

ЕЛЕКТРОМЕХАНІЧНЕ ОБЛАДНАННЯ ТА АВТОМАТИЗОВАНА СИСТЕМА КЕРУВАННЯ ПРОЦЕСОМ ПІРОЛІЗУ ГУМОВИХ І ПОЛІЕТИЛЕНОВИХ ВІДХОДІВ

Кількість відходів, що утворюються внаслідок нашого повсякденного життя та виробничих процесів, постійно зростає і вже є проблемою в деяких регіонах та містах. Ми повинні розуміти, що неперероблені відходи, які накопичуються в тоннах щодня, негативно впливають як на біосферу нашої планети, так і на здоров'я громадян. Території, які вже не можна рахувати у гектарах, а лише у відсотках від загальної площі нашої країни, приречені на забруднення на десятиліття.

Стаття присвячена дослідженню та розробці ефективних методів утилізації відходів гуми та поліетилену за допомогою піролізу [1-6]. У сучасному світі проблема переробки відходів стає все більш актуальною через постійне зростання кількості відходів та їх негативний вплив на довкілля [6-15]. Неправильне управління відходами не тільки погіршує екологічний стан, але й призводить до втрати цінних ресурсів. Метою статті є вирішення цієї проблеми шляхом створення автоматизованої системи управління процесом піролізу.

Головним об'єктом дослідження є піролізна установка, яка перетворює відходи гуми та поліетилену на горючі гази, рідкі продукти піролізу та технічний вуглець. Ця технологія не лише зменшує обсяг відходів, а й забезпечує додаткове джерело енергії, що є важливим кроком на шляху до енергетичної незалежності.

Дослідження детально аналізує різні види сировини, їх характеристики та вплив на процес піролізу. Значну увагу приділено розробці автоматизованої системи управління для оптимізації процесу та підвищення ефективності й безпеки роботи установки. Дослідження включає як теоретичні аспекти, так і практичні розрахунки та моделювання системи.

Ключові слова : *піроліз, відходи гуми, відходи поліетилену, автоматизована система керування, електромеханічне обладнання, екологічна стійкість, утилізація відходів, програмовані логічні контролери (plc), охорона праці, енергетична незалежність.*

1. Вступ

Піроліз гуми є складним фізико-хімічним процесом розщеплення великих молекулярних ланцюгів на менші. Це призводить до розпаду матеріалу на компоненти, а саме: піролізний газ, піролізне масло, вуглецеві залишки та металевий дріт. Процес відбувається у закритому реакторі в анаеробних умовах і технічно поділяється на три стадії (нагрівання, активна фаза піролізу та охолодження). Наше розроблення пропонує інтеграцію інтелектуальної системи автоматизації в процес керування циклом піролізу, яка може поєднуватися з моделлю машинного навчання та регулювати процес на її основі.

Ми проаналізували термогравіметричні криві різних типів гуми у різних дослідженнях [3-4] і виявили закономірність, яка дозволяє визначити температурні межі для оптимальних циклів піролізу. Досліджуючи роботи наших колег [5], ми чітко встановили залежність між часом нагрівання сировини та кількістю кінцевого продукту, який можна отримати. Занадто швидке або повільне нагрівання призводить до погіршення фракціонування. Аналіз термогравіметричних кривих зразків гуми при різних швидкостях нагрівання показав, що кожен зразок гуми має свої характерні піки при певних температурах. Наприклад, натуральний каучук (NR) має значний пік при 378°C, тоді як стирол-бутадієнова гума (SBR) показує дві стадії втрати маси, основна з яких при 457°C, що пов'язано з розкладом полімеру.

Проблема, з якою ми зіткнулися, полягає в тому, що відходи автомобільних шин мають досить різний внутрішній склад, навіть в межах однієї партії, завантаженої в реактор. Це призводить до змішування піків розкладання гуми під час процесу піролізу, що негативно впливає на кількість кінцевого продукту. Якщо гума перегріта, тобто подається занадто багато енергії під час переходу до газових пальників, ми отримуємо більше летючих компонентів піролізного газу замість олії. З іншого боку, якщо процес занадто повільний, результатом будуть важкі фракції, які складніше очистити для подальшого використання.

2. ЕЛЕКТРОПОСТАЧАННЯ

Електропостачання почалося з опису об'єкта проекту — ангару площею 600 м², розташованого в промисловій зоні. Головним завданням цього ангару-майстерні є піроліз відходів автомобільних шин із використанням різного електромеханічного обладнання, такого як дробарки, гідравлічні ножиці, пальники

та вентилятори тощо. З огляду на характер операцій, особлива увага приділяється забезпеченню безперебійного електропостачання та надійності системи.

