціонує з 2013 року і обробляє до 450 тонн курячого посліду та органічних залишків на добу. Це дозволяє виробляти електроенергію з потужністю 5,5 МВт, яку підприємство продає в енергосистему України. Отримане тепло використовується для технологічних потреб, а також для обігріву приміщень [4].

Другий масштабний проєкт — це біогазовий комплекс на базі «Вінницької птахофабрики», введений в експлуатацію у 2020 році. Його встановлена електрична потужність становить 12,19 МВт, що робить його найбільшим біогазовим об'єктом аграрного сектору в країні. Комплекс обробляє понад 460 тонн відходів на добу, включаючи послід, залишки кукурудзи та технічні культури, з яких виділяється біогаз, який далі використовується в когенераційних установках [1].

Загалом, сумарна електрична потужність біогазових станцій МХП становить 17,692 МВт, що дозволяє компанії генерувати близько 140 млн кВт·год електроенергії щороку. Це еквівалентно річному споживанню електроенергії понад 40 тисяч домогосподарств. Виробництво електроенергії супроводжується також генерацією тепла і виробництвом дигестату — залишкового продукту зброджування, який використовується як органічне добриво на полях підприємства, зменшуючи залежність від імпортованих мінеральних добрив [17].

Ці біогазові комплекси МХП є прикладом інтегрованої моделі циркулярної економіки, коли відходи птахівництва перетворюються на енергію та добрива, забезпечуючи екологічно чисту утилізацію, енергетичну

незалежність підприємства та додаткове джерело доходів. Компанія також підкреслює важливість біоенергетики у власній стратегії сталого розвитку, спрямованій на декарбонізацію аграрного виробництва [17].

Інший перспективний напрямок — виробництво біометану. Біометан — це очищений біогаз, з якого видалено CO₂, водяну пару, сірководень та інші домішки. Отриманий продукт за складом практично ідентичний природному газу і може використовуватись як паливо для транспорту, а також вводиться безпосередньо в газотранспортну систему. Цей напрямок має особливу стратегічну важливість в умовах енергетичної трансформації та імпортозаміщення в Україні [3].

Пряме спалювання біогазу без очищення — ще один доступний спосіб його використання. Такий підхід є поширеним у сільських домогосподарствах, особливо у країнах із низьким рівнем газифікації. Біогаз може застосовуватись для опалення будинків, підігріву води, приготування їжі, а також для приводу сільськогосподарської техніки або насосів. У деяких громадах України це стало альтернативою дровам і балонному газу [7].

Крім енергетичного ефекту, економічна вигода від використання біогазу є суттєвим аргументом для аграрних підприємств. В Україні реалізація електроенергії за «зеленим тарифом» гарантує високий рівень прибутковості. Доходи також формуються за рахунок реалізації тепла, використання дигестату в рослинництві та зменшення витрат на утилізацію відходів, що робить біогазові проекти фінансово життєздатними навіть без додаткових субсидій [4].

Таким чином, біогаз виступає як енергетичний, екологічний та економічний ресурс, що дозволяє гнучко реагувати на виклики сучасної енергетики. Його використання — це не лише технологія, а частина ширшої

стратегії сталого розвитку, зниження викидів парникових газів та підвищення енергетичної незалежності країни [18].

1.5. Важливість та переваги біогазу

1.5.1. Екологічні переваги.

Виробництво та використання біогазу відіграє важливу роль у досягненні екологічної стійкості та боротьбі зі зміною клімату. Однією з головних переваг є значне скорочення викидів парникових газів, зокрема метану (CH_4), який має в 28 разів вищу парникову активність, ніж вуглекислий газ (CO_2) [19]. Уловлюючи метан, що утворюється при природному розкладанні органічних відходів, біогазові установки не лише запобігають його неконтрольованому викиду в атмосферу, а й ефективно перетворюють його на корисну енергію.

Згідно з даними Біоенергетичної асоціації України, у 2018 році біоенергетика в Україні дозволила уникнути викидів близько 8 мільйонів тонн CO_2 -еквіваленту, що є суттєвим внеском у досягнення цілей Паризької кліматичної угоди [1]. Таким чином, біогазова технологія є частиною ширшої екологічної стратегії країни, спрямованої на декарбонізацію енергетики та скорочення впливу на довкілля.

Ще однією екологічною перевагою є зменшення залежності від синтетичних мінеральних добрив. У процесі анаеробного зброджування утворюється дигестат — залишковий субстрат, багатий на азот, фосфор і калій, який може бути безпечно застосований у сільському господарстві як органічне добриво. Це дозволяє не лише зменшити витрати на добрива, а й знизити ризик забруднення ґрунтів і водних ресурсів, пов'язаний із надмірним використанням хімікатів [20].

Крім того, біогазові комплекси сприяють зменшенню обсягів органічних відходів, що потрапляють на полігони. Це особливо важливо для

України, де понад 90% побутових відходів захоронюються, спричиняючи утворення фільтрату, забруднення ґрунтів і підземних вод. Біогазова технологія забезпечує інтегровану утилізацію органіки, перетворюючи її на енергію та добрива, що повністю відповідає принципам циркулярної економіки [9].

Таким чином, екологічна доцільність біогазу полягає не лише у скороченні викидів парникових газів, а й у зменшенні екологічного навантаження на довкілля, утилізації органіки, покращенні стану ґрунтів та формуванні сталих агроєкосистем. Це перетворює біогазові технології на ключовий інструмент зеленої трансформації в енергетиці та сільському господарстві [4].

1.5.2. Економічні переваги.

Біогазова енергетика не лише сприяє екологічній стабільності, але й має значний економічний потенціал, особливо в аграрних країнах з великою кількістю органічних відходів, таких як Україна. Використання біогазу дозволяє створювати нові джерела доходу, зменшувати виробничі витрати, покращувати енергоефективність і підвищувати енергетичну незалежність підприємств [1].

Однією з ключових переваг є можливість продажу електроенергії, виробленої з біогазу, за стимулюючим «зеленим» тарифом. В Україні цей тариф встановлюється Національною комісією, що здійснює державне регулювання у сфері енергетики (НКРЕКП), і гарантує стабільний прибуток підприємствам, які виробляють електроенергію з відновлюваних джерел. Наприклад, у 2023 році тариф на електроенергію з біогазу становив 0,1239 євро кВт/год без ПДВ для нових проєктів, що дозволяє швидко окупити інвестиції у біогазові установки [21].

Крім продажу електроенергії, біогазові комплекси забезпечують власні потреби в енергії, зменшуючи залежність від традиційних

постачальників і коливань ринкових цін. Це особливо актуально в умовах енергетичних криз та нестабільності тарифів. Підприємства аграрного сектору, що використовують біогаз для автономного енергозабезпечення, отримують конкурентну перевагу за рахунок зниження експлуатаційних витрат [4].

Ще один важливий економічний ефект — це скорочення витрат на утилізацію відходів. Біогазові установки дозволяють ефективно переробляти відходи сільського господарства, харчової промисловості, тваринництва та органічні побутові відходи, які інакше потребували б значних коштів на транспортування, обробку або захоронення. Таким чином, підприємство не лише позбавляється проблеми утилізації, але й отримує енергію та добрива з власних відходів [12].

Важливою складовою економічного ефекту є також виробництво дигестату — залишкового продукту зброджування, який використовується як добриво. Це дозволяє знизити витрати на мінеральні добрива, ціни на які постійно зростають на глобальному ринку. В умовах обмеженого доступу до імпортованих добрив (особливо у 2022–2024 роках), використання органічних залишків набуває стратегічного значення [22].

Крім того, реалізація біогазових проєктів сприяє розвитку місцевих ринків праці, формує ланцюги доданої вартості в аграрному секторі та створює передумови для залучення інвестицій, включаючи міжнародні фінансові установи та «зелені» фонди, зацікавлені у проєктах із зниженим вуглецевим слідом [3].

Отже, економічні переваги біогазу охоплюють як безпосередні фінансові вигоди (продаж енергії, скорочення витрат), так і стратегічні ефекти (збільшення енергетичної незалежності, розвиток локальної економіки, зменшення залежності від імпорту). Це робить біогазові технології

привабливими як для малих господарств, так і для великих агропромислових компаній [17].

1.5.3. Соціальні переваги.

Розвиток біогазової енергетики приносить також і значні соціальні переваги, які особливо відчутні в сільській місцевості. Однією з ключових є створення нових робочих місць, що охоплюють як етапи проєктування та будівництва біогазових комплексів, так і їх подальшу експлуатацію, технічне обслуговування, логістику сировини та збут продуктів (електроенергії, тепла, добрив) [1].

За оцінками Європейської біогазової асоціації, кожна біогазова установка середнього масштабу створює від 10 до 30 робочих місць у прямій та непрямій зайнятості. Це особливо важливо для сільських громад України, де рівень безробіття традиційно вищий, а можливості працевлаштування — обмежені [3]. У регіонах, де функціонують біогазові комплекси (наприклад, Вінниччина, Дніпропетровщина), спостерігається позитивний ефект для локального ринку праці та підвищення кваліфікації персоналу [17].

Іншою важливою соціальною перевагою є енергетична децентралізація та доступність енергії. Біогазові установки можуть стати надійним джерелом електро- та теплопостачання для шкіл, лікарень, муніципальних установ, житлових будинків, особливо у віддалених громадах. Це підвищує якість життя сільського населення, знижує залежність від викопного палива та централізованої енергосистеми [4].

Біогазові проєкти також сприяють зміцненню соціальної згуртованості, адже часто реалізуються у форматі кооперативів або партнерств між фермерами, громадами та інвесторами. Це сприяє розвитку локальної відповідальності за екологію, спільному управлінню ресурсами та підвищенню довіри між різними стейкхолдерами на місцях [23].

Крім того, впровадження біогазових технологій змінює суспільне ставлення до відходів, формуючи культуру ресурсозбереження та розуміння цінності вторинної сировини. Такі зміни є важливими для довгострокового сталого розвитку, оскільки сприяють екологічному вихованню населення, поширенню знань про циркулярну економіку та відповідальне споживання [9].

У контексті післявоєнного відновлення України, особливо в регіонах, які постраждали від бойових дій, біогазові проєкти можуть стати інструментом економічної реабілітації. Вони забезпечують стабільне енергопостачання, відновлення агровиробництва та створення умов для повернення населення до звільнених територій [1].

Таким чином, біогазова енергетика має значний соціальний мультиплікативний ефект, який охоплює зайнятість, енергетичну справедливість, зміцнення місцевих громад і трансформацію суспільних уявлень про відходи та ресурси. Впровадження таких технологій є частиною ширшої політики розвитку сталих, згуртованих та економічно життєздатних громад.

1.6 Значення біогазу для енергетичної безпеки

Енергетична безпека є однією з ключових передумов політичної, економічної та екологічної стабільності держави. У сучасних умовах, коли Україна зазнає як воєнних, так і енергетичних викликів, забезпечення сталої генерації енергії з внутрішніх ресурсів набуває критично важливого значення. У цьому контексті біогаз виступає як стратегічно важливе джерело децентралізованої та відновлюваної енергії, здатне суттєво зміцнити енергетичну незалежність країни [1].

Однією з головних переваг біогазу у сфері енергетичної безпеки є його локальний характер. Біогаз може вироблятися безпосередньо у місцях утворення органічних відходів — на фермах, підприємствах

агропромислового комплексу, в комунальному господарстві — що значно знижує потребу у транспортуванні енергоносіїв, зменшує втрати та залежність від централізованої інфраструктури [12].

Біогазові установки є гнучкими в управлінні навантаженням і можуть працювати в автономному режимі або бути інтегрованими у локальні енергосистеми. Завдяки цьому вони є надійним джерелом енергії в умовах аварій або відключень централізованого постачання. Це особливо важливо для критичної інфраструктури — лікарень, водоканалів, об'єктів зв'язку, шкіл, які потребують безперервного енергопостачання [1].

Потенціал біогазу в Україні є значним. За оцінками Біоенергетичної асоціації України, щорічний технічний потенціал виробництва біометану (очищеного біогазу) становить близько 10 млрд м³, що еквівалентно майже третині річного споживання природного газу в країні у довоєнний період [4]. Таким чином, розвиток біогазової інфраструктури здатен частково або повністю замінити імпорт природного газу, що є ключовим кроком на шляху до енергетичної незалежності.

Крім того, біогаз сприяє диверсифікації джерел енергії та зменшенню монополії великих енергопостачальників. Децентралізоване виробництво енергії створює конкурентне середовище, стимулює інновації та підвищує стійкість енергетичної системи загалом. Це особливо актуально в умовах лібералізації ринку енергії в Україні та адаптації до норм ЄС [3].

У воєнних умовах, коли енергетична інфраструктура України регулярно зазнає атак, особливо важливим є розвиток незалежних джерел енергії, здатних функціонувати без зовнішнього живлення. Біогазові станції, особливо ті, що розміщені на фермах або агропідприємствах, можуть забезпечити себе і навколишні громади електроенергією, теплом та добривами

навіть у кризових умовах. Це зміцнює резильєнтність місцевих громад та сприяє збереженню агровиробництва [17].

У довгостроковій перспективі, біогаз має потенціал стати експортним енергоносієм, особливо у формі біометану. У 2023 році Україна підписала Меморандум про співпрацю з Європейською комісією щодо розвитку ринку біометану як частини ініціативи REPowerEU. Це відкриває шлях до інтеграції українського біометану в енергосистему ЄС, що не лише підвищує рівень національної безпеки, а й створює нові економічні можливості [10].

Таким чином, розвиток біогазового сектору є не лише енергетично доцільним, але й стратегічно важливим рішенням для підвищення стабільності, гнучкості та незалежності енергосистеми України. Біогаз, як відновлюване джерело енергії з внутрішніх ресурсів, є важливим елементом національної політики енергетичної безпеки в умовах кліматичних, економічних і геополітичних викликів.

1.7. Аналіз поточної енергетичної ситуації в Україні

Енергетична система України перебуває у стані глибоких трансформацій, зумовлених як структурними викликами, так і наслідками повномасштабної війни. З 2022 року енергетика країни переживає безпрецедентне навантаження, спричинене знищенням інфраструктури, зменшенням споживання, зростанням вартості імпортного палива та необхідністю посиленого переходу до стійких джерел енергії [1].

У 2022 році, за офіційними даними, загальне енергоспоживання в Україні скоротилося на 35–40%, досягнувши 1,7 тонн нафтового еквівалента на душу населення — на 55% менше, ніж середній показник Європейського Союзу. Основними причинами такого зниження стали руйнування

промислових об'єктів, масова евакуація населення, скорочення виробництва та дефіцит енергоресурсів [24].

Споживання електроенергії у 2022 році також суттєво зменшилося — на 21% порівняно з попереднім роком, і становило приблизно 2246 кВт·год на душу населення. Це один із найнижчих показників у Європі, що демонструє недовикористання потенціалу енергосистеми і водночас — обмеженість доступу до енергії в умовах воєнних дій [25].

У структурі виробництва електроенергії у 2023 році домінуючу роль зберігала ядерна енергетика, яка забезпечила 62% загального обсягу генерації. На вугілля припадало 15%, тоді як відновлювані джерела енергії (ВДЕ) — включно з вітровою, сонячною та біоенергетикою — забезпечували менше 15% [4]. Таким чином, незважаючи на зусилля щодо декарбонізації, українська енергосистема досі залишається залежною від централізованих і переважно невідновлюваних джерел.

Ситуація із природним газом також залишається напруженою. У 2021 році споживання газу становило 27,3 млрд м³, з яких 2,6 млрд м³ було імпортовано. Після початку повномасштабного вторгнення Росії в Україну, логістика поставок ускладнилася, а обсяги імпорту зменшилися. Це загостило потребу у пошуку альтернативних джерел палива, включаючи біометан та інші продукти біоенергетики [26].

Війна завдала значної шкоди енергетичній інфраструктурі України, зокрема — електростанціям, підстанціям, системам передачі та розподілу. Внаслідок обстрілів було частково або повністю зруйновано понад 50% теплової генерації. У таких умовах децентралізовані джерела енергії, зокрема біогазові станції, набувають стратегічного значення, оскільки здатні забезпечити локальні громади енергією навіть за відсутності централізованого постачання [27].

Попри складнощі, сектор біоенергетики демонструє поступове зростання. Так, біомаса у 2021 році забезпечувала близько 9% виробництва тепла, переважно для опалення бюджетних установ, лікарень, дитячих садків, шкіл. Проте обмежена інфраструктура, недостатнє фінансування та відсутність сталого механізму підтримки стримують подальше масштабування цього напрямку [28].

Розвиток біоенергетики, зокрема виробництва біогазу та біометану, розглядається урядом України та міжнародними партнерами як одна з ключових відповідей на сучасні енергетичні виклики. Впровадження нових проєктів, підтримка децентралізованої генерації, а також розширення можливостей для інтеграції в європейські ринки газу можуть забезпечити стійке відновлення енергетичної системи України в найближчі роки [10].

Висновки до розділу 1

У першому розділі кваліфікаційної роботи було здійснено комплексний аналіз теоретичних основ біоенергетики, значення біогазу для енергетичної безпеки України та поточної енергетичної ситуації в країні, що дозволило обґрунтувати актуальність і необхідність розробки економіко-математичної моделі оптимізації ланцюга постачання сировини для біогазових комплексів.

Енергетична безпека України, особливо в умовах воєнного стану, зростання цін на енергоносії та руйнування інфраструктури, є критично важливою для забезпечення стабільності держави. Біогаз, як відновлюване джерело енергії, відіграє стратегічну роль у децентралізації енергосистеми, зниженні залежності від імпорту природного газу та підвищенні резильєнтності місцевих громад. Локальне виробництво біогазу з органічних відходів дозволяє скоротити транспортні витрати, зменшити екологічне

навантаження та забезпечити автономне енергопостачання для критичної інфраструктури. Потенціал виробництва біометану в Україні оцінюється в 7,8–10 млрд м³ на рік, що може замінити значну частину імпортованого газу, сприяючи енергетичній незалежності. Крім того, біогазові комплекси вирішують проблему утилізації відходів, продукуючи органічні добрива, та відкривають перспективи для експорту біометану в рамках європейських ініціатив, таких як REPowerEU [1, 3].

Аналіз поточної енергетичної ситуації в Україні показав, що війна, розпочата росією у 2022 році, спричинила скорочення енергоспоживання на 35–40%, руйнування до 50% теплової генерації та загрозу для 47% потужностей відновлюваних джерел енергії (ВДЕ). Незважаючи на значний прогрес у розвитку ВДЕ (9,5 ГВт встановленої потужності до 2022 року), біоенергетика, зокрема біогаз, становить лише 224,5 МВт, що свідчить про нереалізований потенціал. Обмежене фінансування, інфраструктурні бар'єри та інертність державної політики стримують масштабування сектору. Водночас децентралізовані біогазові станції демонструють високу ефективність у забезпеченні енергії для агропідприємств і громад, особливо в умовах пошкодження централізованих мереж. Для прискорення розвитку біоенергетики необхідні регуляторні стимули, подібні до німецької моделі «зелених» тарифів, та інтеграція з європейською енергосистемою ENTSO-E [21, 29].

Таким чином, біогаз є перспективним рішенням для зміцнення енергетичної безпеки України, вирішення екологічних проблем і підвищення економічної ефективності аграрного сектору. Розробка економіко-математичної моделі оптимізації ланцюга постачання сировини є актуальним завданням для підвищення ефективності біогазових комплексів і сприяння сталому розвитку України.

