

SECTION 5. AUTOMATION, COMPUTER-INTEGRATED TECHNOLOGIES, ROBOTICS, ARTIFICIAL INTELLIGENCE/АВТОМАТИЗАЦІЯ, КОМП'ЮТЕРНО-ІНТЕГРОВАНІ ТЕХНОЛОГІЇ, РОБОТОТЕХНІКА, ШТУЧНИЙ ІНТЕЛЕКТ

Павлов Сергій Григорович

Аспірант

Національний університет біоресурсів і природокористування України, кафедра автоматики та робототехнічних систем ім. акад. І.І. Мартиненка, Київ, Україна

<https://orcid.org/0009-0001-3343-5508>

sergpavlov89@email.com

Лисенко Віталій Пилипович

Доктор технічних наук, професор

Національний університет біоресурсів і природокористування України, кафедра автоматики та робототехнічних систем ім. акад. І.І. Мартиненка, Київ, Україна

<https://orcid.org/0000-0002-5659-6806>

lysenko@nubip.edu.ua

Лендєл Тарас Іванович

Кандидат технічних наук, доцент

Національний університет біоресурсів і природокористування України, кафедра автоматики та робототехнічних систем ім. акад. І.І. Мартиненка, Київ, Україна

<https://orcid.org/0000-0002-6356-1230>

taraslendel@gmail.com

Наконечна Катерина Віталіївна

Кандидат економічних наук, доцент

Національний університет біоресурсів і природокористування України, кафедра економічної кібернетики, Київ, Україна

<https://orcid.org/0000-0002-1537-7201>

nakonechna@nubip.edu.ua

ФУНКЦІЇ БАЖАНОСТІ ХАРІНГТОНА ДЛЯ ОЦІНКИ ЯКІСНИХ ПАРАМЕТРІВ БІОСИРОВИНИ ДЛЯ ЗБРОДЖУВАННЯ

Анотація. Стабільність та економічна ефективність біогазових установок критично залежать від якості біосировини, що використовується для анаеробного збродження. Однак традиційні лабораторні методи аналізу, які можуть тривати від кількох днів до тижнів, є занадто повільними для оперативного контролю технологічного процесу. Така затримка створює значні ризики зниження продуктивності, дестабілізації процесу та навіть повної зупинки реактора, що призводить до економічних збитків. Це формує гостру промислову потребу в інструментах для експрес-оцінки якості сировини, здатних надавати обґрунтовані рекомендації в режимі реального часу. Ключовою методологічною інновацією даної роботи є стратегічне перетворення складного завдання кількісного прогнозування виходу біогазу, яке є викликом для невеликих наборів даних, у практично значущу та більш стійку задачу якісної класифікації. Цього вдалося досягти шляхом застосування функції бажаності Харінгтона, яка формалізує експертні знання щодо технологічних вимог в універсальну безрозмірну шкалу якості. Для вирішення цього завдання було навчено класифікатор на основі алгоритму випадкового лісу з використанням обмеженого набору параметрів, а саме вологість, узагальнена оцінка, температура. Для об'єктивної оцінки надійності моделі було використано стратифіковану перехресну валідацію, а важливість ознак визначалася за допомогою статистично обґрунтованого методу перестановок. Модель продемонструвала високу ефективність (зважаючи на F1-міру 0.82), а аналіз показав, що узагальнена візуальна оцінка та вологість є домінуючими і статистично значущими предикторами якості сировини. Розроблена система є доказом концепції для створення "паспорта якості" сировини, що дозволить

операторам приймати обґрунтовані рішення для підвищення стабільності та рентабельності біогазових установок.

Ключові слова: біогаз; анаеробне зброджування; експрес-оцінка якості; машинне навчання; випадковий ліс; функція бажаності Харінгтона

1. ВСТУП

Постановка проблеми. Ефективність виробництва біогазу безпосередньо залежить від стабільності процесу анаеробного зброджування [1], який, у свою чергу, є чутливим до якості вхідної біосировини. Традиційні лабораторні методи оцінки є точними, але їх тривалість (від кількох днів до тижнів) унеможливорює оперативний контроль. Відсутність інструментів для швидкої оцінки якості сировини "на вході" призводить до ризиків зниження виходу біогазу та дестабілізації процесу, що створює потребу в розробці систем експрес-аналізу для прийняття рішень в режимі реального часу.[1]

Аналіз останніх досліджень і публікацій. У сучасних дослідженнях активно застосовуються методи машинного навчання для прогнозування виходу біогазу. Однак більшість моделей потребують великих наборів даних та складних лабораторних аналізів, що обмежує їх практичне застосування.[1] Ключовою проблемою залишається створення моделей, що працюють на малих вибірках та використовують легкодоступні параметри. Наша робота спирається на ідеї перетворення кількісних показників у якісні, що є більш стійким підходом при обмежених даних.[1]

Мета публікації. Метою статті є розробка та валідація системи експрес-оцінки якості біосировини для зброджування, що базується на поєднанні функції бажаності Харінгтона для якісної класифікації та алгоритму машинного навчання "випадковий ліс" для побудови прогностичної моделі на основі мінімального набору оперативно вимірюваних параметрів.