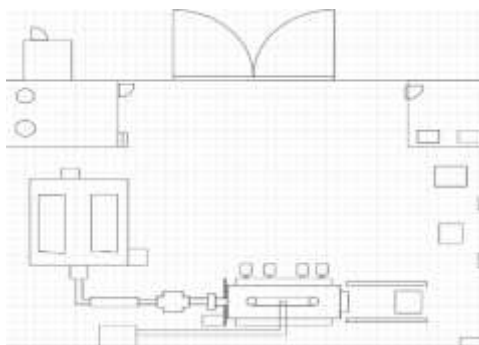


Рисунок 1 — План ЕП

Розрахунок освітлення приміщень майстерні здійснювався методом коефіцієнта використання світлового потоку. Було визначено необхідний світловий потік для досягнення оптимальної освітленості, встановленої на рівні 400 люкс. Розрахунки показали, що для забезпечення необхідного освітлення потрібно 18 світильників із загальною потужністю 3600 Вт. Також було виконано розрахунки для допоміжних приміщень, таких як вентиляційна кімната та операторська.

Розрахунок електричного навантаження включав характеристику основних споживачів електроенергії, обґрунтування кількості та розміщення розподільних пунктів і освітлювальних щитків. Загальна розрахункова потужність для майстерні становить 35,41 кВт з реактивною потужністю 23,67 кВАр. Для поліпшення коефіцієнта потужності до рівня не менше 0,92 було обрано компенсуючий пристрій моделі UKRM-04-10, який забезпечує необхідну реактивну потужність після компенсації.

Трансформатори вибиралися на основі розрахунку активних та реактивних втрат потужності, а також розрахунку електричних мереж за допустимими втратами напруги. Було обрано трансформатори типу ТМ-40/10/0.4 з відповідними параметрами для забезпечення надійної роботи електросистеми.

Деякі електричні приймачі в майстерні відносяться до 1-ї категорії приймачів, що вимагає подачі електроенергії від двотрансформаторної підстанції. Це було ключовим фактором у

3. СИСТЕМА АВТОМАТИЗАЦІЇ

Системи, включаючи автоматизовані системи, складаються з методів, які реалізують процеси. Методи є набором інструментів або кроків, необхідних для розв'язання конкретного завдання. У керуванні застосовуються різні методи для отримання, аналізу та видачі команд. Весь процес керування пропонується прив'язати до внутрішньої мережі підприємства з використанням різного обладнання.

3.1. Вибір компонентів

Вибір компонентів для автоматизованої системи керування процесом піролізу є багаторівневим. Зокрема, це стосується датчиків температури, тиску, ваги, вологості, виконавчих пристроїв, а також засобів візуалізації та сигналізації. Особливу увагу слід приділити вибору датчиків температури та тиску, оскільки вони повинні забезпечувати високу точність вимірювань і витримувати жорсткі умови. Проектування та впровадження системи автоматизації практично не мають обмежень. Однак наша увага зосереджена на моделюванні інтелектуальної системи керування самим процесом піролізу. Керування виконавчими механізмами здійснюється за допомогою системи контакторів, яка безпосередньо контролюється командами від програмованого логічного контролера (PLC).

Для розширення можливостей керування системою було обрано новітній модуль S7-1500 TM NPU, що підтримує встановлення нейронних мереж. Відомий своєю продуктивністю та надійністю, модуль S7-1500 значно перевершує своїх попередників завдяки швидкій обробці даних, більшій пам'яті та розширеним можливостям зв'язку. Цей контролер забезпечує швидкий відгук на зміну умов процесу, покращену інтеграцію з іншими системами та більшу гнучкість у налаштуваннях. Однією з ключових переваг S7-1500 є його модульність і багатофункціональність. У роботі пропонується два різні методи інтеграції нейронних мереж у систему.

Перший метод передбачає встановлення модуля обробки нейронних мереж (NPM), зокрема моделі 6ES7677-2AA00-0AA0. Цей модуль дозволяє інтегрувати попередньо навчений нейронний мережевий алгоритм у систему, попередньо запрограмований на SD-карті. Для цього використовуються такі інструменти, як TensorFlow, відкрита програмна бібліотека, розроблена компанією Google для реалізації нейронних мереж. Ця конфігурація працює на основі попередньо запрограмованої та навченої моделі, яка базується на попередніх циклах і може автономно налаштовуватися за навченою схемою. Як перевагою, так і недоліком цієї схеми є те, що вона замкнена, тобто працює на першому рівні без можливості

самостійного розвитку або адаптації до конкретних завантажень у реакторі. Цей підхід забезпечує більшу гнучкість, ніж просто програмування постійних значень керування в PLC, але все ж не є ідеальним.