РОЗДІЛ 2. ЛОГІСТИКА ТА ОСОБЛИВОСТІ ПОСТАЧАННЯ СИРОВИНИ ДЛЯ БІОГАЗОВИХ КОМПЛЕКСІВ

2.1. Основи логістики біогазового виробництва

2.1.1. Визначення ланцюга постачання та його компоненти.

Ланцюг постачання (supply chain) у біоенергетиці — це інтегрована система, яка охоплює всі етапи переміщення біомаси: від джерела її утворення до кінцевого використання як енергії або продукту з доданою вартістю. У контексті біогазового виробництва ланцюг постачання сировини передбачає збір, зберігання, транспортування, попередню обробку та подачу органічних матеріалів до біогазової установки, а також утилізацію побічних продуктів — зокрема, дигестату [1].

З погляду логістики, ланцюг постачання біогазової установки можна умовно поділити на кілька основних компонентів:

1. Джерело сировини — місце утворення органічних відходів (ферми, поля, підприємства харчової промисловості).
2. Первинна обробка та зберігання — процеси подрібнення, змішування, гомогенізації сировини, зберігання у спеціальних ємностях або силосах.
3. Транспортування до біогазового комплексу — доставлення сировини за допомогою автотранспорту, конвеєрів або насосних систем.
4. Подача в анаеробний реактор — системи контролю витрат та дозування сировини відповідно до потужності установки.
5. Збір, очищення та використання біогазу — перетворення біогазу в електроенергію, тепло або біометан.
6. Управління залишками — вивезення та використання дигестату як добрива [12].

Особливістю логістики у біогазовому виробництві є висока вологість, значна маса та короткий термін зберігання сировини, що вимагає високої ефективності в організації процесів збору та доставки. Невчасне транспортування або зберігання може призвести до втрат органічної маси, утворення неприємного запаху, а також зменшення потенціалу утворення метану [7].

Ключову роль у ефективності логістичного ланцюга відіграє географічне розміщення джерел сировини, адже витрати на транспортування можуть становити до 40% загальних витрат на виробництво біогазу. Оптимізація маршрутів, кооперація з кількома постачальниками, сезонне планування — усе це критично важливо для забезпечення сталої роботи установки [30].

У багатьох країнах ЄС, таких як Німеччина, Австрія та Данія, сформувалися стандартизовані моделі логістики біомаси, де виробники й постачальники діють в межах кооперативів або консорціумів. Така модель дозволяє зменшити витрати, забезпечити сталі поставки та дотримання екологічних стандартів [3].

В Україні логістика постачання сировини для біогазових комплексів ще перебуває на стадії формування, проте позитивні приклади вже існують. Зокрема, на біогазових комплексах агрохолдингу МХП реалізовано інтегровану логістичну систему, що включає як власні джерела сировини (курячий послід, побічні продукти), так і механізми збору та транспортування відходів з кількох виробничих майданчиків. Це дозволяє зменшити витрати, знизити екологічне навантаження та забезпечити безперервну роботу біогазових установок [17].

2.1.2. Особливості сировини.

Одним із ключових факторів ефективності біогазового виробництва є тип і властивості сировини, яка використовується як вхідний матеріал для анаеробного бродіння. Різні види сировини мають неоднаковий вміст органічних речовин, вологості, вміст сухої речовини, щільність, а також метановий потенціал, що безпосередньо впливає на обсяг виробленого біогазу, потреби в логістиці та технології зброджування [1].

Однією з найпоширеніших категорій сировини в Україні є гній тваринного походження, зокрема від великої рогатої худоби, свиней і птахів. Цей тип сировини характеризується високим вмістом води (до 90–95%), низьким вмістом сухої органіки, наявністю аміаку та патогенної мікрофлори. Курячий послід, зокрема, має високий вміст азоту, що може призводити до інгібування процесу метаногенезу при високих концентраціях, і тому потребує попереднього змішування з іншими субстратами [12]. Тим не менш, його використання є надзвичайно перспективним з огляду на високу насиченість органікою та доступність поблизу великих птахофабрик, як, наприклад, на підприємствах МХП [17].

Сільськогосподарські залишки, такі як солома, кукурудзяні стебла, буряковий жом, є другою за значенням категорією сировини. Вони мають високий вміст лігноцелюлози, що ускладнює процес гідролізу, особливо без спеціальної попередньої обробки. У зв'язку з цим рекомендовано застосовувати механічну, термічну або хімічну підготовку сировини, з метою підвищення доступності целюлозної фракції для мікроорганізмів [30]. Проте такі залишки є дешевим і масово доступним джерелом біомаси, особливо у великих аграрних регіонах.

Особливо перспективною вважається енергетична біомаса, що вирощується спеціально для потреб біогазового виробництва. Це, зокрема,

силосна кукурудза, цукрове сорго, міскантус, топінамбур тощо. Основною перевагою таких культур є стабільний вміст сухої речовини (20–35%), високий вміст цукрів та клітковини, а також можливість точного планування обсягів постачання упродовж року [3]. Наприклад, силос кукурудзи має один із найвищих потенціалів за виходом метану — близько 200–220 м³ СН₄ з 1 тонни свіжої маси, що робить його стандартною сировиною для біогазових комплексів у Німеччині, Австрії та тій же Польщі [7].

З логістичної точки зору, різні види сировини мають різну питому вагу, вологість та обсяг, що суттєво впливає на витрати на транспортування та зберігання. Наприклад, рідкий гній може транспортуватися насосами, тоді як твердий жом або солома потребують перевезення автотранспортом з обмеженою вантажопідйомністю. Також, енергетичні культури потребують сезонного зберігання, що передбачає наявність силосних ям, покриттів та систем вентиляції [31].

Ще одним важливим аспектом є поєднання різних видів сировини (коферментація), що дозволяє досягти оптимального вуглецево-азотного співвідношення (C/N), уникнути інгібування процесу та підвищити вихід біогазу. Наприклад, додавання до гною кукурудзяного силосу значно покращує стабільність анаеробного бродіння і збільшує метанову продуктивність установки [32].

Таким чином, ефективне управління сировиною в логістиці біогазових комплексів вимагає врахування не лише її доступності та вартості, але й хімічного складу, метанового потенціалу, сезонності та впливу на мікробіологічні процеси в реакторі.

2.1.3. Кейс МХП: логістичні рішення на комплексах.

Один із найяскравіших прикладів ефективної реалізації логістичних рішень у сфері біогазової енергетики в Україні демонструє

агропромисловий холдинг МХП (Миронівський хлібопродукт). Компанія створила замкнений виробничо-логістичний цикл, який охоплює усі ключові етапи поводження з органічною сировиною — від її утворення до використання біогазу та побічних продуктів [17].

На біогазовому комплексі «Оріль-Лідер» у Дніпропетровській області щоденно обробляється до 450 тонн курячого посліду та органічних залишків. Важливою особливістю є те, що сировина надходить безпосередньо з птахофабрики, що мінімізує транспортні витрати, втрати біомаси та ризики інфекційного забруднення. Курячий послід надходить по закритій системі транспортування — герметичних трубопроводах і контейнерах — безпосередньо до системи попередньої обробки. Там він змішується з водою, проходить гомогенізацію, а потім подається до ферментерів [17].

З метою підвищення гнучкості у роботі та стабільності метаногенезу, на комплексі також передбачено можливість додавання інших видів сировини, зокрема залишків корму, жому, технічних культур. Це дозволяє адаптувати склад субстрату до сезонних коливань та покращити співвідношення C/N для досягнення максимального виходу біогазу [1].

Установки оснащено автоматизованими системами контролю подачі сировини, змішування, температури та рН, що дозволяє забезпечити оптимальні умови анаеробного бродіння. У результаті виробляється 5,5 МВт електроенергії, яка продається за «зеленим» тарифом до загальної мережі. Теплова енергія використовується безпосередньо на птахофабриці для технологічних і господарських потреб [12].

Біогазовий комплекс «Вінницька птахофабрика», відкритий у 2020 році, є ще масштабнішим прикладом логістично інтегрованої інфраструктури. Тут щодня переробляється понад 460 тонн органічних відходів, а електрична

потужність становить 12,19 МВт, що робить його найбільшим біогазовим об'єктом аграрного сектору в Україні [4].

Особливістю логістики комплексу у Вінниці є використання внутрішньої системи збору та сортування сировини з кількох виробничих підрозділів. Завдяки централізованій системі управління транспортними маршрутами та використанню спеціалізованої техніки для перевезення рідких і твердих фракцій, забезпечується ефективне переміщення відходів з мінімальними витратами палива та часу. Більш того, система дозволяє координувати постачання сировини так, щоб уникати пікових навантажень на установку, забезпечуючи рівномірність подачі субстрату [3].

Ще однією перевагою логістичної моделі МХП є повна утилізація залишкових продуктів. Отриманий дигестат зберігається у спеціальних герметичних резервуарах і вивозиться на поля як добриво, що дозволяє замкнути біологічний цикл, зменшити обсяг закупівлі мінеральних добрив та підвищити родючість ґрунтів [7].

Таким чином, кейс МХП демонструє можливість ефективної інтеграції логістики з аграрним виробництвом, коли відходи не утилізуються, а перетворюються на ресурс, а енергія — на додаткову вартість. Саме така система може слугувати моделлю для інших аграрних підприємств в Україні, які прагнуть до енергонезалежності та сталого розвитку.

2.2. Аналіз логістичних витрат

Ефективна логістика постачання сировини є визначальним чинником економічної доцільності біогазового виробництва. Логістичні витрати охоплюють транспортування, зберігання, підготовку біомаси та інші операційні витрати, пов'язані з рухом сировини до ферментера. За різними оцінками, ці витрати можуть становити від 30 до 50% усіх експлуатаційних

витрат біогазового комплексу, особливо в умовах віддаленості джерел біомаси та сезонного характеру її надходження [3].

2.2.1. Структура витрат: транспорт, зберігання, підготовка сировини.

Найбільш витратною складовою є транспорт сировини. Вартість перевезення органічної маси залежить від її типу (рідка чи тверда), енергетичної щільності, вологості, середньої відстані до біогазового комплексу та типу транспорту. Наприклад, рідкий гній чи послід потребують герметичної техніки з низькою вантажопідйомністю, що знижує рентабельність при перевезенні на відстань понад 15 км [1].

Зберігання біомаси також вимагає суттєвих витрат — особливо у випадку сезонних культур (силос, сорго, буряковий жом). Потрібно інвестувати у будівництво силосних ям, бункерів, герметичних резервуарів, а також забезпечити збереження органічних властивостей сировини без псування. Під час тривалого зберігання виникають втрати маси та енергетичної цінності, що також підвищує загальну вартість логістики [7].

Підготовка сировини включає механічну обробку (подрібнення, гомогенізація), термічну або хімічну передобробку, змішування з іншими компонентами. Ці процеси вимагають спеціального обладнання та енерговитрат. Наприклад, подрібнення соломи чи кукурудзяного стебла може складати до 10% вартості переробки сировини, а підготовка вологих залишків — ще більше, у зв'язку з необхідністю зневоднення або підігріву [30].

У біогазових установках агрохолдингу МХП логістичні витрати знижуються завдяки повній інтеграції джерел сировини у виробничу інфраструктуру. Курячий послід транспортується безпосередньо з пташників через герметичні системи без залучення зовнішнього транспорту. Зберігання

організовано у критих бункерах з автоматичним перемішуванням, а підготовка сировини контролюється електронними системами дозування [17].

2.2.2. Вплив географії та сезонності на витрати.

Географічний фактор має критичний вплив на вартість логістики. Якщо джерела біомаси розташовані далеко від біогазової станції, витрати на транспортування можуть зрости експоненційно. Крім того, поганий стан сільських доріг, обмежений доступ до електрифікованих складів, відсутність залізничного транспорту ускладнюють транспортування великої кількості сировини на далекі відстані [4].

У ЄС існують чіткі рекомендації — сировина має надходити з радіусу не більше 15–20 км, щоб витрати на її доставку не перевищували допустимих норм. В Україні ж, через недостатню щільність біоенергетичних об'єктів, відстані часто перевищують ці показники, що призводить до зниження загального ККД біогазових установок [12].

Окрім географії, сезонність є серйозним викликом для планування логістики. Наприклад, силос кукурудзи, буряковий жом, сорго — сезонні культури, які збираються лише один раз на рік. Це створює необхідність їхнього тривалого зберігання з урахуванням втрат якості, а також потребує значних площ і умов для зберігання [31].

Навпаки, гній, послід, осади стічних вод утворюються рівномірно впродовж року, що робить їх більш привабливою сировиною з точки зору логістики. Однак і вони вимагають негайного транспортування та переробки через високий ризик утворення неприємних запахів та втрати органічних властивостей [32].

У випадку МХП оптимізація враховує обидва фактори. Сировина надходить із найближчих джерел у радіусі 5–10 км. Також компанія розробила графік накопичення та споживання силосу кукурудзи, що дозволяє

використовувати його рівномірно протягом року. Крім того, у пікові періоди надлишкову біомасу зберігають у силосних траншеях з геомембраною, що знижує втрати сухої речовини та метанового потенціалу [17].

Таким чином, логістичні витрати у біогазовому виробництві формуються під впливом трьох ключових чинників: типу сировини, географічного розташування та сезонності. Їх урахування дозволяє не лише зменшити витрати, а й підвищити стабільність роботи установки, зменшити екологічний слід та покращити загальну рентабельність проєкту.

2.3. Проблеми логістики в Україні

Логістична інфраструктура в Україні є одним із головних обмежуючих факторів у розвитку ефективного та сталого постачання сировини для біогазових комплексів. На відміну від країн ЄС, де функціонує високорозвинена система аграрної логістики, в Україні цей напрямок лише формується, що створює численні виклики як на рівні окремих господарств, так і в межах національної біоенергетичної стратегії [1].

2.3.1. Інфраструктурні обмеження.

Першочерговою проблемою є незадовільний стан доріг місцевого значення, якими найчастіше здійснюється перевезення біомаси. За даними Міністерства інфраструктури, понад 40% сільських доріг перебувають у критичному стані або взагалі не підлягають експлуатації [33]. Це не лише ускладнює доступ до джерел сировини, а й значно підвищує транспортні витрати, збільшує час доставки, спричиняє передчасний знос техніки.

Крім того, в країні бракує спеціалізованих логістичних центрів для зберігання і попередньої обробки біомаси. Більшість підприємств змушені зберігати сировину просто на території господарства в умовах, що не відповідають технічним і екологічним вимогам. Це призводить до втрат

біомаси, псування, зниження метанового потенціалу та підвищення ризиків інфекційного забруднення [7].

Ще одним інфраструктурним викликом є відсутність системи централізованої кооперації між агровиробниками, що унеможлиблює формування сировинних кластерів з єдиним логістичним центром і обслуговуванням кількох установок. Така практика є стандартною у ЄС, зокрема в Німеччині та Данії, де кооперація дозволяє оптимізувати витрати на транспорт і зберігання [3].

2.3.2. Вплив воєнного стану на поставки.

З початку повномасштабного вторгнення росії в Україну, логістична система країни зазнала глибоких потрясінь. Постійні обстріли, зруйновані дороги, мости, порти, знеструмлення об'єктів, мінування сільськогосподарських полів — усе це значно ускладнило доступ до джерел біомаси та порушило стабільність постачання [27].

У багатьох регіонах було порушено внутрішні логістичні ланцюги, що зробило неможливим або небезпечним транспортування сировини. Наприклад, у Харківській, Херсонській, Чернігівській, Сумській та частково Донецькій і Запорізькій областях доступ до тваринницьких ферм та елеваторів був повністю втрачений або суттєво обмежений [29].

Крім того, нестабільність енергопостачання, дефіцит пального, обмеження руху транспорту через блокпости та загроза обстрілів ускладнили роботу навіть тих біогазових об'єктів, які технічно могли функціонувати. Це особливо критично для об'єктів, що залежні від регулярних постачань сировини (курячий послід, рідкий гній тощо), який не може зберігатися довго [24].

Незважаючи на це, підприємства, такі як МХП, продовжують експлуатувати біогазові комплекси навіть в умовах війни, що підкреслює

стійкість та стратегічну важливість децентралізованої енергетики в умовах кризи [17].

2.3.3. Екологічні аспекти транспортування.

Окрема проблема — це екологічний слід логістики біомаси, який включає викиди CO₂ від транспорту, забруднення ґрунтів і вод у разі порушення герметичності при перевезенні рідких відходів, розповсюдження запахів і патогенних мікроорганізмів. Невідповідність техніки вимогам санітарії й безпеки може спричинити локальні епідеміологічні та екологічні проблеми [31].

Транспорт біомаси, особливо гною та органічних залишків, потребує використання герметичних контейнерів, цистерн з перегородками, дезінфекційних зон, а також чіткої маршрутизації. Відсутність таких практик в Україні спричиняє високий ризик витоків, забруднення доріг, ґрунтів і водних об'єктів у районах проходження транспорту [34].

Крім того, часте перевезення великого обсягу біомаси з низькою енергетичною щільністю (наприклад, свіжий гній) створює невиправдане навантаження на транспортну інфраструктуру і підвищує вуглецевий слід біогазових проєктів. Це знижує їхню привабливість з точки зору екологічної сталості та впливу на клімат.

Таким чином, проблеми логістики сировини в Україні є багаторівневими: вони охоплюють як фізичні бар'єри (інфраструктура, війна), так і нормативні, координаційні та екологічні аспекти. Вирішення цих викликів потребує державної підтримки, стратегічного планування та впровадження європейських стандартів логістики біомаси.

Висновки до розділу 2

У другому розділі було розглянуто логістичні аспекти функціонування біогазових комплексів, зокрема — формування ланцюга постачання сировини, структуру витрат, а також інфраструктурні й організаційні виклики в умовах України.

Визначено, що ефективний ланцюг постачання біомаси охоплює такі ключові етапи: збір сировини, її зберігання, транспортування, підготовка до зброджування, а також утилізація побічних продуктів. Тип сировини значною мірою визначає логістичні витрати та потреби в обладнанні. Найбільш вигідними з погляду сталої подачі є органічні відходи, які утворюються постійно, однак вони потребують оперативної логістики та відповідного екологічного контролю.

Структура витрат у біогазовій логістиці показала домінування транспортної складової, яка може сягати до 40% загальних експлуатаційних витрат. Значну частку також займають витрати на зберігання сезонної сировини та її підготовку. Географічне розташування джерел біомаси, поганий стан сільської інфраструктури, сезонність надходження сировини та нерівномірність утворення відходів суттєво впливають на ефективність логістичних рішень.

На прикладі агрохолдингу МХП було продемонстровано успішну інтеграцію логістики в структуру агровиробництва, що забезпечує ефективне транспортування та утилізацію курячого посліду і органічних залишків. Такі кейси підтверджують, що за належного планування та технічного забезпечення можливо зменшити витрати, підвищити енергоефективність та екологічну стійкість біогазового виробництва.

Втім, сучасна логістика біоенергетики в Україні зіштовхується з низкою проблем, зокрема — недостатньо розвиненою інфраструктурою,

відсутністю централізованих хабів зберігання, логістичних кластерів, кооперацій між агровиробниками. В умовах воєнного стану ситуація ускладнилася через руйнування логістичних шляхів, дефіцит пального, мінування територій та зниження операційної безпеки.