2. ТЕОРЕТИЧНІ ОСНОВИ

Основою запропонованого підходу є перетворення складної задачі кількісного прогнозування на більш стійку задачу якісної класифікації. Для цього використано функцію бажаності Харінгтона[4] — інструмент, що дозволяє перевести будь-яку вимірювану величину (у нашому випадку — питомий вихід біогазу) в універсальну безрозмірну шкалу "бажаності" від 0 (абсолютно неприйнятно) до 1 (ідеально). Цей метод дозволяє формалізувати нелінійні експертні знання та технологічні вимоги, імітуючи логіку прийняття рішень фахівцем.

Для вирішення задачі класифікації було обрано алгоритм випадкового лісу (Random Forest)[2]. Цей ансамблевий метод є ефективним при роботі з невеликими наборами даних, оскільки він стійкий до перенавчання завдяки агрегації результатів багатьох незалежних дерев рішень, кожне з яких навчається на випадковій вибірці даних та ознак.[2]

3. МЕТОДИ ДОСЛІДЖЕННЯ

Дослідження проводилось на експериментальній вибірці. Для кожного зразка було визначено питомий вихід біогазу, який за допомогою функції бажаності Харінгтона було перетворено на один з п'яти класів якості. В якості вхідних параметрів для моделі машинного навчання були обрані легкодоступні показники: вологість, узагальнена візуальна оцінка та набір температурних показників.

Для об'єктивної оцінки ефективності моделі на малій вибірці було застосовано процедуру стратифікованої 5-кратної перехресної валідації, що забезпечує репрезентативність кожного класу в навчальних та тестових блоках. Визначення найважливіших предикторів здійснювалося за допомогою статистично обґрунтованого

методу перестановок (Permutation Importance) [3], який оцінює падіння якості моделі при випадковому перемішуванні значень однієї ознаки.

4. РЕЗУЛЬТАТИ ТА ОБГОВОРЕННЯ

Розроблена модель класифікації продемонструвала високу загальну ефективність із зваженою F1-мірою 0.82[1]. Модель показала відмінні результати у розпізнаванні класів "Добре" (F1=0.90) та "Дуже погано" (F1=1.00).

Аналіз важливості параметрів однозначно визначив два ключові, статистично значущі ($p < 0.001$) предиктори - Узагальнена візуальна оцінка та Вологість.

Натомість, усі температурні показники виявилися статистично незначущими, візуалізація на Рис.1

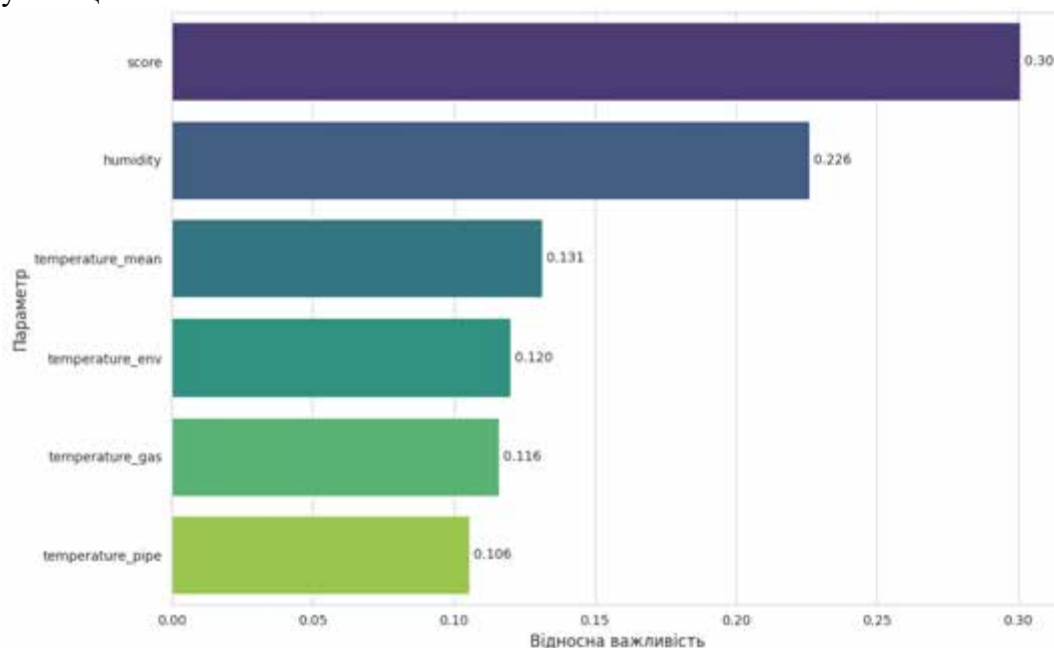


Рис. 1. Вплив параметрів

Аналіз помилок показав, що модель переважно плутає суміжні класи (наприклад, "Добре" та "Задовільно"), що свідчить про її здатність засвоювати порядкову природу шкали якості. Розроблена система може слугувати основою для створення "паспорта якості" сировини, що дозволить операторам приймати обґрунтовані рішення в реальному часі: відбраковувати непридатні партії, коригувати рецептуру сумішей або призначати попередню обробку.