Другий метод інтеграції управління нейронними мережами є більш ефективним, глобальним та складним. Він передбачає впровадження системи управління вищого рівня через SCADA-пакет. Використовуючи сервер, який взаємодіє з контрольним пунктом, дані в режимі реального часу надсилаються від PLC до замкненої мережі підприємства, яка обробляє отримані дані за допомогою навченої штучної інтелектуальної системи. У цьому режимі інструкції безперервно надходять у систему та коригуються. Перевага цієї системи полягає в її повній автономності та якості. З такою системою можливо об'єктивно оцінювати та контролювати продуктивність кожного циклу.

3.2. Моделювання системи автоматизації

Друга частина цього розділу присвячена моделюванню системи автоматизації для заводу з переробки відходів. Комплексне моделювання алгоритмів управління було проведено з акцентом на підтримання оптимальних температурних умов, регулювання тиску в реакторі та забезпечення загальної безпеки процесу. Було розроблено контрольний пункт для виконання цих алгоритмів управління.

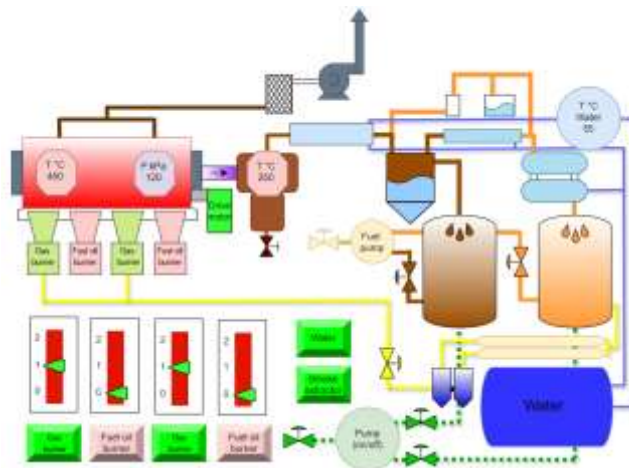


Рисунок 2 — Мнемосхема керування

Особливу увагу приділено інтеграції системи управління з існуючою технологічною інфраструктурою майстерні. Це забезпечило надійну взаємодію між різними елементами системи, підвищило загальну ефективність та зменшило ризик аварій. Також була розроблена система аварійного вимкнення, яка активується при перевищенні допустимих параметрів процесу, що забезпечує додатковий рівень безпеки.

Висновок

Дослідження системи керування процесом піролізу гумових і поліетиленових відходів є значним кроком уперед у сфері управління відходами та відновлення ресурсів. Перетворення відходів на паливо за допомогою цієї технології не лише вирішує зростаючі екологічні проблеми, пов'язані з утилізацією відходів, але й сприяє енергетичній незалежності. Інтеграція сучасного електромеханічного обладнання та передових технологічних підходів забезпечує оптимізацію та автоматизацію процесу піролізу для досягнення ефективності та безпеки, що є критично важливим для промислових застосувань.

Дослідження підкреслює важливість ретельного підходу до кожного етапу аналізу та розробки для покращення процесу піролізу. Реалізація надійної, інноваційної автоматизованої системи керування, яка включає різноманітні методи та їх варіації, відіграє критичну роль у підтримці оптимальних умов протягом усього процесу. Включення модуля Siemens S7-1500 з нейронним обчислювальним блоком демонструє потенціал інтеграції штучного інтелекту та машинного навчання для подальшого покращення керування процесом і підвищення його ефективності. Такий підхід не лише покращує якість кінцевої продукції, але й забезпечує безпеку експлуатації установки піролізу. Впровадження вертикального реактора періодичної дії з обертовим барабаном виявилось ефективним рішенням для піролізу неоднорідних відходів. Ця конструкція реактора демонструє свою ефективність у переробці великих обсягів сировини з високою якістю. Крім того, комплексна енергетична система та заходи безпеки, окреслені в дослідженні, забезпечують надійну і безпечну роботу установки, мінімізуючи ризик аварій і гарантують здоров'я та безпеку працівників. У цілому, це дослідження забезпечує детальну основу для ефективного та стійкого управління гумовими і поліетиленовими відходами за допомогою сучасних технологій піролізу.