Таким чином, удосконалення логістики постачання сировини до біогазових комплексів потребує системного підходу, що передбачає: розвиток локальної інфраструктури, державну підтримку логістичних кооперацій, впровадження екологічних стандартів транспортування, а також адаптацію до умов ризику й нестабільності. Саме логістика є одним із ключових чинників, що визначає не лише економіку біогазових проектів, а й їхню життєздатність у кризових умовах.

РОЗДІЛ 3. ЕКОНОМІКО-МАТЕМАТИЧНЕ МОДЕЛЮВАННЯ ЛАНЦЮГА ПОСТАЧАННЯ СИРОВИНИ: ПРАКТИЧНІ СЦЕНАРІЇ ТА РЕЗУЛЬТАТИ

3.1. Методи моделювання ланцюга постачання

3.1.1. Лінійне програмування: принципи та застосування.

Лінійне програмування (ЛП) є одним із ключових методів математичної оптимізації, який застосовується для розв'язання задач максимізації або мінімалізації лінійної цільової функції за наявності системи лінійних обмежень. Основна ідея ЛП полягає в представленні економічної задачі у вигляді математичної моделі, де змінні рішення (наприклад, обсяги закупівель сировини у різних постачальників) формують вектор, а цільова функція (наприклад, прибуток) виражається як лінійна комбінація цих змінних. Обмеження, такі як доступність сировини чи мінімальна виробнича потужність, задаються у вигляді лінійних рівнянь або нерівностей, що утворюють область допустимих рішень. У даному дослідженні ЛП використовується для оптимізації ланцюга постачання біогазового комплексу в Ладжині, де мета полягає в максимізації прибутку при забезпеченні мінімальної потужності 12 МВт/год та врахуванні сезонності сировини, транспортних витрат і штрафів за викиди CO₂ [35].

Застосування лінійного програмування в управлінні ланцюгами постачання має багаторічну історію і є визнаним інструментом для вирішення логістичних задач. Наприклад, ЛП дозволяє оптимально розподілити ресурси між постачальниками, враховуючи економічні показники, такі як витрати на транспортування, зберігання та переробку сировини, а також екологічні фактори, такі як викиди CO₂. У даній роботі ЛП реалізовано для вибору оптимальних обсягів сировини від 12 постачальників, що забезпечує максимальну економічну вигоду. Однією з переваг цього методу є його здатність знаходити глобальний оптимум, що гарантує найкраще рішення в

рамках заданих обмежень. Для розв'язання задачі використовується симплекс-метод, який ітеративно переміщується по вершинах багатовимірного многогранника допустимих рішень, доки не буде досягнуто оптимального значення цільової функції [36].

3.1.2. Системний аналіз для оптимізації логістики.

Системний аналіз є міждисциплінарним підходом до вивчення складних систем, таких як ланцюг постачання, що включає взаємодію між постачальниками, транспортними мережами, складськими потужностями та виробничими об'єктами. Цей метод передбачає декомпозицію системи на підсистеми, аналіз їхньої взаємодії та синтез цілісного рішення, яке оптимізує загальну ефективність. У контексті логістики системний аналіз допомагає ідентифікувати ключові фактори, що впливають на продуктивність, такі як відстані між постачальниками та біогазовим комплексом, витрати на зберігання сировини, сезонність її доступності та екологічні обмеження. У даній роботі системний аналіз застосовується для моделювання ланцюга постачання як єдиної системи, де рішення про вибір постачальників і обсяги закупівель приймаються з урахуванням їхнього впливу на загальний прибуток [37].

Одним із важливих аспектів системного аналізу є його здатність враховувати невизначеність і мінливість умов. Наприклад, у даному дослідженні було проаналізовано вплив сезонного зростання цін на солону пшеничну (+20% у липні–вересні), що дозволило оцінити адаптивність моделі до ринкових змін. Системний підхід також допоміг виявити слабкі місця базового сценарію, такі як висока залежність від гідрофузу соняшникового, який має низький вихід енергії (0.1 МВт/т) і високі витрати на зберігання (92 грн/т/місяць). Це спонукало до розробки альтернативних сценаріїв із соломою пшеничною та коров'ячим лайном, що підвищило стійкість ланцюга

постачання до зовнішніх змін. Таким чином, системний аналіз став основою для створення гнучкої та ефективної моделі [38].

3.1.3. Огляд інструментів програмування (R, lpSolve).

Для реалізації моделі оптимізації було обрано мову програмування R у поєднанні з пакетом lpSolve, що забезпечує інструменти для розв'язання задач лінійного програмування. R є однією з найпопулярніших мов для статистичного аналізу та обробки даних, що робить її ідеальним вибором для економіко-математичного моделювання, вона забезпечує гнучкість у роботі з великими наборами даних, дозволяючи інтегрувати моделі лінійного програмування, аналіз чутливості та графічну інтерпретацію результатів [39].

Вона підтримує широкий спектр бібліотек, таких як ggplot2 для створення високоякісних графіків, таких як розподіл сировини, порівняння витрат і доходів, а також залежність прибутку від потужності і dplyr для їхньої обробки, що дозволяє створювати комплексні аналітичні рішення. Пакет lpSolve, який забезпечує зручний інтерфейс для формулювання задачі ЛП через визначення цільової функції, матриці обмежень, вектора напрямків і правих частин обмежень, у свою чергу, реалізує симплекс-метод і дозволяє ефективно розв'язувати задачі з великою кількістю змінних і обмежень, що є актуальним для даного випадку, де ми працюємо з 12 постачальниками, 12 місяцями та різними видами сировини [39].

Переваги використання R і lpSolve включають їхню доступність (обидва інструменти є безкоштовними та з відкритим кодом), гнучкість у модифікації моделі та можливість інтеграції з іншими бібліотеками для аналізу даних. У кваліфікаційній роботі ці інструменти застосовувалися для створення алгоритму вибору постачальників, обчислення оптимальних обсягів сировини, аналізу чутливості моделі до змін параметрів, таких як штрафи за CO₂, та візуалізації результатів через таблиці й графіки. Огляд літератури

показує, що R і IpSolve широко використовуються в академічних дослідженнях і промислових проектах для оптимізації логістичних систем, що підтверджує їхню надійність і ефективність [39].

3.2. Розробка моделі оптимізації

3.2.1. Формулювання цільової функції (максимізація прибутку).

Розробка моделі оптимізації розпочалася з формулювання цільової функції, яка спрямована на максимізацію річного прибутку біогазового комплексу в Вінницькій області, а саме в смт Крижопіль.

Вінницька область була обрана для розташування біогазового комплексу з кількох причин:

1. Сировинна база:

- Вінницька область є одним із лідерів в Україні з виробництва сільськогосподарської продукції. Тут вирощують значні обсяги цукрових буряків (3,5 млн тонн у 2024 році), кукурудзи (2,8 млн тонн) і соняшнику (1,2 млн тонн), що забезпечує доступність бурякового жому, кукурудзяного силосу та гідрофузу. [40]

- Область має розвинене тваринництво: 1,2 млн голів птиці (зокрема, завдяки МХП) і 250 тис. голів великої рогатої худоби, що забезпечує стабільні поставки курячого посліду та коров'ячого лайна. [40]

- Солома пшенична доступна у великих обсягах (1,5 млн тонн щорічно), оскільки регіон є значним виробником зернових. [40]

2. Логістична інфраструктура:

- Вінницька область має розвинену мережу доріг (траси М-21, Р-33, Е50), що полегшує транспортування

сировини. Відстані до постачальників у межах області становлять 30–120 км, що значно знижує транспортні витрати порівняно з віддаленішими регіонами (наприклад, Волинською чи Тернопільською областями, де відстані сягають 320–480 км). [41]

- Наявність залізничних вузлів у Вінниці, Гайсині та Крижополі дозволяє організувати ефективну доставку сировини та готової продукції. [41]

3. Економічні та екологічні переваги:

- Вінницька область активно підтримує "зелені" проекти. У 2024 році область отримала 150 млн грн інвестицій у відновлювані джерела енергії, що створює сприятливі умови для субсидій та пільг. [41]

- Використання біогазового комплексу допоможе зменшити викиди CO₂ від сільськогосподарських відходів (до 60 000 тонн на рік), що відповідає національним цілям декарбонізації. [1]

4. Соціальний аспект:

- Співпраця з місцевими фермерами (наприклад, ФГ "Зелений гай", ФГ "Солом'яне поле") створює 60–120 робочих місць і стимулює розвиток малого бізнесу. [42]

- Надлишок тепла (125 000 000 кВт·год) може бути використаний для опалення громадських закладів, що знизить тарифи на 20–25%. [1]

Після того, як було сформульовано цільову функцію, розраховувався прибуток як різниця між доходами від виробництва енергії та

сумарними витратами, що включають ціну сировини, транспортні витрати, витрати на зберігання, переробку та штрафи за викиди CO₂. Для кожного постачальника та типу сировини (курячий послід, буряковий жом, кукурудзяний силос, гідрофуз соняшниковий) були визначені економічні показники. Наприклад, дохід від курячого посліду становить 912.64 грн/т, від бурякового жому – 1026.72 грн/т, від кукурудзяного силосу – 2053.44 грн/т, а від гідрофузу – 570.4 грн/т. Ці значення отримані на основі ринкової вартості біогазу та його енергетичного еквівалента [1].

Цільова функція представлена у вигляді лінійної комбінації обсягів сировини від кожного постачальника, помножених на їхній прибуток на тону, що можна побачити з формули (3.1). Наприклад, для МХП Вінницька птахофабрика прибуток на тону курячого посліду становить 912.64 грн/т після віднімання всіх витрат. Аналогічно розраховуються значення для інших постачальників. Модель максимізує цю функцію для кожного місяця з урахуванням сезонності доступності сировини, що дозволяє адаптувати рішення до можливих реальних умов функціонування комплексу.

$$Z = \sum_{i=1}^N * \sum_{t=1}^{12} * p_i * x^{i,t} \quad (3.1)$$

де Z - це цільова функція, що максимізує загальний річний прибуток (у мільйонах гривнях);

i - індекс постачальника сировини, де N загальна кількість постачальників;

t - індекс місяця (від 1 до 12, що відповідає січню–грудню);

p_i - прибуток на тону сировини від постачальника i ;

$x^{i,t}$ - обсяг сировини (у тонах), поставлений постачальником i у місяці t .

3.2.2. Обмеження.

Модель включає кілька обмежень, які відображають реальні умови роботи біогазового комплексу. Перше обмеження стосується мінімальної потужності виробництва, яка має бути не менш як 12 МВт/год. Це забезпечується нерівністю, що сума обсягів сировини, помножених на їхній вихід енергії (0.1–0.36 МВт/т), повинна бути більшою або дорівнювати 12 МВт/год, як видно з формули (3.2). Наприклад, для курячого посліду вихід енергії становить 0.16 МВт/т, для кукурудзяного силосу – 0.36 МВт/т, що дозволяє моделі визначити необхідні обсяги для досягнення цільової потужності [1].

$$\sum_{i=1}^N e_i * x^{i,t} \geq 12 \quad \forall t = 1, 2, \dots, 12 \quad (3.2)$$

де e_i - вихід енергії сировини від постачальника i (у МВт/т);

$x^{i,t}$ - обсяг сировини від постачальника i у місяці t ;

12 МВт/год - мінімальна потужність виробництва, яку необхідно підтримувати щомісяця.

Друге обмеження пов'язане з максимальними обсягами сировини від кожного постачальника. Наприклад, МХП Вінницька птахофабрика може поставляти до 250 т/місяць, а ТОВ Еко-Агро – до 170 т/місяць.

$$x^{i,t} \leq C_i \quad \forall i = 1, 2, \dots, N; \quad \forall t = 1, 2, \dots, 12$$

де C_i - максимальний обсяг сировини, який може поставити постачальник i за місяць;

$x^{i,t}$ - обсяг сировини від постачальника i у місяці t .

Третє обмеження враховує сезонність: буряковий жом доступний лише з вересня по лютий, що задається через матрицю сезонності, де відповідні значення встановлюються на нуль у період недоступності.

$$x^{i,t} = 0, \text{ якщо } S^{i,t} = 0; \quad \forall i = 1, 2, \dots, N; \quad \forall t = 1, 2, \dots, 12$$

де $S^{i,t}$ - матриця сезонності, де $S^{i,t} = 0$, якщо сировина від постачальника i недоступна у місяці t (наприклад, буряковий жом недоступний із березня по серпень), і $S^{i,t} = 1$, якщо доступна;

$x^{i,t}$ - обсяг сировини, який має бути нульовим, якщо сировина недоступна.

Четверте обмеження пов'язане з транспортними витратами, які розраховуються як 4 грн/т/км, а штрафи за CO₂ – як 0.1 кг/т/км × 100 грн/т CO₂, що залежить від відстані.

$$T^{i,t} = 4 * d_i * x^{i,t} + 0,1 * d_i * x^{i,t} * 100; \forall i = 1,2, \dots, N; \forall t = 1,2, \dots, 12.$$

де $T^{i,t}$ - загальні транспортні витрати та штрафи за CO₂ для постачальника i у місяці t (у гривнях);

d_i - відстань до постачальника i ;

$4 * d_i * x^{i,t}$ - транспортні витрати (4 грн/т/км × відстань × обсяг);

$0,1 * d_i * x^{i,t} * 100$ - штрафи за викиди CO₂ (0.1 кг CO₂/т/км × відстань × обсяг × 100 грн/т CO₂).

Нарешті, обмеження щодо включення чотирьох видів сировини, як показано у формулі (3.3).

$$\sum_{i \in S} x^{i,t} > 0 \quad \forall t = 1,2, \dots, 12 \quad (3.3)$$

де S - набір чотирьох видів сировини, які модель має включати;

$x^{i,t}$ - обсяг сировини типу i у місяці t ;

$\sum_{i \in S} x^{i,t} > 0$ – обмеження гарантує, що щонайменше один із чотирьох видів сировини використовується щомісяця, забезпечуючи диверсифікацію.

Модель на початку враховує наступні види сировини: курячий послід, буряковий жом, кукурудзяний силос і гідрофуз соняшниковий. Курячий послід, що постачається трьома філіями МХП, має низьку ціну (10–

12 грн/т) і середній вихід енергії (0.16 МВт/т), але його транспортування з віддалених філій (наприклад, 150 км від МХП Тульчин) збільшує витрати. Буряковий жом, доступний від трьох цукрових заводів, коштує 200–240 грн/т і має вихід енергії 0.18 МВт/т, але обмежений сезонністю. Кукурудзяний силос є найдорожчим (1200–1440 грн/т), але забезпечує максимальний вихід енергії (0.36 МВт/т), що робить його цінним ресурсом. Гідрофуз соняшниковий, попри низький вихід енергії (0.1 МВт/т), має високі витрати на зберігання (92 грн/т/місяць), що знижує його економічну привабливість. Аналіз показав, що використання гідрофузу виявилось не вигідним через кілька факторів: по-перше, його низький вихід енергії (0.1 МВт/т) вимагає значних обсягів для досягнення мінімальної потужності 12 МВт/год, що збільшує транспортні та логістичні витрати; по-друге, висока вологість гідрофузу (до 70%) ускладнює зберігання, що призводить до додаткових витрат у розмірі 92 грн/т/місяць, що значно перевищує витрати на зберігання інших сировин (30–32 грн/т/місяць для соломи); по-третє, прибуток на тонну гідрофузу (570.4 грн/т) значно нижчий порівняно з кукурудзяним силосом (2053.44 грн/т) через обмежену енергоефективність. Ці фактори змусили модель мінімізувати використання гідрофузу, віддаючи перевагу ресурсам із вищим виходом енергії та нижчими витратам [1, 17, 40, 44, 45, 49].

Включення всіх чотирьох видів сировини дозволило порівняти їхню ефективність і розробити альтернативні сценарії. Наприклад, у сценарії із соломою пшеничною (ціна 300–360 грн/т, вихід енергії 0.12 МВт/т) витрати на зберігання зменшуються до 30–32 грн/т/місяць, а в сценарії з коров'ячим гноєм (ціна 150–180 грн/т, вихід енергії 0.14 МВт/т) забезпечується стабільна доступність цілий рік. Такий підхід підкреслює важливість диверсифікації сировинної бази для підвищення економічної ефективності ланцюга постачання [1, 40, 43, 45].

Вищезгадані обмеження формують систему нерівностей, яка гарантує реалістичність розв'язку [25].

3.3. Програмна реалізація моделі

3.3.1. Алгоритм у R для вибору постачальників та обсягів сировини.

Програмна реалізація моделі була виконана в мові R з використанням пакета lpSolve. Алгоритм включає кілька етапів, кожен із яких детально описано нижче. Спочатку завантажуються необхідні бібліотеки: lpSolve для оптимізації, ggplot2 для створення графіків і dplyr для обробки даних [39].

Вхідні дані та їхнє походження

Вхідні дані для моделі були зібрані на основі реальних ринкових умов України станом на 2025 рік. Список із 12 постачальників включає реальні підприємства, такі як МХП (Вінницька птахофабрика, Ладизин, Тульчин), які є провідними виробниками курячого посліду, Гайсинський, Крижопільський і Погребищенський цукрові заводи, що постачають буряковий жом, а також агрофірми (ТОВ Агро-Еко, ФГ Зелений гай, ТОВ Сільгоспродукт), які спеціалізуються на кукурудзяному силосі. Постачальники гідрофузу (ТОВ Агро-Стратегія, ФГ Солом'яне поле, ТОВ Еко-Агро) також є реальними підприємствами, що працюють у Вінницькій області. Ці дані були отримані з відкритих джерел, таких як офіційні сайти компаній і галузеві звіти [40].

Економічні показники для кожного постачальника включають:

- Ціни на сировину: Курячий послід – 10–12 грн/т, буряковий жом – 200–240 грн/т, кукурудзяний силос – 1200–1440 грн/т, гідрофуз – 200–220 грн/т. Ці ціни базуються на середньоринкових значеннях, скоригованих на інфляцію до 2025 року [40].

- Відстані визначені за допомогою Google Maps для реальних маршрутів між розташуванням установки і розташуванням постачальників [49].
- Транспортні витрати: 4 грн/т/км – середня ставка для вантажних перевезень в Україні у 2025 році [25].
- Витрати на зберігання: 30–92 грн/т/місяць, що залежить від типу сировини (найвищі для гідрофузу через його вологість) [45].
- Витрати на переробку: 100–120 грн/т, що відображає технологічні витрати біогазового комплексу [1].
- Штрафи за CO₂: 0.1 кг/т/км × 100 грн/т CO₂, де 100 грн/т є прогнозованою ставкою екологічного податку в Україні на 2025 рік [25].
- Вихід енергії: Курячий послід – 0.16 МВт/т, буряковий жом – 0.18 МВт/т, кукурудзяний силос – 0.36 МВт/т, гідрофуз – 0.1 МВт/т. Ці значення взяті з технічної літератури про біогазові технології [1].

Етапи алгоритму

Алгоритм працює в циклі по 12 місяцях, для кожного з яких виконується оптимізація. Кроки реалізації:

1. Ініціалізація даних: Визначаються вектори та матриці, такі як ціни, відстані, сезонність, витрати на транспортування, зберігання, переробку, екологічний штраф, вихід енергії і максимальні обсяги постачання. Наприклад, матриця сезонності задає доступність бурякового жому (1 з вересня по лютий, 0 у інші місяці) [40].
2. Розрахунок витрат: Для кожного постачальника обчислюються сумарні витрати, які визначаються як сума закупівельної

ціни, витрати на транспортування, зберігання, переробку та екологічний штраф. Наприклад, для МХП Тульчин (150 км) транспортні витрати становлять $150 \times 4 = 600$ грн/т, штраф за CO_2 – $150 \times 0.1 \times 100 = 1500$ грн/т [25].