ВИСНОВКИ ТА ПЕРСПЕКТИВИ ПОДАЛЬШИХ ДОСЛІДЖЕНЬ

Дослідження успішно продемонструвало, що гібридний підхід, який поєднує функцію бажаності Харінгтона та алгоритм випадкового лісу, дозволяє створити ефективну систему експрес-оцінки якості сировини для біогазових установок. Доведено, що узагальнена візуальна оцінка та вологість є ключовими предикторами якості. Головним обмеженням роботи є малий розмір вибірки, тому перспективи подальших досліджень включають збір більшого набору даних, тестування більш складних алгоритмів та інтеграцію даних з інших недорогих сенсорів для підвищення точності та надійності системи в промислових умовах.

ПОСИЛАННЯ

1. F. Almomani, "Prediction of biogas production from chemically treated co-digested agricultural waste using artificial neural network," *Fuel*, vol. 280, p. 118573, 2020, doi: 10.1016/j.fuel.2020.118573.
2. В. Лисенко, Т. Лендел, і С. Павлов, "Аналіз алгоритмів машинного навчання для прогнозування виходу біогазу," *Енергетика і автоматика*, no. 3, pp. 100–111, 2023. [Online]. Available: [https://doi.org/10.31548/energiya3\(67\).2023.100](https://doi.org/10.31548/energiya3(67).2023.100)
3. "Cross-validation: evaluating estimator performance," *Scikit-learn Documentation*, 2025. [Online]. Available: https://scikit-learn.org/stable/modules/cross_validation.html
4. NumberAnalytics, "Unlocking Desirability in Operations Research," 2025. [Online]. Available: <https://www.numberanalytics.com/blog/ultimate-guide-desirability-function-operations-research>

MINISTRY OF EDUCATION
AND SCIENCE OF UKRAINE

NATIONAL UNIVERSITY
OF LIFE AND ENVIRONMENTAL
SCIENCES OF UKRAINE

FACULTY OF INFORMATION
TECHNOLOGY

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ
І НАУКИ УКРАЇНИ

НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ
БІОРЕСУРСІВ І
ПРИРОДОКОРИСТУВАННЯ УКРАЇНИ

ФАКУЛЬТЕТ ІНФОРМАЦІЙНИХ
ТЕХНОЛОГІЙ

PROCEEDINGS

XIII International scientific
and practical conference

**GLOBAL AND
REGIONAL PROBLEMS OF
INFORMATIZATION IN
SOCIETY AND
NATURE USING
'2025**

13-14 November 2025

Kyiv, NULES of Ukraine

Kyiv 2025

МАТЕРІАЛИ

XIII Міжнародної науково-
практичної конференції

**ГЛОБАЛЬНІ ТА
РЕГІОНАЛЬНІ ПРОБЛЕМИ
ІНФОРМАТИЗАЦІЇ В
СУСПІЛЬСТВІ І
ПРИРОДОКОРИСТУВАННІ
'2025**

13-14 листопада 2025 року

Київ, НУБіП України

Київ 2025

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ БІОРЕСУРСІВ
І ПРИРОДОКОРИСТУВАННЯ УКРАЇНИ
ФАКУЛЬТЕТ ІНФОРМАЦІЙНИХ ТЕХНОЛОГІЙ

МАТЕРІАЛИ

ХІІІ Міжнародної науково-практичної конференції

ГЛОБАЛЬНІ ТА РЕГІОНАЛЬНІ ПРОБЛЕМИ ІНФОРМАТИЗАЦІЇ В СУСПІЛЬСТВІ І ПРИРОДОКОРИСТУВАННІ '2025

13-14 листопада 2025 року

Київ, НУБіП України

Київ 2025

УДК 004

Рекомендовано до друку вченою радою факультету інформаційних технологій Національного університету біоресурсів і природокористування України (протокол № 4 від 18.12.2025).

Укладач: д.т.н., доцент Шкарупило В.В.

Збірник матеріалів XIII Міжнародної науково-практичної конференції "Глобальні та регіональні проблеми інформатизації в суспільстві і природокористуванні '2025", 13–14 листопада 2025 року, НУБіП України, Київ. – К.: НУБіП України, 2025. – 206 с.

Відповідальність за зміст публікацій несуть автори.

© Національний університет біоресурсів
і природокористування України, 2025