Список використаної літератури

1. Aksenov, A.F., Seregin, E.P., Yanovskii, L.S. та ін. Поточна парадигма і перспективи зростання хеммотології. *Chem Technol Fuels Oils* 49, 298–308 (2013). <https://doi.org/10.1007/s10553-013-0445-5>.
2. Папін, А.В., Ігнатова, А.Ю., Макаревич, Є.А. Шляхи утилізації зношених автомобільних шин та аналіз можливості використання технічного вуглецю для піролізу зношених шин. *Вісник КузГТУ*, 2015, № 2(108), с. 96–100.
3. Переробка поліетилену: технологія вторинного використання відходів // URL: <https://rcycle.net/plastmassy/polietilen/pererabotka-tehnologii-vtorichnogo-ispolzovaniya-othodov>, доступ: 05.11.2020.
4. Бондаренко І., Дудар І., Яворовська О., Зюсь О., Бойченко С., Куберський І., Шкільнюк І., Комариста Б., Джигирей І., & Бендіух В. (2021). Розробка технології локалізації забруднення довкілля під час пожеж на стихійних сміттєзвалищах та її лабораторне випробування. *Східноєвропейський журнал підприємницьких технологій*, 6(10 (114), 40–48. <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2021.248252>.
5. Бендіух В., Маркіна Л., Мацай Н., Кирпичова І., Бойченко С., Прядко С., Шкільнюк І., Комариста Б., Єрмакович І., & Власенко О. (2023). Інтегрований метод планування управління відходами на основі аналізу матеріальних потоків та оцінки життєвого циклу. *Східноєвропейський журнал підприємницьких технологій*, 1(10 (121), 6–18. <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2023.273930>.
6. Шкільнюк І., Бойченко С. (2020). Біологічний ризик постачання авіаційного палива. У книзі: Бабак В., Ісаєнко В., Запорожець А. (ред.) Системи, рішення і контроль в енергетиці І. Дослідження в системах, рішеннях та управлінні, том 298. Springer, Cham. https://doi.org/10.1007/978-3-030-48583-2_12.
7. Бойченко С., Зубенко С., Коновалов С., & Яковлева А. (2020). Синтез етилових ефірів масла *Camelina* як компонентів реактивних палив. *Східноєвропейський журнал підприємницьких технологій*, 1 (6 (103), 42–49. <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2020.196947>.
8. Лорія М., Целішев О., Єлісєєв П., Поркуян О., Гурін О., Абрамова А., & Бойченко С. (2022). Принципи та етапи створення систем автоматичного управління з моделлю складних технологічних процесів. *Східноєвропейський журнал підприємницьких технологій*, 6(6 (120), 20–29. <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2022.270519>.
9. Байкалов Ю., Джигирей І., Бендіух В., Проскурнін О., Березенко К., Бойченко С., Крючков А., Сергієнко М., Данілін О., & Кутняшенко О. (2022). Удосконалення технології рекультивції кар'єрів і відвалів. *Східноєвропейський журнал підприємницьких технологій*, 4(10 (118), 38–50. <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2022.263513>.
10. Яковлева А., Бойченко С., Калє У. та Надь А. (2021). "Комплексні підходи та передові технології у переробці авіаційної продукції", *Aircraft Engineering and Aerospace Technology*, Vol. 93 No. 8, pp. 1302-1312. <https://doi.org/10.1108/AEAT-03-2021-0068>.
11. Вікторія Рибун, Сергій Бойченко, Утку Калє, "Прогрес у технології газорідного синтезу для екологічно чистого палива: аналітичний огляд світових досягнень", *Energy Reports*, Том 9, 2023, С. 5500-5508, <https://doi.org/10.1016/j.egyrt.2023.04.37>.

S. Boichenko¹, Dr. Sc. (Eng.), Prof., ORCID 0000-0002-2489-4980

A. Soldatenko¹, student, ORCID 0009-0002-0628-6831

¹National Technical University of Ukraine "Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute"

ELECTROMECHANICAL EQUIPMENT AND AUTOMATED CONTROL SYSTEM FOR THE PYROLYSIS PROCESS OF RUBBER AND POLYETHYLENE WASTE

The amount of waste generated as a result of our daily lives and industrial processes continues to grow and has already become a problem in some regions and cities. We must understand that untreated waste, which accumulates in tons every day, negatively impacts both the biosphere of our planet and citizens' health. Areas that can no longer be measured in hectares but only as a percentage of our country's total land are condemned to pollution for decades.