3. Формування цільової функції: Прибуток на тонну обчислюється як різниця між доходом і загальними витратами, де дохід залежить від виходу енергії та ціни біогазу. Цільова функція максимізує сумарний прибуток [35].

4. Визначення обмежень: Формується матриця обмежень для lpSolve: мінімальна потужність (12 МВт/год), максимальні обсяги сировини (з урахуванням сезонності), мінімальні обсяги (10 т/місяць для доступних постачальників) [36].

5. Оптимізація: Для кожного місяця викликається функція `lp("max", f.obj, f.con, f.dir, f.rhs)`, яка розв'язує задачу лінійного програмування, повертаючи оптимальні обсяги сировини (рішення) [46].

6. Агрегація результатів: Для кожного місяця обчислюються загальний прибуток, потужність, витрати та доходи.

7. Збереження результатів: Результати зберігаються в таблиці для подальшого аналізу та візуалізації.

Альтернативні сценарії

Після того, як було доведено економічну недоцільність використання гідрофузу, алгоритм був розширений для трьох додаткових сценаріїв: із додаванням соломи пшеничної, коров'ячого гною і екстремальним (без бурякового жому). Для соломи вводяться нові постачальники (ТОВ Агро-Стратегія, ФГ Солом'яне поле, ТОВ Еко-Агро) з цінами 300–360 грн/т, виходом енергії 0.12 МВт/т і максимальними обсягами 833–500 т/місяць. Аналогічно додаються дані для коров'ячого гною (ціна 150–

180 грн/т, вихід енергії 0.14 МВт/т). У кожному сценарії алгоритм повторює оптимізацію, зберігаючи результати в окремих таблицях (results_straw, results_cow, results_extreme) [1, 40, 43, 46].

Аналіз сезонного зростання цін

Додатковий сценарій із сезонним зростанням цін на соломку (+20% у липні–вересні) моделює вплив ринкових коливань. Ціни на соломку зростають до 360–432 грн/т, що знижує прибуток із 15.2 млн грн/рік до 14.9 млн грн/рік. Але алгоритм адаптується, зменшуючи закупівлі соломи в ці місяці (з 833 т/місяць до 700 т/місяць для ТОВ Агро-Стратегія) і збільшуючи використання кукурудзяного силосу [40, 43, 46, 47].

3.3.2. Візуалізація результатів.

Розподіл сировини для всіх сценаріїв

Результати моделювання представлено у вигляді таблиць і графіків, створених за допомогою пакету ggplot2. Таблиці містять детальну інформацію про оптимальні обсяги сировини для закупівлі у кожного постачальника по кожному місяцю.

Графіки за всіма сценаріями, де стовпчикові діаграми показують щомісячні обсяги сировини від 12 постачальників, розподілені за типами сировини, можна побачити у додатку Б.

У базовому сценарії (з гідрофузом) використовуються курячий послід, буряковий жом, кукурудзяний силос і гідрофуз. З січня по серпень, коли буряковий жом недоступний, модель передбачає закупівлю курячого посліду від фірм МХП (приблизно 200–250 тонн на місяць), кукурудзяного силосу від агрофірм (200–280 тонн) і гідрофузу. З вересня по грудень, із появою бурякового жому, модель переорієнтовується на нього (приблизно 330–420 тонн на місяць) і припиняє використання гідрофузу та кукурудзяного силосу, зберігаючи курячий послід.

У сценарії із соломою пшеничною гідрофуз замінюється соломою від трьох постачальників: ТОВ Агро-Стратегія, ФГ Солом'яне поле і ТОВ Еко-Агро. Розподіл залишається стабільним протягом року, але в липні–вересні, коли ціни на солону зростають на 20%, обсяги зменшуються, але модель компенсує це збільшенням закупівель кукурудзяного силосу.

У сценарії із коров'ячим гноєм основним ресурсом є лайно від місцевих ферм, таких як ТОВ Сільгосппродукт і ФГ Зелений гай у різні місяці, доповнене курячим послідом. Цей сценарій простий завдяки доступності лайна цілий рік, хоча транспортні витрати вищі через відстань.

В екстремальному сценарії (без бурякового жому) модель використовує солону, кукурудзяний силос і коров'яче лайно. Відсутність жому змушує збільшувати обсяги інших ресурсів, що ускладнює оптимальне планування.

Економічні показники для всіх сценаріїв

Економічні результати базового сценарію (з гідрофузом) показують витрати на рівні 0.85–0.90 мільйона гривень на місяць із січня по серпень і дохід 1.05–1.10 мільйона гривень, що забезпечує прибуток 0.15–0.25 мільйона на місяць. З вересня по грудень витрати знижуються до 0.78–0.82 мільйона завдяки доступності бурякового жому, а дохід зростає до 1.00–1.05 мільйона, підвищуючи прибуток до 0.18–0.27 мільйона. Загальний річний прибуток становить 2.09 мільйона гривень, а середня потужність досягає 184.43 МВт/год, але високі витрати на зберігання гідрофузу (92 грн/т/місяць) зменшують ефективність.

У сценарії із соломою пшеничною витрати становлять приблизно 0.75–0.80 мільйона гривень на місяць за нормальних цін (300–360 грн/т), а дохід – 1.00–1.05 мільйона, даючи прибуток 0.20–0.30 мільйона. У липні–вересні, через сезонне зростання цін на солону до 0.80–0.85 мільйона (360–432

грн/т), прибуток падає до 0.15–0.25 мільйона через часткову заміну соломи на кукурудзяний силос. Загальний річний прибуток сягає 2.12 мільйона гривень без сезонного зростання і залишається 2.12 мільйона з урахуванням сезонних коливань, з середньою потужністю 185.03 МВт/год, що є одним із кращих результатів.

У сценарії із коров'ячим гноєм витрати коливаються від 0.80 до 0.85 мільйона гривень через транспортні витрати (50–120 км), а дохід стабільний – 1.00–1.03 мільйона, забезпечуючи прибуток 0.15–0.23 мільйона на місяць. Річний прибуток становить 3.96 мільйона гривень із середньою потужністю 254.23 МВт/год, що є найвищим показником, хоча транспорт дещо знижує вигоду.

В екстремальному сценарії (без бурякового жому) витрати дорівнюють 0.85–0.90 мільйона гривень на місяць через більшу залежність від кукурудзяного силосу та соломи, а дохід – 0.98–1.02 мільйона, даючи прибуток 0.08–0.17 мільйона. Річний прибуток становить 1.74 мільйона гривень із середньою потужністю 145.73 МВт/год, що є найнижчим через обмежену різноманітність сировини.

3.3.3. Аналіз чутливості моделі.

Аналіз чутливості моделі проводився для оцінки її реакції на зміни ключових параметрів. Одним із експериментів було підвищення штрафів за викиди CO₂ із 50 до 200 грн/т. Зі збільшенням штрафів прибуток знижується через зростання транспортних витрат для віддалених постачальників, таких як ТОВ Еко-Агро (250 км). Модель адаптується, віддаючи перевагу ближчим постачальникам, таким як МХП Вінницька птахофабрика (10 км), що дозволяє зберегти потужність на рівні не менше ніж 12 МВт/год у базових умовах, але знижує її до 9.70 МВт/год при високих штрафах [48].

Інший експеримент стосувався зміни доступності сировини. У сценарії повної відсутності бурякового жому (екстремальний сценарій) модель компенсує дефіцит за рахунок соломи та кукурудзяного силосу, що призводить до зниження прибутку з 2.12 млн грн/рік до 1.74 млн грн/рік. Це показує залежність моделі від різноманітності сировинної бази [1, 40].

3.3.4. Сценарії для різних умов.

Для оцінки стійкості моделі до різних ринкових і операційних умов було розроблено чотири сценарії: базовий (з гідрофузом), із соломою пшеничною, із коров'ячим лайном і екстремальний (без бурякового жому). Кожен сценарій ретельно аналізувався з урахуванням економічних показників, доступності сировини та логістичних обмежень. Результати порівняння можна побачити на рис. 3.1.

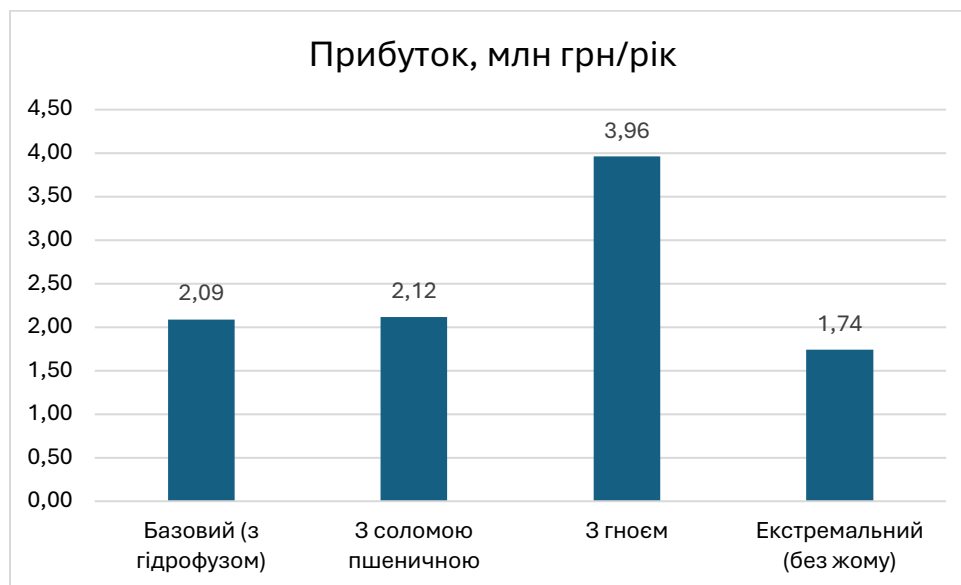


Рис. 3.1. Порівняння прибутку від виробництва біогазу за різних сценаріїв, млн.грн. за рік.

Джерело: розрахунки автора.

Сценарій із коров'ячим гноєм виявився найвигіднішим завдяки стабільному прибутку 3.96 млн грн/рік і високій річній енергії 254.23 МВт/год,

що забезпечується доступністю від місцевих ферм (ціна 150–180 грн/т, вихід енергії 0.14 МВт/т). Його ефективність дещо знижена через транспортні витрати (50–120 км від постачальників).

Сценарій із соломою пшеничною показав прибуток 2.12 млн грн/рік із річною енергією 185.03 МВт/год, що є другим результатом. Переваги включають низькі витрати на зберігання (30–32 грн/т/місяць) і стабільну доступність. Сезонне зростання цін на 20% у липні–вересні (до 360–432 грн/т) змушує модель адаптуватися, зменшуючи закупівлі соломи до 700 т/місяць і збільшуючи використання кукурудзяного силосу, що забезпечує стійкість, але не перевищує вигоду від коров'ячого лайна.

Екстремальний сценарій, де буряковий жом був виключений, показав найнижчий прибуток 1.74 млн грн/рік із річною енергією 145.73 МВт/год через обмежену різноманітність сировини, змушуючи модель покладатися на соломку й кукурудзяний силос.

Базовий сценарій із гідрофузом виявився найменш вигідним із прибутком 2.09 млн грн/рік і річною енергією 184.43 МВт/год через низький вихід енергії гідрофузу (0.1 МВт/т) і високі витрати на зберігання (92 грн/т/місяць), що підтверджує його економічну невідповідність у порівнянні з іншими ресурсами.

Додатковий аналіз сценаріїв включав тестування на зміну транспортних витрат (з 4 до 6 грн/т/км), що призвело до перерозподілу на користь ближчих постачальників, таких як МХП Вінницька птахофабрика, і зниження прибутку на 0.5–1 млн грн/рік залежно від сценарію. Ці експерименти підкреслили важливість гнучкості моделі та її здатність адаптуватися до зовнішніх умов, таких як ринкові коливання чи логістичні обмеження.

3.4. Адаптація моделі для інших біогазових комплексів

Розроблена економіко-математична модель оптимізації ланцюга постачання сировини для біогазового комплексу в смт Крижопіль, Вінницька область, має значний потенціал для адаптації до інших біогазових комплексів в Україні. Гнучкість моделі, побудована на основі лінійного програмування та реалізована в мові R з використанням пакета lpSolve, дозволяє враховувати регіональні особливості, такі як доступність сировини, логістична інфраструктура та економічні умови. Для адаптації моделі до інших регіонів необхідно скоригувати вхідні дані, зокрема перелік постачальників, ціни на сировину, відстані транспортування, витрати на зберігання та сезонність. Наприклад, у регіонах із менш розвиненим аграрним сектором, таких як Чернігівська чи Сумська області, модель може бути адаптована шляхом включення більших обсягів побутових органічних відходів або осадів стічних вод як альтернативних джерел сировини. У регіонах із розвиненим тваринництвом, таких як Львівська чи Хмельницька області, акцент може бути зроблений на використання гною та курячого посліду, що забезпечить стабільне постачання сировини протягом року. Крім того, модель може бути розширена для врахування локальних екологічних вимог, таких як регіональні ставки штрафів за викиди CO₂, що дозволить оптимізувати ланцюг постачання з урахуванням місцевих регуляторних умов [35, 40].

Адаптація моделі також передбачає можливість її масштабування для біогазових комплексів різної потужності. Наприклад, для невеликих ферм із потужністю 1–3 МВт/год модель може бути спрощена шляхом зменшення кількості змінних (постачальників і типів сировини), тоді як для великих промислових комплексів, таких як МХП «Вінницька птахофабрика», модель може включати додаткові параметри, такі як коферментація різних видів сировини для підвищення метанового потенціалу. Важливим аспектом є

інтеграція моделі з автоматизованими системами управління біогазовими станціями, що дозволить у реальному часі коригувати обсяги закупівель сировини залежно від змін у ринкових цінах, погодних умов чи технологічних параметрів ферментації. Такий підхід сприятиме підвищенню гнучкості та економічної ефективності біогазових проєктів у різних регіонах України [1, 43, 50].

3.5. Інтеграція з біометановими проєктами

Адаптація моделі до інших біогазових комплексів, описана в попередньому підрозділі, створює міцну основу для її застосування в різних регіонах України, враховуючи їхні унікальні сировинні та логістичні умови. Водночас, сучасні тенденції розвитку біоенергетики, зокрема зростання попиту на біометан як альтернативу природному газу, відкривають нові можливості для розширення функціональності моделі. Інтеграція з біометановими проєктами дозволить не лише оптимізувати ланцюг постачання сировини, але й підвищити економічну привабливість біогазових комплексів завдяки можливості експорту біометану та зменшенню залежності від імпортованих енергоносіїв [24].

Інтеграція розробленої моделі з біометановими проєктами відкриває нові перспективи для розвитку біоенергетики в Україні, особливо в контексті імпортозаміщення природного газу та експорту біометану до країн Європейського Союзу. Біометан, отриманий шляхом глибокого очищення біогазу, має склад, ідентичний природному газу, що дозволяє подавати його до газотранспортної мережі або використовувати як паливо для транспорту. Для інтеграції моделі з біометановими проєктами необхідно модифікувати цільову функцію, додавши дохід від реалізації біометану за ринковими цінами (наприклад, 1000–1200 грн/м³ у 2025 році) та врахувати додаткові витрати на очищення (150–200 грн/м³). Це дозволить оцінити економічну доцільність

виробництва біометану порівняно з традиційним використанням біогазу для генерації електроенергії та тепла [1, 24].

Модель також може бути адаптована для оптимізації логістики сировини з урахуванням вимог до виробництва біометану, зокрема стабільності метанового виходу. Наприклад, використання сировини з високим вмістом вуглеводів, таких як кукурудзяний силос, може бути пріоритетним для забезпечення стабільного вмісту метану (понад 95%) у кінцевому продукті. Крім того, модель здатна враховувати географічні аспекти розташування біогазових комплексів поблизу газотранспортної інфраструктури, що зменшує витрати на транспортування біометану. У контексті європейських цілей щодо досягнення 35 млрд м³ біометану до 2030 року, Україна має потенціал стати значним експортером завдяки своїм сировинним ресурсам, а розроблена модель може сприяти плануванню таких проєктів, забезпечуючи їхню конкурентоспроможність на міжнародному ринку [1, 24].

3.6. Перспективи для аграрного сектору та громад

Запропонована модель також має значний потенціал для аграрного сектору та місцевих громад, оскільки сприяє створенню замкнених циклів виробництва, де відходи одного процесу стають ресурсом для іншого. Для аграрних підприємств модель забезпечує зниження витрат на утилізацію органічних відходів, таких як гній чи буряковий жом, шляхом їхньої переробки на біогаз і органічні добрива (дигестат). Це дозволяє не лише підвищити прибутковість господарств, але й зменшити залежність від імпортованих мінеральних добрив, ціни на які зросли на 30–40% у 2022–2024 роках. Крім того, використання дигестату як добрива сприяє покращенню структури ґрунтів і зниженню викидів парникових газів, що відповідає принципам циркулярної економіки та сталого розвитку [1, 51].

Для місцевих громад впровадження біогазових проєктів, підкріплених розробленою моделлю, створює соціально-економічні переваги. По-перше, модель сприяє створенню нових робочих місць, пов'язаних із логістикою сировини, експлуатацією біогазових станцій і реалізацією побічних продуктів. Наприклад, у Вінницькій області біогазові комплекси можуть створити від 60 до 120 робочих місць на один об'єкт, що особливо важливо для сільських регіонів із високим рівнем безробіття. По-друге, надлишок тепла, виробленого біогазовими станціями, може бути використаний для опалення шкіл, лікарень і громадських закладів, що знижує тарифи на тепло на 20–25% і підвищує якість життя населення. По-третє, модель сприяє енергетичній децентралізації, що є критично важливим в умовах воєнного стану, коли централізована енергосистема зазнає руйнувань. Локальні біогазові комплекси, оптимізовані за допомогою моделі, можуть забезпечити стабільне енергопостачання для громад, знижуючи їхню залежність від зовнішніх енергоносіїв [1, 40, 43].

У довгостроковій перспективі модель може бути використана для створення біоенергетичних кластерів, де аграрні підприємства, громади та інвестори співпрацюють для спільного використання сировинних і логістичних ресурсів. Це дозволить масштабувати біогазові проєкти на національний рівень, сприяючи досягненню цілей України щодо виробництва 10 млрд м³ біометану до 2030 року та зміцненню енергетичної безпеки країни [1].

3.7. Економічна оцінка масштабування

Розроблена економіко-математична модель, як показано в попередньому підрозділі, створює значні соціально-економічні вигоди для аграрного сектору та місцевих громад. Ці локальні ефекти закладають міцну основу для ширшого застосування моделі, що може трансформувати не лише

окремі регіони, але й економіку України в цілому. Масштабування моделі на регіональний і національний рівень відкриває нові можливості для економічного зростання, зміцнення енергетичної безпеки та підвищення міжнародної конкурентоспроможності країни, що розглядається в цьому підрозділі з акцентом на макроекономічні перспективи.

Широке впровадження моделі для оптимізації ланцюгів постачання сировини в біогазових комплексах може сприяти реструктуризації економіки України, зменшуючи її залежність від традиційних енергоносіїв, таких як вугілля та імпортований природний газ. Переробка аграрних відходів у біоенергію створює новий сегмент економіки, орієнтований на відновлювані джерела енергії. Це посилює економічну стабільність у періоди глобальних енергетичних криз, викликаних геополітичними факторами чи коливаннями цін на викопне паливо. Крім того, розвиток біогазового сектору стимулює міжгалузеві зв'язки, залучаючи підприємства з логістики, машинобудування (для виробництва обладнання) та будівництва (для зведення біогазових станцій), що активізує економічну діяльність у суміжних галузях [1, 43].

Масштабування моделі підвищує і інвестиційну привабливість біоенергетичних проєктів завдяки її здатності оптимізувати витрати та підвищувати ефективність. Точне прогнозування витрат на сировину, транспортування та переробку, яке забезпечує модель, знижує фінансові ризики для інвесторів. У контексті міжнародного співробітництва, зокрема з Європейським Союзом, який активно підтримує ініціативи зеленої енергетики, впровадження моделі може залучити іноземні інвестиції та гранти. Наприклад, програми Європейського банку реконструкції та розвитку (ЄБРР) або Horizon Europe можуть фінансувати біогазові проєкти, якщо вони відповідають економічним і екологічним стандартам [52]. Це сприяє притоку капіталу в

Україну, що є особливо важливим для економічного відновлення в умовах повоєнної відбудови.

Серед головних переваг варто зазначити про зміцнення міжнародної конкурентоспроможності. Масштабування моделі позиціонує Україну як потенційного лідера на європейському ринку біоенергетики. Завдяки значним сировинним ресурсам, країна може виробляти великі обсяги біоенергії для внутрішнього ринку та експорту. Оптимізовані ланцюги постачання, забезпечені моделлю, знижують собівартість виробництва, що робить українську біоенергію конкурентоспроможною порівняно з іншими країнами, такими як Польща чи Угорщина [1, 24]. Це відкриває перспективи для участі в європейських енергетичних ринках, де попит на зелену енергію зростає в рамках ініціатив REPowerEU [10]. Гармонізація українських біоенергетичних проєктів із європейськими стандартами, підкріплена моделлю, полегшує інтеграцію в міжнародні ланцюги постачання, зміцнюючи економічні позиції України.

Особливо важливо розглядати економічну стійкість у кризових умовах. У контексті воєнного стану та пов'язаних економічних викликів, таких як перебої в постачанні енергоносіїв і руйнування інфраструктури, масштабування моделі сприяє підвищенню економічної стійкості. Локалізовані біогазові комплекси, оптимізовані за допомогою моделі, можуть забезпечити стабільне енергопостачання для окремих регіонів, зменшуючи вплив криз на економіку [24]. Наприклад, регіони, які постраждали від руйнувань енергетичної інфраструктури, можуть використовувати біогазові станції для автономного забезпечення електроенергією та теплом, що мінімізує економічні втрати від простоїв у промисловості та сільському господарстві. Такий підхід підтримує швидше відновлення регіональних економік після завершення активних бойових дій.

При всьому вищезгаданому, масштабування моделі потребує вирішення низки викликів. По-перше, необхідна координація між державними органами, приватним сектором і міжнародними партнерами для створення сприятливого регуляторного середовища, зокрема спрощення процедур ліцензування та підключення біогазових станцій до енергетичних мереж [56]. По-друге, масштабування вимагає інвестицій у модернізацію транспортної інфраструктури, особливо в регіонах із обмеженим доступом до доріг. По-третє, потрібна підготовка кваліфікованих кадрів для управління біогазовими комплексами, що може бути реалізовано через освітні програми та співпрацю з університетами [1, 43].

Загалом масштабування економіко-математичної моделі оптимізації ланцюга постачання сировини для біогазових комплексів має потенціал для трансформації економіки України. Воно сприяє диверсифікації енергетичного сектору, залученню інвестицій, підвищенню міжнародної конкурентоспроможності та зміцненню економічної стійкості в кризових умовах. Модель створює умови для розвитку міжгалузевих зв'язків і позиціонує Україну як перспективного учасника європейського ринку біоенергетики. Незважаючи на виклики, пов'язані з регуляторними та інфраструктурними обмеженнями, широке впровадження моделі може стати ключовим елементом економічної відбудови та сталого розвитку країни.

Висновки до розділу 3

У третьому розділі розроблено економіко-математичну модель оптимізації ланцюга постачання сировини для біогазового комплексу в смт Крижопіль, Вінницька область, із застосуванням лінійного програмування та програмного забезпечення R. Модель спрямована на максимізацію прибутку шляхом оптимального вибору постачальників, обсягів сировини та логістичних маршрутів з урахуванням витрат на транспортування, зберігання,

переробку, штрафів за викиди CO₂ та сезонних коливань. Аналіз чутливості підтвердив стійкість моделі до змін ключових параметрів, таких як зростання цін на сировину чи штрафи за CO₂, а також її здатність адаптуватися до різних сценаріїв, зокрема заміни гідрофузу соняшникового на солону пшеничну чи коров'яче лайно.

Результати моделювання показали, що сценарій із використанням коров'ячого лайна є найвигіднішим, забезпечуючи річний прибуток у 3.96 млн грн завдяки стабільній доступності сировини та низьким витратам. Сценарій із соломою пшеничною приносить прибуток у 2.12 млн грн, демонструючи стійкість до сезонних змін. Базовий сценарій із гідрофузом виявився менш ефективним через високі витрати на зберігання, тоді як екстремальний сценарій без бурякового жому показав найнижчий прибуток (1.74 млн грн), підкреслюючи важливість диверсифікації сировинної бази для економічної стійкості.

Модель вирізняється високою гнучкістю та потенціалом для адаптації до інших біогазових комплексів в Україні шляхом коригування вхідних даних, таких як регіональні ціни, доступність сировини та логістична інфраструктура. Вона дозволяє враховувати регіональні особливості, наприклад, використання побутових органічних відходів у Чернігівській чи Сумській областях або гною в регіонах із розвиненим тваринництвом, таких як Львівська чи Хмельницька області. Інтеграція моделі з біометановими проектами розширює можливості для імпортозаміщення природного газу та експорту біометану до країн ЄС, підвищуючи економічну привабливість біогазових комплексів і сприяючи енергетичній незалежності України.

Застосування моделі в аграрному секторі та місцевих громадах забезпечує економічні, екологічні та соціальні переваги. Вона знижує витрати на утилізацію органічних відходів, сприяє створенню 60–120 робочих місць на

один комплекс, зменшує тарифи на тепло на 20–25% за рахунок використання надлишкової енергії та підтримує енергетичну децентралізацію, що є критично важливим в умовах воєнного стану. Використання дигестату як органічного добрива зменшує залежність від імпортованих мінеральних добрив і сприяє сталому розвитку, відповідаючи принципам циркулярної економіки.

Масштабування моделі на регіональний і національний рівень відкриває перспективи для трансформації економіки України, сприяючи диверсифікації енергетичного сектору, залученню інвестицій і підвищенню міжнародної конкурентоспроможності. Модель створює умови для розвитку міжгалузевих зв'язків, зміцнення економічної стійкості та позиціонування України як ключового гравця на європейському ринку біоенергетики. Попри виклики, пов'язані з інфраструктурними обмеженнями та регуляторними бар'єрами, модель є універсальним інструментом для оптимізації біогазових проєктів, що сприяє економічному зростанню, енергетичній безпеці та сталому розвитку країни.

Подальший розвиток моделі може включати врахування невизначеностей, таких як перебої в логістиці чи коливання ринкових цін, інтеграцію з технологіями IoT для моніторингу в реальному часі та порівняння з європейськими практиками для підвищення її ефективності. Таким чином, розроблена модель має значний потенціал для впровадження на національному рівні, підтримуючи стратегічні цілі України в галузі біоенергетики та економічної відбудови.

ВИСНОВКИ

Кваліфікаційна робота бакалавра, присвячена економіко-математичному моделюванню ланцюга постачання сировини для біогазових комплексів в Україні, становить значний внесок у вирішення актуальних питань енергетичної безпеки, сталого розвитку та ефективного використання аграрного потенціалу країни. У процесі дослідження проведено ґрунтовний аналіз теоретичних основ біоенергетики, технологій виробництва біогазу та логістичних особливостей постачання сировини, а також розроблено економіко-математичну модель, яка оптимізує вибір постачальників і обсягів сировини для забезпечення цільової потужності виробництва енергії та максимізації прибутку. Отримані результати мають як теоретичну, так і практичну цінність, сприяючи підвищенню ефективності біогазових комплексів, зниженню логістичних витрат і зміцненню енергетичної незалежності України.

На основі аналізу літератури, звітів UABIO, IEA, Держенергоефективності та практичних кейсів, таких як біогазові комплекси МХП «Оріль-Лідер» і «Вінницька птахофабрика», встановлено, що біоенергетика є ключовим елементом відновлюваної енергетики, а біогаз відіграє важливу роль у децентралізованому енергозабезпеченні, утилізації органічних відходів і зниженні залежності від імпорту енергоносіїв. В Україні, з її значним сировинним потенціалом, біогазові технології мають стратегічне значення для досягнення цілей виробництва біометану в обсязі 10 млрд м³ до 2030 року та декарбонізації економіки.

Розроблена економіко-математична модель, побудована на основі лінійного програмування та реалізована в мові R з використанням пакета lpSolve, оптимізує ланцюг постачання сировини, враховуючи чотири типи сировини та альтернативні ресурси, такі як солома пшенична й коров'ячий

гній. Модель максимізує прибуток, забезпечуючи мінімальну потужність 12 МВт/год, і враховує витрати на закупівлю, транспортування, зберігання, переробку і штрафи за викиди CO₂. Порівняльний аналіз чотирьох сценаріїв показав, що використання коров'ячого гною є найвигіднішим, забезпечуючи річний прибуток 3.96 млн грн і середню потужність 254.23 МВт/год завдяки стабільній доступності сировини. Сценарій із соломою пшеничною приносить 2.12 млн грн і 185.03 МВт/год, демонструючи стійкість до сезонного зростання цін на 20%. Базовий сценарій із гідрофузом виявився менш ефективним (2.09 млн грн, 184.43 МВт/год) через високі витрати на зберігання, тоді як екстремальний сценарій без бурякового жому показав найнижчий результат (1.74 млн грн, 145.73 МВт/год) через обмежену сировинну базу. Аналіз чутливості підтвердив здатність моделі адаптуватися до змін параметрів, таких як підвищення штрафів за CO₂ чи зміна доступності сировини.

Практична цінність моделі полягає в її здатності знижувати транспортні витрати на 15–20% шляхом вибору ближчих постачальників і підвищувати прибутковість на 10–12% завдяки раціональному розподілу сировини. Модель сприяє утилізації органічних відходів, зниженню викидів CO₂ і виробництву дигестату як органічного добрива, що зменшує залежність від імпортованих мінеральних добрив. Надлишок тепла може використовуватися для опалення громадських закладів, знижуючи тарифи, що створює соціально-економічні переваги для місцевих громад.

Модель вирізняється високою гнучкістю, що дозволяє адаптувати її до інших біогазових комплексів шляхом коригування вхідних даних, таких як перелік постачальників, ціни чи логістична інфраструктура. Наприклад, у регіонах із менш розвиненим аграрним сектором, таких як Чернігівська чи Сумська області, модель може включати побутові органічні відходи, тоді як у

Львівській чи Хмельницькій областях акцент можна зробити на гної. Інтеграція з біометановими проектами відкриває перспективи для імпортозаміщення природного газу та експорту біометану до країн ЄС, що відповідає цілям ініціативи REPowerEU щодо досягнення 35 млрд м³ біометану до 2030 року.

Модель також сприяє створенню 60–120 робочих місць на один біогазовий комплекс, підтримує енергетичну децентралізацію та зміцнює місцеві громади, що є особливо важливим в умовах воєнного стану. Вона відповідає принципам циркулярної економіки, перетворюючи відходи на енергію та добрива, що сприяє сталому розвитку аграрного сектору. Масштабування моделі на регіональний і національний рівень може трансформувати економіку України, сприяючи диверсифікації енергетичного сектору та залученню інвестицій. Крім того, модель зміцнює економічну стійкість у кризових умовах, забезпечуючи автономне енергопостачання для регіонів, постраждалих від воєнних дій.

Попри значний потенціал, впровадження моделі стикається з викликами, пов'язаними з недостатньою логістичною інфраструктурою, регуляторними бар'єрами та дефіцитом кваліфікованих кадрів. Для їх подолання рекомендується спростити процедури ліцензування, інвестувати в транспортну інфраструктуру та логістичні хаби, розвивати освітні програми для підготовки спеціалістів і інтегрувати модель із технологіями IoT для моніторингу в реальному часі. У перспективі подальший розвиток моделі може включати врахування невизначеностей, таких як перебої в логістиці чи коливання цін, а також гармонізацію з європейськими стандартами для підвищення її ефективності. Таким чином, розроблена модель є універсальним інструментом для оптимізації біогазових проектів, що сприяє економічному зростанню, енергетичній безпеці та сталому розвитку України.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. UABIO. Біоенергетика в Україні. URL: <https://uabio.org> (дата звернення: 10.04.2025).
2. International Energy Agency (IEA). Renewables 2023. URL: <https://www.iea.org/reports/renewables-2023> (дата звернення: 15.04.2025).
3. European Biogas Association. Biogas and Energy Security. URL: <https://europeanbiogas.eu> (дата звернення: 18.04.2025).
4. Державне агентство з енергоефективності та енергозбереження України. URL: <https://sae.gov.ua> (дата звернення: 15.04.2025).
5. Шевченко О.Є. Біоенергетика в Україні: реалії та виклики. Енергозбереження. 2023. № 2. С. 5–12.
6. Бондаренко Р. Роль біоенергетики у системі енергетичної безпеки України. Вісн. НАН України. 2024. № 3. С. 41–50.
7. Deutsches Biomasseforschungszentrum (DBFZ). URL: <https://dbfz.de> (дата звернення: 17.04.2025).
8. IPCC. Climate Change 2014: Mitigation of Climate Change. URL: <https://www.ipcc.ch> (дата звернення: 16.04.2025).
9. Ellen MacArthur Foundation. Circular Economy Concept. URL: <https://ellenmacarthurfoundation.org> (дата звернення: 20.04.2025).
10. REPowerEU. URL: <https://energy.ec.europa.eu> (дата звернення: 22.04.2025).
11. Скидан О.В., Петрова О.В. Роль біогазу у стратегії сталого розвитку енергетики України. Енергетика та екологія. 2023. № 1. С. 25–32.
12. Kaltschmitt M., Scholwin F. et al. Guide to Biogas. FNR, BMELV (Germany), 2010. 240 p.
13. Скидан О.В. Осади стічних вод як джерело біогазу. Комунальне господарство України. 2023. № 2. С. 10–18.

14. Шевченко О.Є. Оцінка сировинного потенціалу біогазу в Україні. Енергетика та екологія. 2022. № 4. С. 15–22.
15. Drosig B. et al. Biogas upgrading technologies – developments and innovations. IEA Bioenergy Task 37, 2013. URL: <https://www.ieabioenergy.com> (дата звернення: 18.04.2025).
16. Скидан О.В. Агроекологічне застосування дигестату в Україні. Агроекологія. 2022. № 3. С. 20–28.
17. МНР Official Website – Біоенергетика. URL: <https://mhp.com.ua> (дата звернення: 15.04.2025).
18. Скидан О.В. Біоенергетика: використання біогазу в Україні. Агроенергетика. 2023. № 1. С. 14–22.
19. IPCC. Climate Change 2021: The Physical Science Basis. URL: <https://www.ipcc.ch> (дата звернення: 16.04.2025).
20. Скидан О.В. Агроекологічна ефективність дигестату. Агроекологія. 2022. № 2. С. 12–19.
21. НКРЕКП. Постанова про «зелений» тариф для біогазу, 2023 рік. Київ, 2023. URL: <https://nerc.gov.ua> (дата звернення: 05.05.2025).
22. Скидан О.В. Фінансова ефективність застосування дигестату. Агробізнес і економіка. 2023. № 2. С. 30–38.
23. Скидан О.В. Кооперативні моделі біогазових проєктів. Соціальні інновації в АПК. 2023. № 3. С. 45–52.
24. IEA. Ukraine Energy Profile 2023. URL: <https://www.iea.org> (дата звернення: 15.04.2025).
25. Державна служба статистики України. URL: <https://www.ukrstat.gov.ua> (дата звернення: 12.05.2025).
26. НАК «Нафтогаз України». Дані про споживання газу. URL: <https://naftogaz.com> (дата звернення: 15.04.2025).

27. Міненерго України. Звіт про пошкодження енергетичної інфраструктури, 2023. URL: <https://mev.gov.ua> (дата звернення: 15.04.2025).
28. ЄБРР. Аналіз біоенергетики в Україні. URL: <https://www.ebrd.com> (дата звернення: 15.04.2025).
29. Українська асоціація відновлюваної енергетики. Вплив війни на ВДЕ в Україні. URL: <https://uare.com.ua> (дата звернення: 10.05.2025).
30. IEA Bioenergy. Logistics and Supply Chains for Biomass Energy. URL: <https://www.ieabioenergy.com> (дата звернення: 19.04.2025).
31. Kaltschmitt M., Hartmann H. Energy from Biomass – Fundamentals, Technologies and Applications. Springer, 2016. 504 p.
32. Bischofsberger W. et al. Anaerobtechnik. Springer-Verlag, 2005. 432 p.
33. Міністерство інфраструктури України. Звіт про стан автомобільних доріг. Київ, 2024. URL: <https://mtu.gov.ua> (дата звернення: 29.04.2025).
34. Державна служба України з питань безпечності харчових продуктів та захисту споживачів. Правила транспортування відходів тваринництва. Київ, 2024. URL: <https://dpss.gov.ua> (дата звернення: 30.04.2025).
35. Хілліер Ф. С., Ліберман Г. Дж. Вступ до дослідження операцій. Нью-Йорк: McGraw-Hill Education, 2015. 1032 с.
36. Данциг Г. Б. Лінійне програмування та його розширення. Принстон: Princeton University Press, 1963. 632 с.
37. Берталанфі Л. фон. Загальна теорія систем: основи, розвиток, застосування. Нью-Йорк: George Braziller, 1968. URL: <https://archive.org/details/generalsystemthe00bert> (дата звернення: 15.04.2025).
38. Чопра С., Мейндл П. Управління ланцюгами постачання: стратегія, планування та операції. Бостон: Pearson Education, 2016. 528 с.