This article is dedicated to researching and developing effective methods for the utilization of rubber and polyethylene waste through pyrolysis [1-6]. In the modern world, the issue of waste recycling is becoming increasingly relevant due to the constant increase in waste and its negative environmental impact [6-15]. Improper waste management not only worsens the ecological condition but also leads to the loss of valuable resources. The goal of the article is to address this problem by creating an automated control system for the pyrolysis process.

The main object of research is a pyrolysis plant that converts rubber and polyethylene waste into combustible gases, liquid pyrolysis products, and carbon black. This technology not only reduces the amount of waste but also provides an additional source of energy, which is an important step toward energy independence.

The study thoroughly analyzes various types of raw materials, their characteristics, and their influence on the pyrolysis process. Significant attention is paid to developing an automated control system to optimize the process and enhance the efficiency and safety of the plant's operation. The research encompasses both theoretical aspects and practical calculations and system modeling.

Keywords : *pyrolysis, rubber waste, polyethylene waste, automated control system, electromechanical equipment, environmental sustainability, waste utilization, programmable logic controllers (plc), occupational safety, energy independence.*

References

1. Aksenov, A.F., Seregin, E.P., Yanovskii, L.S. et al. Current paradigm and growth prospects of chemmotology. *Chem Technol Fuels Oils* 49, 298–308 (2013). <https://doi.org/10.1007/s10553-013-0445-5>.
2. Papin, A.V., Ignatova, A.Yu., Makarevich, E.A. Ways of recycling waste tires and analysis of the possibility of using carbon black for pyrolysis of used tires. *Vestnik KuzGTU*, 2015, no. 2(108), pp. 96–100.
3. Recycling of polyethylene: technology of secondary use of waste // URL: <https://rcycle.net/plastmassy/polietilen/pererabotka-tehnologii-vtorichnogo-ispolzovaniya-othodov>, accessed: 05.11.2020.
4. Bondarenko, I., Dudar, I., Yavorovska, O., Ziuz, O., Boichenko, S., Kuberskyi, I., Shkilniuk, I., Komarysta, B., Dzhygyrey, I., & Bendiuh, V. (2021). Devising the technology for localizing environmental pollution during fires at spontaneous landfills and testing it in the laboratory. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*, 6(10 (114)), 40–48. <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2021.248252>.
5. Bendiuh, V., Markina, L., Matsai, N., Kyrpychova, I., Boichenko, S., Priadko, S., Shkilniuk, I., Komarysta, B., Yermakovich, I., & Vlasenko, O. (2023). Integrated method for planning waste management based on the material flow analysis and life cycle assessment. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*, 1(10 (121)), 6–18. <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2023.273930>.
6. Shkilniuk, I., Boichenko, S. (2020). Biological Risk of Aviation Fuel Supply. In: Babak, V., Isaienko, V., Zaporozhets, A. (eds) *Systems, Decision and Control in Energy I. Studies in Systems, Decision and Control*, vol 298. Springer, Cham. https://doi.org/10.1007/978-3-030-48583-2_12.
7. Boichenko, S., Zubenko, S., Konovalov, S., & Yakovlieva, A. (2020). Synthesis of Camelina oil ethyl esters as components of jet fuels. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*, 1 (6 (103)), 42–49. <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2020.196947>.
8. Loria, M., Tselishchev, O., Elisseyev, P., Porkuian, O., Hurin, O., Abramova, A., & Boichenko, S. (2022). Principles and stages of creation of automatic control systems with a model of complex technological processes. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*, 6(6 (120)), 20–29. <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2022.270519>.
9. Baikalov, Y., Dzhygyrey, I., Bendiuh, V., Proskurnin, O., Berezenko, K., Boichenko, S., Kryuchkov, A., Serhiienko, M., Danilin, O., & Kutniashenko, O. (2022). Improvement of quarry and slagheap reclamation technology. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*, 4(10 (118)), 38–50. <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2022.263513>.
10. Yakovlieva, A., Boichenko, S., Kale, U., & Nagy, A. (2021). Holistic approaches and advanced technologies in aviation product recycling. *Aircraft Engineering and Aerospace Technology*, Vol. 93 No. 8, pp. 1302–1312. <https://doi.org/10.1108/AEAT-03-2021-0068>.
11. Viktoriia Ribun, Sergii Boichenko, Utku Kale. Advances in gas-to-liquid technology for environmentally friendly fuel synthesis: Analytical review of world achievements. *Energy Reports*, Volume 9, 2023, pp. 5500–5508. <https://doi.org/10.1016/j.egy.2023.04.37>.

Надійшла: 10.03.2025

Received: 10.03.2025