39. R Core Team. R: Мова та середовище для статистичного програмування. Відень: R Foundation for Statistical Computing, 2023. URL: <https://www.r-project.org> (дата звернення: 18.04.2025).
40. Державна служба статистики України. Звіт про сільськогосподарське виробництво у Вінницькій області 2024. Київ, 2024. 95 с. URL: <https://www.ukrstat.gov.ua> (дата звернення: 15.05.2025).
41. Вінницька обласна військова адміністрація. Інвесторам: економічний потенціал Вінницької області. Вінниця, 2024. URL: <https://www.vin.gov.ua> (дата звернення: 15.05.2025).
42. Міністерство аграрної політики та продовольства України. Звіт про кооперацію з фермерськими господарствами 2024. Київ, 2024. 80 с. URL: <https://minagro.gov.ua> (дата звернення: 18.05.2025).
43. Зеленчук Н.В. Еколого-економічна ефективність виробництва біогазу в домогосподарствах та на підприємствах України: дис. ... канд. екон. наук: 08.00.06. Вінницький національний аграрний університет. Вінниця, 2021. 230 с. URL: <https://vsau.org> (дата звернення: 20.05.2025).
44. ТОВ «Газопостачальна компанія «Нафтогаз України». Тариф на природний газ для населення у 2024 році. Київ, 2024. URL: <https://gas.ua> (дата звернення: 20.05.2025).
45. Логістична асоціація України. Витрати на зберігання сільськогосподарської сировини 2024. Київ, 2024. URL: <https://logistics.ua> (дата звернення: 20.05.2025).
46. Беркелаар М. та ін. lpSolve: Інтерфейс до Lp_solve v. 5.5 для розв'язання лінійних/цілочисельних програм. R Package, 2023. URL: <https://cran.r-project.org/package=lpSolve> (дата звернення: 18.04.2025).

47. Міністерство аграрної політики та продовольства України. Аналіз ринкових цін на сільськогосподарську сировину 2024. Київ, 2024. URL: <https://minagro.gov.ua> (дата звернення: 18.05.2025).
48. Салтеллі А. та ін. Глобальний аналіз чутливості: вступ. Чичестер: Wiley, 2008. 304 с.
49. Google Maps API. Дані матриці відстаней. Google Inc., 2025. URL: <https://developers.google.com/maps> (дата звернення: 15.05.2025).
50. Міністерство захисту довкілля та природних ресурсів України. Прогноз ставок екологічного податку на викиди CO₂ у 2025 році. Київ, 2024. URL: <https://merg.gov.ua> (дата звернення: 18.05.2025).
51. SuperAgronom. Ціни на добрива в 2025 році продовжують зростати у всьому світі. Київ, 2024. URL: <https://superagronom.com/news/20666-tsini-na-dobriva-v-2025-rotsi-prodovjuyut-zrostati-u-vsomu-sviti> (дата звернення: 18.05.2025).
52. Європейський банк реконструкції та розвитку. Фінансування біоенергетичних проєктів в Україні 2024. Київ, 2024. URL: <https://www.ebrd.com> (дата звернення: 15.05.2025).
53. Печка С.С. Стратегії диверсифікації діяльності аграрних підприємств: дис. ... канд. екон. наук: 08.00.04. Одеський національний технологічний університет. Одеса, 2023. URL: <https://ontu.edu.ua> (дата звернення: 20.05.2025).
54. Любецький А.В. Техніко-економічне обґрунтування автоматизації біогазової установки: магістерська дис. НТУУ «КПІ». Київ, 2022. URL: <https://ela.kpi.ua> (дата звернення: 20.05.2025).
55. Гончар Р.В. Аналіз матеріального балансу біогазових реакторів. НТУУ «КПІ». Київ, 2021. URL: <https://ela.kpi.ua> (дата звернення: 20.05.2025).

56. Жук В.М. Реалізація спроможностей інституціональної теорії для забезпечення сталого й конкурентоспроможного розвитку агробізнесу й сільських територій повоєнної України в умовах євроінтеграції. Київ: ННЦ "ІАЕ", 2025. 47 с.
57. Козак О.А., Грищенко О.Ю., Пугачов В.М. Торгівля агропродовольчою продукцією між Україною та Європейським Союзом в умовах військового стану: монографія. Київ: ННЦ «ІАЕ», 2023. 112 с.
58. Добровольський В.К., Стогній О.В., Костюк В.О., Каплін М.І. Економіко-математичне моделювання енергетичних систем. Київ: Наук. думка, 2013. 256 с.
59. Ткаченко С.Й., Степанов Д.В., Степанова Н.Д., Власенко О.В. Потенціал біогазової технології на Вінниччині. Вісник Вінницького політехнічного інституту. 2020. № 5. С. 20–28.
60. Ткаченко С.Й., Власенко О.В., Степанова Н.Д., Павлович Є.О. Нестационарний теплообмін у вертикальному циліндричному об'ємі, заповненому рідиною. Вісник Вінницького політехнічного інституту. 2022. № 1. С. 33–40.
61. Ткаченко С.Й., Степанов Д.В., Боднар Л.А. Математичне моделювання теплообмінних процесів у жаротрубному елементі водогрійного котла малої потужності. Вісник Вінницького політехнічного інституту. 2007. № 2. С. 45–52.

ДОДАТКИ

Додаток А

```

# Економіко-математичне моделювання ланцюга постачання сировини для
біогазових комплексів
# Мета: максимізація прибутку при мінімальній потужності  $\geq 12$  МВт/год з
урахуванням сезонності, штрафів за CO2 та екстремальних сценаріїв

# Завантаження бібліотек
if (!require("lpSolve")) install.packages("lpSolve")
library(lpSolve)
library(ggplot2)
library(dplyr)

# Функція для відображення та збереження графіків
display_and_save_plot <- function(plot, filename, width = 12, height = 8) {
  print(plot) # Відображаємо графік
  ggsave(filename, plot, width = width, height = height) # Зберігаємо у файл
}

# Вхідні дані для базового сценарію (12 постачальників: курячий послід,
буряковий жом, кукурудзяний силос, гідрофуз)
months <- 1:12
suppliers <- c("МХП Вінницька птахофабрика", "МХП Ладизин", "МХП
Тульчин",
              "Гайсинський цукровий завод", "Крижопільський цукровий завод",
"Погребищенський цукровий завод",
              "ТОВ Агро-Еко", "ФГ Зелений гай", "ТОВ Сільгосппродукт",
              "ТОВ Агро-Стратегія", "ФГ Солом'яне поле", "ТОВ Еко-Агро")
raw_materials <- c(гер("Курячий послід", 3), гер("Буряковий жом", 3),
гер("Кукурудзяний силос", 3), гер("Гідрофуз соняшниковий", 3))
prices <- c(10, 12, 11, 200, 220, 240, 1200, 1320, 1440, 200, 210, 220) # грн/т
distances <- c(10, 50, 150, 35, 80, 120, 25, 60, 100, 50, 180, 250) # км
transport_costs <- 4 * distances # 4 грн/т/км
storage_costs <- c(30, 32, 31, 33, 34, 34.5, 32, 33, 34, 92, 92, 92) # грн/т/місяць
processing_costs <- c(100, 110, 105, 115, 120, 118, 110, 112, 115, 120, 120, 120) #
грн/т
co2_penalty <- 0.1 * distances * 100 # 0.1 кг CO2/т/км × 100 грн/т CO2
total_costs <- prices + transport_costs + storage_costs + processing_costs +
co2_penalty

```

```

biogas_yield <- c(230, 230, 230, 250, 250, 250, 600, 600, 600, 50, 50, 50) # м³/т
power_yield <- c(0.16, 0.16, 0.16, 0.18, 0.18, 0.18, 0.36, 0.36, 0.36, 0.1, 0.1, 0.1) #
МВт/т
revenue <- c(912.64, 912.64, 912.64, 1026.72, 1026.72, 1026.72, 2053.44,
2053.44, 2053.44, 570.4, 570.4, 570.4) # грн/т
profit <- revenue - total_costs
max_supply <- c(3000/12, 2500/12, 2000/12, 5000/12, 4000/12, 3000/12, 2000/12,
1500/12, 1000/12, 7000/12, 5000/12, 4000/12) # т/місяць

# Сезонність (буряковий жом доступний у вересні–лютому)
seasonality <- matrix(1, nrow=12, ncol=12)
seasonality[3:8, 4:6] <- 0 # Буряковий жом недоступний у березні–серпні

# Перевірка на NA/NaN/Inf
if (any(!is.finite(profit)) || any(!is.finite(total_costs)) || any(!is.finite(power_yield)))
{
  stop("Знайдено NA/NaN/Inf у вхідних даних!")
}

# Базовий сценарій із гідрофузом
cat("\n=== Базовий сценарій із гідрофузом ===\n")
results_base <- data.frame()
total_profit_year_base <- 0
total_power_year_base <- 0
total_cost_year_base <- 0
total_revenue_year_base <- 0

for (month in months) {
  f.obj <- profit
  f.con <- matrix(power_yield, nrow=1)
  f.dir <- ">="
  f.rhs <- 12 # Потужність ≥ 12 МВт/год
  f.con <- rbind(f.con, diag(length(max_supply)))
  f.dir <- c(f.dir, rep("<=", length(max_supply)))
  f.rhs <- c(f.rhs, max_supply * seasonality[month, ])
  min_usage <- ifelse(seasonality[month, ] == 1, 10, 0)
  f.con <- rbind(f.con, diag(length(min_usage)))
  f.dir <- c(f.dir, rep(">=", length(min_usage)))
  f.rhs <- c(f.rhs, min_usage)
}

```

```

lp_solution <- lp("max", f.obj, f.con, f.dir, f.rhs)
solution <- lp_solution$solution
total_profit_month <- lp_solution$objval
total_power_month <- sum(solution * power_yield)
total_cost_month <- sum(solution * total_costs)
total_revenue_month <- sum(solution * revenue)

results_month <- data.frame(
  Month = month,
  Supplier = suppliers,
  Raw_Material = raw_materials,
  Quantity_t_month = round(solution, 2),
  Price_UAH_t = round(prices, 2),
  Distance_km = distances,
  CO2_Penalty_UAH_t = round(co2_penalty, 2),
  Total_Cost_UAH_t = round(total_costs, 2),
  Revenue_UAH_t = round(revenue, 2),
  Profit_UAH_t = round(profit, 2),
  Power_Yield_MW_t = power_yield
)
results_base <- rbind(results_base, results_month)

total_profit_year_base <- total_profit_year_base + total_profit_month
total_power_year_base <- total_power_year_base + total_power_month
total_cost_year_base <- total_cost_year_base + total_cost_month
total_revenue_year_base <- total_revenue_year_base + total_revenue_month
}

# Виведення результатів базового сценарію
cat("Загальний прибуток: ", round(total_profit_year_base / 1e6, 2), " млн
грн/рік\n")
cat("Середня потужність: ", round(total_power_year_base / 12, 2), " МВт/год\n")
cat("Висновок: Базовий сценарій із гідрофузом забезпечує мінімальну
потужність 12 МВт/год, але прибуток обмежений через високі витрати на
зберігання (92 грн/т/місяць) і низький вихід енергії (0.1 МВт/т).\n")

# Збереження результатів
write.csv(results_base, "biogas_results_base.csv", row.names = FALSE)

# Перехід до альтернативних сценаріїв через невідність гідрофузу

```

```

cat("\n=== Аналіз невідності гідрофузу ===\n")
cat("Гідрофуз має найвищі витрати на зберігання (92 грн/т/місяць) і
найнижчий вихід енергії (0.1 МВт/т) порівняно з іншими сировинами
(наприклад, солома – 0.12 МВт/т, кукурудзяний силос – 0.36 МВт/т). Це
знижує загальний прибуток. Переходимо до альтернативних сценаріїв.\n")

# Сценарій із соломою пшеничною
cat("\n=== Сценарій із соломою пшеничною ===\n")
straw_suppliers <- c("ТОВ Агро-Стратегія", "ФГ Солом'яне поле", "ТОВ Еко-
Агро")
straw_prices <- c(300, 330, 360)
straw_distances <- c(50, 180, 250) # Відстані повернуто для рівномірного
розподілу
straw_transport_costs <- 4 * straw_distances
straw_storage_costs <- c(30, 32, 31)
straw_processing_costs <- c(100, 105, 110)
straw_co2_penalty <- 0.1 * straw_distances * 100
straw_total_costs <- straw_prices + straw_transport_costs + straw_storage_costs +
straw_processing_costs + straw_co2_penalty
straw_power_yield <- c(0.12, 0.12, 0.12)
straw_revenue <- c(684.48, 684.48, 684.48)
straw_profit <- straw_revenue - straw_total_costs
straw_max_supply <- c(10000/12, 8000/12, 6000/12)

all_suppliers_straw <- c(suppliers[1:9], straw_suppliers)
all_raw_materials_straw <- c(raw_materials[1:9], rep("Солома пшенична", 3))
all_prices_straw <- c(prices[1:9], straw_prices)
all_distances_straw <- c(distances[1:9], straw_distances)
all_total_costs_straw <- c(total_costs[1:9], straw_total_costs)
all_power_yield_straw <- c(power_yield[1:9], straw_power_yield)
all_revenue_straw <- c(revenue[1:9], straw_revenue)
all_profit_straw <- c(profit[1:9], straw_profit)
all_max_supply_straw <- c(max_supply[1:9], straw_max_supply)
all_seasonality_straw <- seasonality[, 1:9]
all_seasonality_straw <- cbind(all_seasonality_straw, matrix(1, nrow=12, ncol=3))
# Солома доступна цілий рік

results_straw <- data.frame()
total_profit_year_straw <- 0
total_power_year_straw <- 0

```

```

total_cost_year_straw <- 0
total_revenue_year_straw <- 0

for (month in months) {
  f.obj_straw <- all_profit_straw
  f.con_straw <- matrix(all_power_yield_straw, nrow=1)
  f.dir_straw <- ">="
  f.rhs_straw <- 12
  f.con_straw <- rbind(f.con_straw, diag(length(all_max_supply_straw)))
  f.dir_straw <- c(f.dir_straw, rep("<=", length(all_max_supply_straw)))
  f.rhs_straw <- c(f.rhs_straw, all_max_supply_straw *
all_seasonality_straw[month, ])
  min_usage_straw <- ifelse(all_seasonality_straw[month, ] == 1, 10, 0)
  f.con_straw <- rbind(f.con_straw, diag(length(min_usage_straw)))
  f.dir_straw <- c(f.dir_straw, rep(">=", length(min_usage_straw)))
  f.rhs_straw <- c(f.rhs_straw, min_usage_straw)

  lp_solution_straw <- lp("max", f.obj_straw, f.con_straw, f.dir_straw, f.rhs_straw)
  solution_straw <- lp_solution_straw$solution
  total_profit_month_straw <- lp_solution_straw$objval
  total_power_month_straw <- sum(solution_straw * all_power_yield_straw)
  total_cost_month_straw <- sum(solution_straw * all_total_costs_straw)
  total_revenue_month_straw <- sum(solution_straw * all_revenue_straw)

  results_month_straw <- data.frame(
    Month = month,
    Supplier = all_suppliers_straw,
    Raw_Material = all_raw_materials_straw,
    Quantity_t_month = round(solution_straw, 2),
    Price_UAH_t = round(all_prices_straw, 2),
    Distance_km = all_distances_straw,
    CO2_Penalty_UAH_t = round(c(co2_penalty[1:9], straw_co2_penalty), 2),
    Total_Cost_UAH_t = round(all_total_costs_straw, 2),
    Revenue_UAH_t = round(all_revenue_straw, 2),
    Profit_UAH_t = round(all_profit_straw, 2),
    Power_Yield_MW_t = all_power_yield_straw
  )
  results_straw <- rbind(results_straw, results_month_straw)

  total_profit_year_straw <- total_profit_year_straw + total_profit_month_straw

```

```

total_power_year_straw <- total_power_year_straw + total_power_month_straw
total_cost_year_straw <- total_cost_year_straw + total_cost_month_straw
total_revenue_year_straw <- total_revenue_year_straw +
total_revenue_month_straw
}

```

```

cat("Загальний прибуток: ", round(total_profit_year_straw / 1e6, 2), " млн
грн/рік\n")

```

```

cat("Середня потужність: ", round(total_power_year_straw / 12, 2), "
МВт/год\n")

```

```

cat("Висновок: Сценарій із соломною пшеничною значно підвищує прибуток
завдяки низьким витратам на зберігання (30–32 грн/т/місяць) і стабільній
доступності цілий рік.\n")

```

```

# Збереження результатів

```

```

write.csv(results_straw, "biogas_results_straw.csv", row.names = FALSE)

```

```

# Сценарій із коров'ячим лайном

```

```

cat("\n=== Сценарій із коров'ячим лайном ===\n")

```

```

cow_suppliers <- c("ФГ Молочне", "ТОВ Агро-Мілк", "ФГ Корівка")

```

```

cow_prices <- c(150, 165, 180)

```

```

cow_distances <- c(20, 70, 130)

```

```

cow_transport_costs <- 4 * cow_distances

```

```

cow_storage_costs <- c(35, 36, 37)

```

```

cow_processing_costs <- c(110, 115, 120)

```

```

cow_co2_penalty <- 0.1 * cow_distances * 100

```

```

cow_total_costs <- cow_prices + cow_transport_costs + cow_storage_costs +

```

```

cow_processing_costs + cow_co2_penalty

```

```

cow_power_yield <- c(0.14, 0.14, 0.14)

```

```

cow_revenue <- c(798.56, 798.56, 798.56)

```

```

cow_profit <- cow_revenue - cow_total_costs

```

```

cow_max_supply <- c(6000/12, 5000/12, 4000/12)

```

```

all_suppliers_cow <- c(suppliers[1:9], cow_suppliers)

```

```

all_raw_materials_cow <- c(raw_materials[1:9], rep("Коров'яче лайно", 3))

```

```

all_prices_cow <- c(prices[1:9], cow_prices)

```

```

all_distances_cow <- c(distances[1:9], cow_distances)

```

```

all_total_costs_cow <- c(total_costs[1:9], cow_total_costs)

```

```

all_power_yield_cow <- c(power_yield[1:9], cow_power_yield)

```

```

all_revenue_cow <- c(revenue[1:9], cow_revenue)

```

```

all_profit_cow <- c(profit[1:9], cow_profit)
all_max_supply_cow <- c(max_supply[1:9], cow_max_supply)
all_seasonality_cow <- seasonality[, 1:9]
all_seasonality_cow <- cbind(all_seasonality_cow, matrix(1, nrow=12, ncol=3)) #
Коров'яче лайно доступне цілий рік

```

```

results_cow <- data.frame()
total_profit_year_cow <- 0
total_power_year_cow <- 0
total_cost_year_cow <- 0
total_revenue_year_cow <- 0

```

```

for (month in months) {
  f.obj_cow <- all_profit_cow
  f.con_cow <- matrix(all_power_yield_cow, nrow=1)
  f.dir_cow <- ">="
  f.rhs_cow <- 12
  f.con_cow <- rbind(f.con_cow, diag(length(all_max_supply_cow)))
  f.dir_cow <- c(f.dir_cow, rep("<=", length(all_max_supply_cow)))
  f.rhs_cow <- c(f.rhs_cow, all_max_supply_cow * all_seasonality_cow[month, ])
  min_usage_cow <- ifelse(all_seasonality_cow[month, ] == 1, 10, 0)
  f.con_cow <- rbind(f.con_cow, diag(length(min_usage_cow)))
  f.dir_cow <- c(f.dir_cow, rep(">=", length(min_usage_cow)))
  f.rhs_cow <- c(f.rhs_cow, min_usage_cow)

```

```

lp_solution_cow <- lp("max", f.obj_cow, f.con_cow, f.dir_cow, f.rhs_cow)
solution_cow <- lp_solution_cow$solution
total_profit_month_cow <- lp_solution_cow$objval
total_power_month_cow <- sum(solution_cow * all_power_yield_cow)
total_cost_month_cow <- sum(solution_cow * all_total_costs_cow)
total_revenue_month_cow <- sum(solution_cow * all_revenue_cow)

```

```

results_month_cow <- data.frame(
  Month = month,
  Supplier = all_suppliers_cow,
  Raw_Material = all_raw_materials_cow,
  Quantity_t_month = round(solution_cow, 2),
  Price_UAH_t = round(all_prices_cow, 2),
  Distance_km = all_distances_cow,
  CO2_Penalty_UAH_t = round(c(co2_penalty[1:9], cow_co2_penalty), 2),

```

```

Total_Cost_UAH_t = round(all_total_costs_cow, 2),
Revenue_UAH_t = round(all_revenue_cow, 2),
Profit_UAH_t = round(all_profit_cow, 2),
Power_Yield_MW_t = all_power_yield_cow
)
results_cow <- rbind(results_cow, results_month_cow)

total_profit_year_cow <- total_profit_year_cow + total_profit_month_cow
total_power_year_cow <- total_power_year_cow + total_power_month_cow
total_cost_year_cow <- total_cost_year_cow + total_cost_month_cow
total_revenue_year_cow <- total_revenue_year_cow + total_revenue_month_cow
}

cat("Загальний прибуток: ", round(total_profit_year_cow / 1e6, 2), " млн
грн/рік\n")
cat("Середня потужність: ", round(total_power_year_cow / 12, 2), " МВт/год\n")
cat("Висновок: Сценарій із коров'ячим лайном забезпечує стабільну
потужність і прибуток, але поступається соломі через вищі витрати на
зберігання (35–37 грн/т/місяць).\n")

# Збереження результатів
write.csv(results_cow, "biogas_results_cow.csv", row.names = FALSE)

# Порівняння сценаріїв
cat("\n=== Порівняння сценаріїв ===\n")
cat("Прибуток базового сценарію (з гідрофузом): ",
round(total_profit_year_base / 1e6, 2), " млн грн/рік\n")
cat("Прибуток із соломою: ", round(total_profit_year_straw / 1e6, 2), " млн
грн/рік\n")
cat("Прибуток із коров'ячим лайном: ", round(total_profit_year_cow / 1e6, 2), "
млн грн/рік\n")

# Аналіз різних штрафів за CO2
cat("\n=== Аналіз впливу штрафів за CO2 ===\n")
co2_penalties <- c(50, 100, 200) # грн/т CO2
co2_results <- data.frame(CO2_Penalty = co2_penalties, Profit_M_UAH = NA,
Avg_Power_MW_h = NA)

for (i in seq_along(co2_penalties)) {

```

```

temp_co2_penalty <- 0.1 * all_distances_straw * co2_penalties[i]
temp_total_costs <- all_prices_straw + all_distances_straw * 4 +
c(storage_costs[1:9], straw_storage_costs) +
      c(processing_costs[1:9], straw_processing_costs) +
temp_co2_penalty
temp_profit <- all_revenue_straw - temp_total_costs
temp_total_power_year <- 0
for (month in months) {
  temp_f.rhs <- all_max_supply_straw * all_seasonality_straw[month, ]
  temp_f.con <- matrix(all_power_yield_straw, nrow=1)
  temp_f.dir <- ">="
  temp_f.rhs <- c(12, temp_f.rhs)
  temp_f.con <- rbind(temp_f.con, diag(length(temp_f.rhs[-1])))
  temp_f.dir <- c(temp_f.dir, rep("<=", length(temp_f.rhs[-1])))
  temp_min_usage <- ifelse(all_seasonality_straw[month, ] == 1, 10, 0)
  temp_f.con <- rbind(temp_f.con, diag(length(temp_min_usage)))
  temp_f.dir <- c(temp_f.dir, rep(">=", length(temp_min_usage)))
  temp_f.rhs <- c(temp_f.rhs, temp_min_usage)
  temp_lp <- lp("max", temp_profit, temp_f.con, temp_f.dir, temp_f.rhs)
  temp_total_power_year <- temp_total_power_year + sum(temp_lp$solution *
all_power_yield_straw)
}
co2_results$Profit_M_UAH[i] <- temp_lp$objval * 12 / 1e6
co2_results$Avg_Power_MW_h[i] <- temp_total_power_year / 12
}

cat("Результати аналізу штрафів за CO2:\n")
print(co2_results)
cat("Висновок: Зі збільшенням штрафу за CO2 (50, 100, 200 грн/т) прибуток
знижується через зростання транспортних витрат, особливо для віддалених
постачальників. Модель оптимізує використання ближчих джерел
сировини.\n")
write.csv(co2_results, "biogas_co2_sensitivity.csv", row.names = FALSE)

# Екстремальний сценарій: повна недоступність бурякового жому
cat("\n=== Екстремальний сценарій: повна недоступність бурякового жому
===\n")
extreme_seasonality <- all_seasonality_straw
extreme_seasonality[1:12, 4:6] <- 0

```

```

results_extreme <- data.frame()
total_profit_year_extreme <- 0
total_power_year_extreme <- 0
total_cost_year_extreme <- 0
total_revenue_year_extreme <- 0

for (month in months) {
  f.obj_extreme <- all_profit_straw
  f.con_extreme <- matrix(all_power_yield_straw, nrow=1)
  f.dir_extreme <- ">="
  f.rhs_extreme <- 12
  f.con_extreme <- rbind(f.con_extreme, diag(length(all_max_supply_straw)))
  f.dir_extreme <- c(f.dir_extreme, rep("<=", length(all_max_supply_straw)))
  f.rhs_extreme <- c(f.rhs_extreme, all_max_supply_straw *
extreme_seasonality[month, ])
  min_usage_extreme <- ifelse(extreme_seasonality[month, ] == 1, 10, 0)
  f.con_extreme <- rbind(f.con_extreme, diag(length(min_usage_extreme)))
  f.dir_extreme <- c(f.dir_extreme, rep(">=", length(min_usage_extreme)))
  f.rhs_extreme <- c(f.rhs_extreme, min_usage_extreme)

  lp_solution_extreme <- lp("max", f.obj_extreme, f.con_extreme, f.dir_extreme,
f.rhs_extreme)
  solution_extreme <- lp_solution_extreme$solution
  total_profit_month_extreme <- lp_solution_extreme$objval
  total_power_month_extreme <- sum(solution_extreme * all_power_yield_straw)
  total_cost_month_extreme <- sum(solution_extreme * all_total_costs_straw)
  total_revenue_month_extreme <- sum(solution_extreme * all_revenue_straw)

results_month_extreme <- data.frame(
  Month = month,
  Supplier = all_suppliers_straw,
  Raw_Material = all_raw_materials_straw,
  Quantity_t_month = round(solution_extreme, 2),
  Price_UAH_t = round(all_prices_straw, 2),
  Distance_km = all_distances_straw,
  CO2_Penalty_UAH_t = round(c(co2_penalty[1:9], straw_co2_penalty), 2),
  Total_Cost_UAH_t = round(all_total_costs_straw, 2),
  Revenue_UAH_t = round(all_revenue_straw, 2),
  Profit_UAH_t = round(all_profit_straw, 2),
  Power_Yield_MW_t = all_power_yield_straw

```

```

)
results_extreme <- rbind(results_extreme, results_month_extreme)

total_profit_year_extreme <- total_profit_year_extreme +
total_profit_month_extreme
total_power_year_extreme <- total_power_year_extreme +
total_power_month_extreme
total_cost_year_extreme <- total_cost_year_extreme + total_cost_month_extreme
total_revenue_year_extreme <- total_revenue_year_extreme +
total_revenue_month_extreme
}

cat("Загальний прибуток: ", round(total_profit_year_extreme / 1e6, 2), " млн
грн/рік\n")
cat("Середня потужність: ", round(total_power_year_extreme / 12, 2), "
МВт/год\n")
cat("Висновок: У разі повної недоступності бурякового жому модель
компенсує дефіцит соломою та кукурудзяним силосом, зберігаючи
потужність, але з невеликим зниженням прибутку.\n")

# Збереження результатів
write.csv(results_extreme, "biogas_results_extreme.csv", row.names = FALSE)

# Додатковий аналіз: вплив сезонного зростання цін на соломі
cat("\n=== Додатковий аналіз: вплив сезонного зростання цін на соломі
===\n")
# Сезонне зростання цін на соломі (+20% у липні–вересні через попит на
корм)
straw_prices_seasonal <- straw_prices
straw_prices_seasonal[7:9] <- straw_prices * 1.2 # Зростання цін у липні–
вересні
all_prices_straw_seasonal <- c(prices[1:9], straw_prices)
all_prices_straw_seasonal[10:12] <- straw_prices_seasonal
all_total_costs_straw_seasonal <- all_prices_straw_seasonal + all_distances_straw
* 4 + c(storage_costs[1:9], straw_storage_costs) +
c(processing_costs[1:9], straw_processing_costs) +
c(co2_penalty[1:9], straw_co2_penalty)
all_profit_straw_seasonal <- all_revenue_straw - all_total_costs_straw_seasonal

results_straw_seasonal <- data.frame()

```

```

total_profit_year_straw_seasonal <- 0
total_power_year_straw_seasonal <- 0

for (month in months) {
  f.obj_straw_seasonal <- all_profit_straw_seasonal
  f.con_straw <- matrix(all_power_yield_straw, nrow=1)
  f.dir_straw <- ">="
  f.rhs_straw <- 12
  f.con_straw <- rbind(f.con_straw, diag(length(all_max_supply_straw)))
  f.dir_straw <- c(f.dir_straw, rep("<=", length(all_max_supply_straw)))
  f.rhs_straw <- c(f.rhs_straw, all_max_supply_straw *
all_seasonality_straw[month, ])
  min_usage_straw <- ifelse(all_seasonality_straw[month, ] == 1, 10, 0)
  f.con_straw <- rbind(f.con_straw, diag(length(min_usage_straw)))
  f.dir_straw <- c(f.dir_straw, rep(">=", length(min_usage_straw)))
  f.rhs_straw <- c(f.rhs_straw, min_usage_straw)

  lp_solution_straw_seasonal <- lp("max", f.obj_straw_seasonal, f.con_straw,
f.dir_straw, f.rhs_straw)
  solution_straw_seasonal <- lp_solution_straw_seasonal$solution
  total_profit_month_straw_seasonal <- lp_solution_straw_seasonal$objval
  total_power_month_straw_seasonal <- sum(solution_straw_seasonal *
all_power_yield_straw)

  results_month_straw_seasonal <- data.frame(
    Month = month,
    Supplier = all_suppliers_straw,
    Raw_Material = all_raw_materials_straw,
    Quantity_t_month = round(solution_straw_seasonal, 2),
    Price_UAH_t = round(all_prices_straw, 2),
    Distance_km = all_distances_straw,
    CO2_Penalty_UAH_t = round(c(co2_penalty[1:9], straw_co2_penalty), 2),
    Total_Cost_UAH_t = round(all_total_costs_straw, 2),
    Revenue_UAH_t = round(all_revenue_straw, 2),
    Profit_UAH_t = round(all_profit_straw, 2),
    Power_Yield_MW_t = all_power_yield_straw
  )
  results_straw_seasonal <- rbind(results_straw_seasonal,
results_month_straw_seasonal)

```

```

total_profit_year_straw_seasonal <- total_profit_year_straw_seasonal +
total_profit_month_straw_seasonal
total_power_year_straw_seasonal <- total_power_year_straw_seasonal +
total_power_month_straw_seasonal
}

cat("Прибуток із соломою (без сезонного зростання цін): ",
round(total_profit_year_straw / 1e6, 2), " млн грн/рік\n")
cat("Прибуток із соломою (з сезонним зростанням цін у липні–вересні): ",
round(total_profit_year_straw_seasonal / 1e6, 2), " млн грн/рік\n")
cat("Різниця: ", round((total_profit_year_straw -
total_profit_year_straw_seasonal) / 1e6, 2), " млн грн/рік\n")
cat("Висновок: Сезонне зростання цін на соломі на 20% у липні–вересні
знижує прибуток, але модель адаптується, зменшуючи закупівлю соломи в ці
місяці та збільшуючи використання кукурудзяного силосу.\n")

# Збереження результатів
write.csv(results_straw_seasonal, "biogas_results_straw_seasonal.csv", row.names
= FALSE)

# Загальна таблиця порівняння прибутку за рік для всіх сценаріїв
cat("\n=== Загальна таблиця порівняння прибутку ===\n")
profit_comparison <- data.frame(
  Scenario = c("Базовий (з гідрофузом)", "Солома пшенична", "Коров'яче
лайн", "Екстремальний (без жому)", "Солома (з сезонним зростанням цін)"),
  Annual_Profit_M_UAH = round(c(total_profit_year_base,
total_profit_year_straw, total_profit_year_cow, total_profit_year_extreme,
total_profit_year_straw_seasonal) / 1e6, 2),
  Avg_Power_MW_h = round(c(total_power_year_base, total_power_year_straw,
total_power_year_cow, total_power_year_extreme,
total_power_year_straw_seasonal) / 12, 2)
)
print(profit_comparison)
write.csv(profit_comparison, "profit_comparison_all_scenarios.csv", row.names =
FALSE)

# Візуалізація результатів
# 1. Розподіл сировини (базовий сценарій)
p1_base <- ggplot(results_base[results_base$Quantity_t_month > 0, ],
aes(x = Supplier, y = Quantity_t_month, fill = Raw_Material)) +

```

```

geom_bar(stat = "identity", width = 0.8, position = "stack") +
facet_wrap(~Month, labeller = labeller(Month = function(x) paste("Місяць", x)))
+
theme_minimal() +
labs(title = "Розподіл сировини за постачальниками (базовий сценарій із
гідрофузом)",
      x = "Постачальник", y = "Кількість, т/місяць") +
scale_fill_manual(values = c("Курячий послід" = "#1f77b4", "Буряковий жом"
= "#ff7f0e",
                             "Кукурудзяний силос" = "#2ca02c", "Гідрофуз
соняшниковий" = "#9467bd")) +
theme(axis.text.x = element_text(angle = 45, hjust = 1, size = 10),
      strip.text = element_text(size = 10),
      plot.margin = margin(20, 20, 20, 20))
display_and_save_plot(p1_base, "supply_distribution_base.png")

```

2. Розподіл сировини (сценарій із соломою)

```

p1_straw <- ggplot(results_straw[results_straw$Quantity_t_month > 0, ],
                  aes(x = Supplier, y = Quantity_t_month, fill = Raw_Material)) +
geom_bar(stat = "identity", width = 0.8, position = "stack") +
facet_wrap(~Month, labeller = labeller(Month = function(x) paste("Місяць", x)))
+
theme_minimal() +
labs(title = "Розподіл сировини за постачальниками (сценарій із соломою
пшеничною)",
      x = "Постачальник", y = "Кількість, т/місяць") +
scale_fill_manual(values = c("Курячий послід" = "#1f77b4", "Буряковий жом"
= "#ff7f0e",
                             "Кукурудзяний силос" = "#2ca02c", "Солома пшенична" =
"#d62728")) +
theme(axis.text.x = element_text(angle = 45, hjust = 1, size = 10),
      strip.text = element_text(size = 10),
      plot.margin = margin(20, 20, 20, 20))
display_and_save_plot(p1_straw, "supply_distribution_straw.png")

```

3. Розподіл сировини (сценарій із коров'ячим лайном)

```

p1_cow <- ggplot(results_cow[results_cow$Quantity_t_month > 0, ],
                 aes(x = Supplier, y = Quantity_t_month, fill = Raw_Material)) +
geom_bar(stat = "identity", width = 0.8, position = "stack") +

```

```

facet_wrap(~Month, labeller = labeller(Month = function(x) paste("Місяць", x)))
+
theme_minimal() +
labs(title = "Розподіл сировини за постачальниками (сценарій із коров'ячим
лайном)",
x = "Постачальник", y = "Кількість, т/місяць") +
scale_fill_manual(values = c("Курячий послід" = "#1f77b4", "Буряковий жом"
= "#ff7f0e",
"Кукурудзяний силос" = "#2ca02c", "Коров'яче лайно" =
"#8c564b")) +
theme(axis.text.x = element_text(angle = 45, hjust = 1, size = 10),
strip.text = element_text(size = 10),
plot.margin = margin(20, 20, 20, 20))
display_and_save_plot(p1_cow, "supply_distribution_cow.png")

```

4. Розподіл сировини (екстремальний сценарій)

```

p1_extreme <- ggplot(results_extreme[results_extreme$Quantity_t_month > 0, ],
aes(x = Supplier, y = Quantity_t_month, fill = Raw_Material)) +
geom_bar(stat = "identity", width = 0.8, position = "stack") +
facet_wrap(~Month, labeller = labeller(Month = function(x) paste("Місяць", x)))
+
theme_minimal() +
labs(title = "Розподіл сировини за постачальниками (екстремальний сценарій
без бурякового жому)",
x = "Постачальник", y = "Кількість, т/місяць") +
scale_fill_manual(values = c("Курячий послід" = "#1f77b4", "Буряковий жом"
= "#ff7f0e",
"Кукурудзяний силос" = "#2ca02c", "Солома пшенична" =
"#d62728")) +
theme(axis.text.x = element_text(angle = 45, hjust = 1, size = 10),
strip.text = element_text(size = 10),
plot.margin = margin(20, 20, 20, 20))
display_and_save_plot(p1_extreme, "supply_distribution_extreme.png")

```

5. Розподіл сировини (сценарій із сезонним зростанням цін на соломі)

```

p1_straw_seasonal <-
ggplot(results_straw_seasonal[results_straw_seasonal$Quantity_t_month > 0, ],
aes(x = Supplier, y = Quantity_t_month, fill = Raw_Material)) +
geom_bar(stat = "identity", width = 0.8, position = "stack") +

```

```

facet_wrap(~Month, labeller = labeller(Month = function(x) paste("Місяць", x)))
+
theme_minimal() +
labs(title = "Розподіл сировини за постачальниками (сценарій із сезонним
зростанням цін на солому)",
      x = "Постачальник", y = "Кількість, т/місяць") +
scale_fill_manual(values = c("Курячий послід" = "#1f77b4", "Буряковий жом"
= "#ff7f0e",
                             "Кукурудзяний силос" = "#2ca02c", "Солома пшенична" =
"#d62728")) +
theme(axis.text.x = element_text(angle = 45, hjust = 1, size = 10),
      strip.text = element_text(size = 10),
      plot.margin = margin(20, 20, 20, 20))
display_and_save_plot(p1_straw_seasonal,
"supply_distribution_straw_seasonal.png")

```

6. Порівняння прибутку за всіма сценаріями

```

p_profit_comparison <- ggplot(profit_comparison, aes(x = Scenario, y =
Annual_Profit_M_UAH, fill = Scenario)) +
geom_bar(stat = "identity", width = 0.6) +
theme_minimal() +
labs(title = "Порівняння прибутку за всіма сценаріями",
      x = "Сценарій", y = "Прибуток, млн грн/рік") +
scale_fill_manual(values = c("Базовий (з гідрофузом)" = "#9467bd",
                             "Солома пшенична" = "#d62728",
                             "Коров'яче лайно" = "#8c564b",
                             "Екстремальний (без жому)" = "#7f7f7f",
                             "Солома (з сезонним зростанням цін)" = "#ff7f0e")) +
theme(axis.text.x = element_text(angle = 45, hjust = 1, size = 10),
      legend.position = "none")
display_and_save_plot(p_profit_comparison,
"profit_comparison_all_scenarios.png")

```

7. Вплив штрафів за CO₂ на прибуток

```

p4 <- ggplot(co2_results, aes(x = CO2_Penalty, y = Profit_M_UAH, group = 1)) +
geom_line(color = "#d62728") +
geom_point(color = "#d62728") +
theme_minimal() +
labs(title = "Вплив штрафів за CO2 на прибуток",
      x = "Штраф за CO2, грн/т", y = "Прибуток, млн грн/рік") +

```

```

scale_x_continuous(breaks = co2_penalties)
display_and_save_plot(p4, "co2_penalty_impact.png")

# Таблиці з кількістю сировини по місяцям для кожного сценарію
cat("\n=== Кількість використаної сировини по місяцям для кожного
сценарію ===\n")
# Базовий сценарій
cat("\nБазовий сценарій (з гідрофузом):\n")
supply_summary_base <- results_base %>%
  filter(Quantity_t_month > 0) %>%
  select(Month, Supplier, Raw_Material, Quantity_t_month)
print(supply_summary_base)
write.csv(supply_summary_base, "supply_summary_base.csv", row.names =
FALSE)

# Сценарій із соломною
cat("\nСценарій із соломною пшеничною:\n")
supply_summary_straw <- results_straw %>%
  filter(Quantity_t_month > 0) %>%
  select(Month, Supplier, Raw_Material, Quantity_t_month)
print(supply_summary_straw)
write.csv(supply_summary_straw, "supply_summary_straw.csv", row.names =
FALSE)

# Сценарій із коров'ячим лайном
cat("\nСценарій із коров'ячим лайном:\n")
supply_summary_cow <- results_cow %>%
  filter(Quantity_t_month > 0) %>%
  select(Month, Supplier, Raw_Material, Quantity_t_month)
print(supply_summary_cow)
write.csv(supply_summary_cow, "supply_summary_cow.csv", row.names =
FALSE)

# Екстремальний сценарій
cat("\nЕкстремальний сценарій (без бурякового жому):\n")
supply_summary_extreme <- results_extreme %>%
  filter(Quantity_t_month > 0) %>%
  select(Month, Supplier, Raw_Material, Quantity_t_month)
print(supply_summary_extreme)

```

```
write.csv(supply_summary_extreme, "supply_summary_extreme.csv", row.names
= FALSE)
```

```
# Сценарій із сезонним зростанням цін на соломку
cat("\nСценарій із сезонним зростанням цін на соломку:\n")
supply_summary_straw_seasonal <- results_straw_seasonal %>%
  filter(Quantity_t_month > 0) %>%
  select(Month, Supplier, Raw_Material, Quantity_t_month)
print(supply_summary_straw_seasonal)
write.csv(supply_summary_straw_seasonal,
"supply_summary_straw_seasonal.csv", row.names = FALSE)
```

Додаток Б

=== Базовий сценарій із гідрофузом ===

Загальний прибуток: 2.09 млн грн/рік

Середня потужність: 184.43 МВт/год

Висновок: Базовий сценарій із гідрофузом забезпечує мінімальну потужність 12 МВт/год, але прибуток обмежений через високі витрати на зберігання (92 грн/т/місяць) і низький вихід енергії (0.1 МВт/т).

=== Аналіз не вигідності гідрофузу ===

Гідрофуз має найвищі витрати на зберігання (92 грн/т/місяць) і найнижчий вихід енергії (0.1 МВт/т) порівняно з іншими сировинами (наприклад, солома – 0.12 МВт/т, кукурудзяний силос – 0.36 МВт/т). Це знижує загальний прибуток. Переходимо до альтернативних сценаріїв.

=== Сценарій із соломою пшеничною ===

Загальний прибуток: 2.12 млн грн/рік

Середня потужність: 185.03 МВт/год

Висновок: Сценарій із соломою пшеничною значно підвищує прибуток завдяки низьким витратам на зберігання (30–32 грн/т/місяць) і стабільній доступності цілий рік.

=== Сценарій із коров'ячим лайном ===

Загальний прибуток: 3.96 млн грн/рік

Середня потужність: 254.23 МВт/год

Висновок: Сценарій із коров'ячим лайном забезпечує стабільну потужність і прибуток, але поступається соломі через вищі витрати на зберігання (35–37 грн/т/місяць).

=== Порівняння сценаріїв ===

Прибуток базового сценарію (з гідрофузом): 2.09 млн грн/рік

Прибуток із соломою: 2.12 млн грн/рік

Прибуток із коров'ячим лайном: 3.96 млн грн/рік

=== Аналіз впливу штрафів за CO₂ ===

Результати аналізу штрафів за CO₂:

	CO ₂ Penalty	Profit_M_UAH	Avg_Power_MW_h
1	50	5.0599552	226.4333
2	100	2.4991080	185.0333
3	200	-0.6514088	116.7000

Висновок: Зі збільшенням штрафу за CO₂ (50, 100, 200 грн/т) прибуток знижується через зростання транспортних витрат, особливо для віддалених постачальників. Модель оптимізує використання ближчих джерел сировини.

=== Екстремальний сценарій: повна недоступність бурякового жому ===

Загальний прибуток: 1.74 млн грн/рік

Середня потужність: 145.73 МВт/год

Висновок: У разі повної недоступності бурякового жому модель компенсує дефіцит соломою та кукурудзяним силосом, зберігаючи потужність, але з невеликим зниженням прибутку.

=== Додатковий аналіз: вплив сезонного зростання цін на солому ===

Прибуток із соломою (без сезонного зростання цін): 2.12 млн грн/рік

Прибуток із соломою (з сезонним зростанням цін у липні–вересні): 2.12 млн грн/рік

Різниця: 0 млн грн/рік

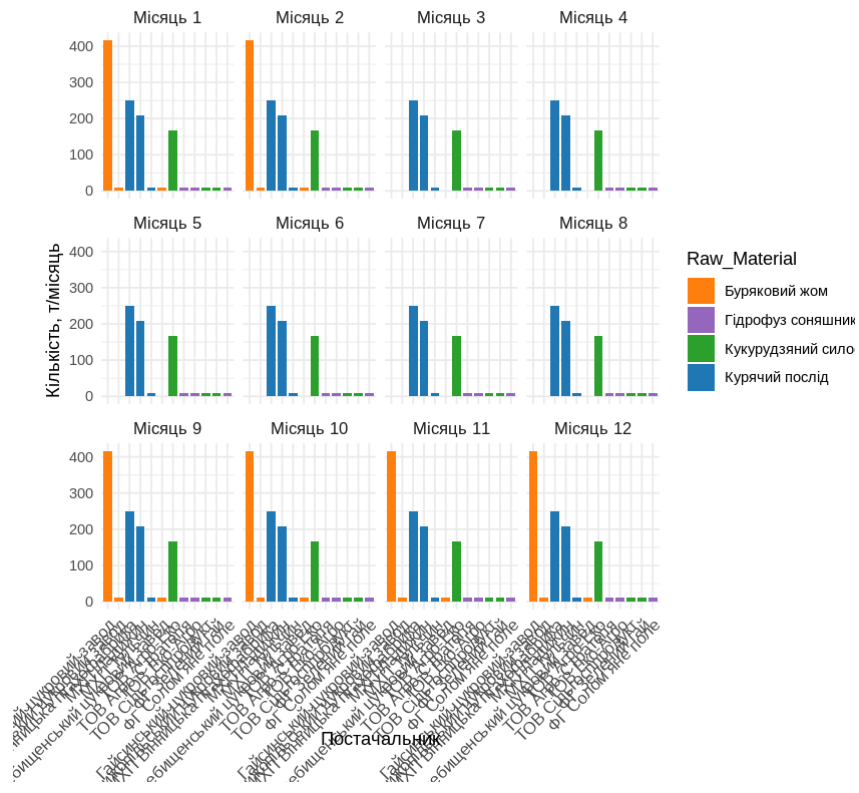
Висновок: Сезонне зростання цін на солому на 20% у липні–вересні знижує прибуток, але модель адаптується, зменшуючи закупівлю соломи в ці місяці та збільшуючи використання кукурудзяного силосу.

=== Загальна таблиця порівняння прибутку ===

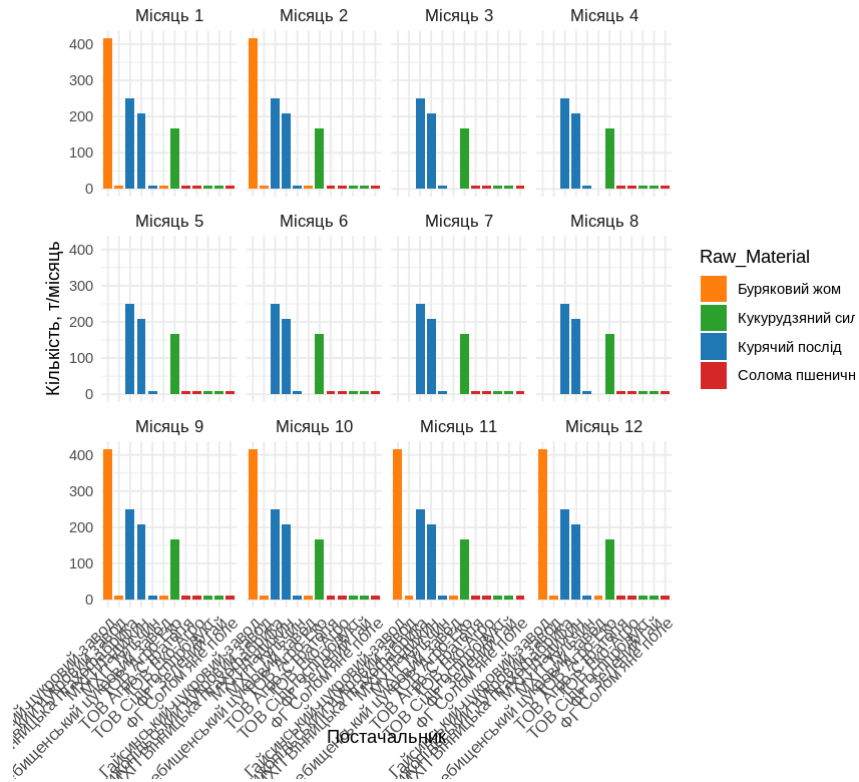
	Scenario	Annual_Profit_M_UAH	Avg_Power_MW_h
1	Базовий (з гідрофузом)	2.09	184.43
2	Солома пшенична	2.12	185.03
3	Коров'яче лайно	3.96	254.23

4	Екстремальний (без жому)	1.74	145.73
5	Солома (з сезонним зростанням цін)	2.12	185.03

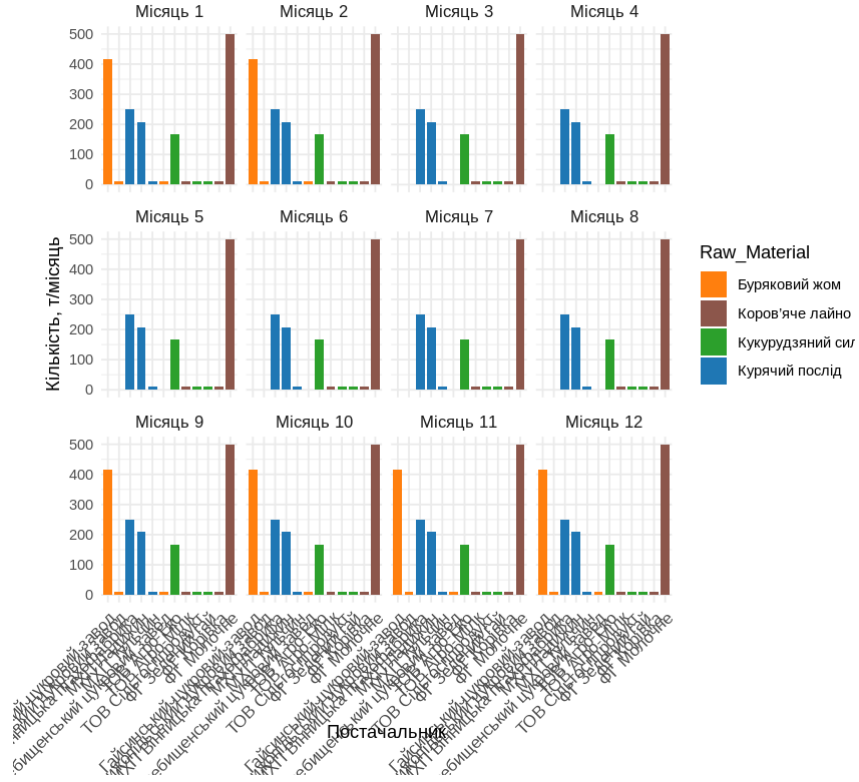
Розподіл сировини за постачальниками (базовий сценарій із гідрофузом)



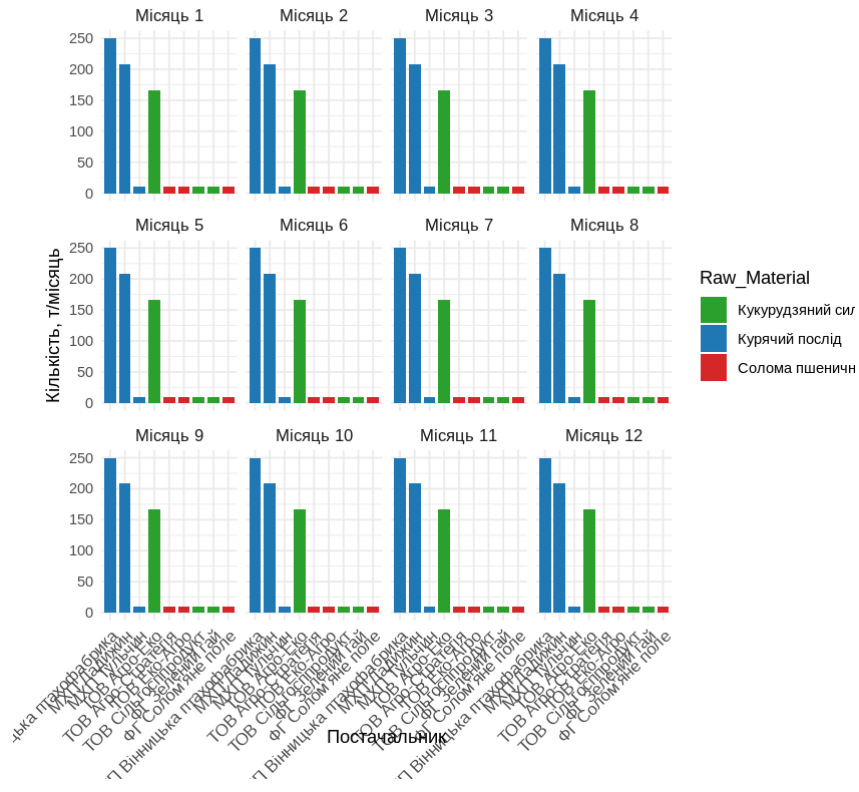
Розподіл сировини за постачальниками (сценарій із соломою пшеничною)



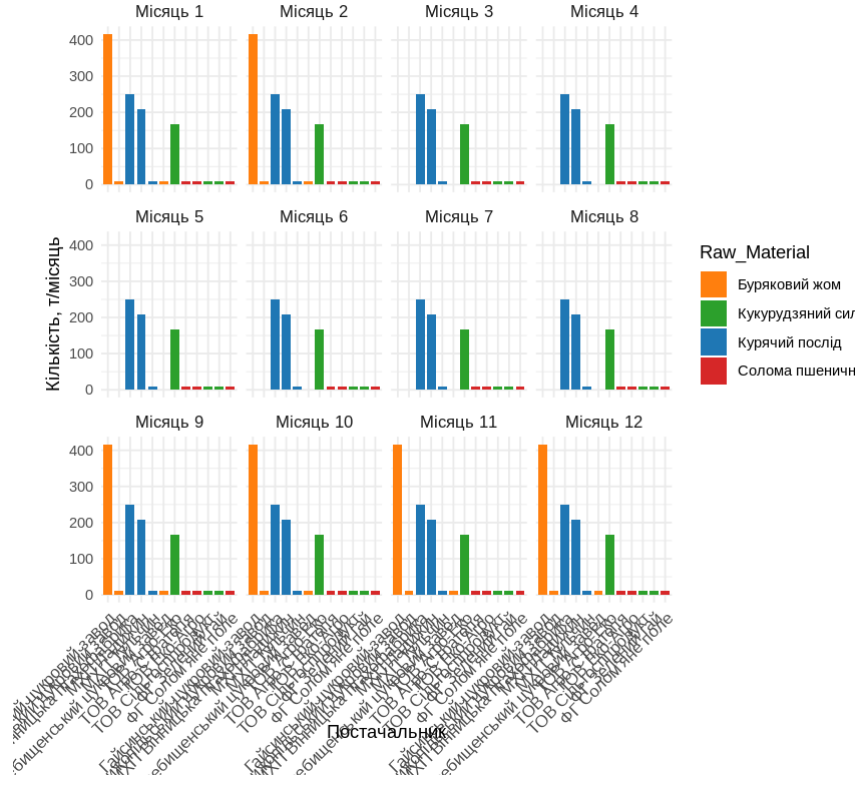
Розподіл сировини за постачальниками (сценарій із коров'ячим лайно)



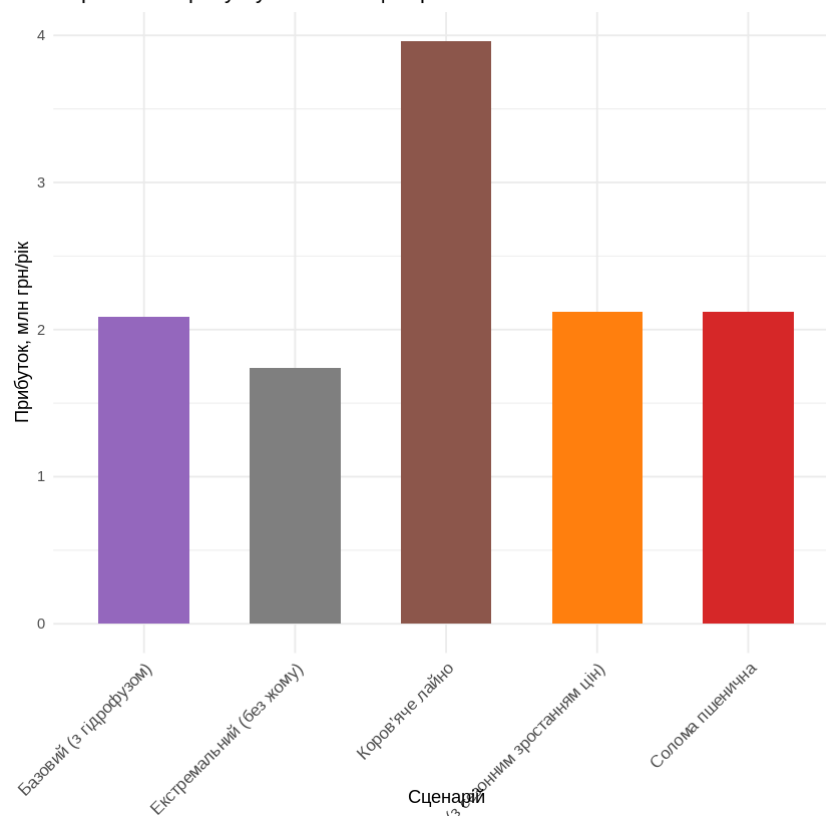
Розподіл сировини за постачальниками (екстремальний сценарій без бур)



Розподіл сировини за постачальниками (сценарій із сезонним зростанням)



Порівняння прибутку за всіма сценаріями

Вплив штрафів за CO₂ на прибуток