



Прийнято 14.10.2025. Прорецензовано 19.11.2025. Опубліковано 26.12.2025.

УДК 621.436.2

DOI: 10.31471/1993-9868-2025-2(44)-249-260

УДОСКОНАЛЕННЯ МЕТОДІВ ДОСЛІДЖЕННЯ ЕЛЕМЕНТНОГО СКЛАДУ БІОПАЛИВ ТА СИРОВИНИ ДЛЯ ЇХ ВИРОБНИЦТВА

Панчук А. М. *

Доктор філософії, асистент

Івано-Франківський національний технічний університет нафти і газу

вул. Карпатська, 15, м. Івано-Франківськ, 76019, Україна

<https://orcid.org/0000-0003-1784-7374>,

e-mail: andrii_panchuk@ukr.net

Бойчук В. М.

Доктор фізико-математичних наук, професор

Карпатський національний університет імені Василя Стефаника

76000, Україна, м. Івано-Франківськ, вул. Шевченка 57,

<https://orcid.org/0000-0002-3870-1481>

e-mail: volodymyra.boichuk@pnu.edu.ua

Присяжнюк П. М.

Доктор технічних наук, професор

Івано-Франківський національний технічний університет нафти і газу

вул. Карпатська, 15, м. Івано-Франківськ, 76019, Україна

<https://orcid.org/0000-0002-8325-3745>,

e-mail: pavlo.prysiashniuk@nung.edu.ua

Панчук М. В.

Кандидат технічних наук, доцент

Івано-Франківський національний технічний університет нафти і газу

вул. Карпатська, 15, м. Івано-Франківськ, 76019, Україна

<https://orcid.org/0000-0002-4898-2707>,

e-mail: myroslav_panchuk@ukr.net

Шекета В. І.

Доктор технічних наук, професор

Івано-Франківський національний технічний університет нафти і газу

вул. Карпатська, 15, м. Івано-Франківськ, 76019, Україна

<https://orcid.org/0000-0003-1784-7374>,

e-mail: vasyishketa@gmail.com

Запропоноване посилання: Панчук, А. М., Бойчук, В. М., Присяжнюк, П. М., Панчук, М. В. & Шекета, В. І. (2025). Удосконалення методів дослідження елементного складу біопалив та сировини для їхнього виробництва. Нафтогазова енергетика, 2(44), 249-260. doi: 10.31471/1993-9868-2025-2(44)-249-260.

* Відповідальний автор



Copyright © The Author(s). This is an open access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution License 4.0 (<https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>)

Анотація. Лігноцелюозна біомаса є надійним джерелом відновлюваної енергії та важливих хімічних речовин для промислового використання. Її популярність зумовлена високою поширеністю, обмеженим впливом на навколишнє середовище та відносно низькою ціною. Одним з найперспективніших методів перетворення цього типу сировини в біопалива є її термічна обробка. Термічна обробка дозволяє утворювати широкий спектр корисних газоподібних, рідких та твердих продуктів залежно від умов реакції. Основним і найважливішим чинником, що визначає ефективність переробних процесів, є елементний склад вихідної біомаси, зміна його в процесі переробки та склад готових продуктів. Проведення швидкого та надійного елементного аналізу біомаси і продуктів її переробки має важливе значення для комерціалізації виробництва. В роботі розглянуто основні методи визначення складу біомаси, зокрема класичний, інфрачервона спектроскопія з перетворенням Фур'є, рентгенівська фотоелектронна спектроскопія та рентгенофлуоресцентний аналіз. Проаналізовано особливості кожного з методів. Класичний метод, що використовується для визначення елементного складу біомаси, є високоточним та, водночас, трудомісткими, дорогими і вимагає використання небезпечних хімічних речовин, що генерують велику кількість відходів. Метод інфрачервоної спектроскопії з перетворенням Фур'є (FTIR) є досить ефективним для швидкої оцінки елементного складу біомаси проте його вважають не достатньо чутливим. Рентгенівська фотоелектронна спектроскопія (XPS) є поверхнево-чутливим методом та корисним для дослідження вмісту вуглецю, кисню та азоту в різних органічних матеріалах, але для отримання точних експериментальних даних при застосуванні цього методу для визначення елементного складу біомаси необхідні математичні залежності для калібрування засобів вимірювання класичним методом. Використання рентгенофлуоресценції (XRF) для визначення хімічного складу біомаси в основному підтверджують ефективність методу. Отримані експериментальні дані мають відхилення в діапазоні від $\pm 10\%$ до $\pm 20\%$, що видається цілком задовільним для багатьох застосувань. Водночас для деяких елементів систематичні похибки (відхилення) можуть бути досить вираженими і складати – 50...100%. Тому, на нашу думку, даний напрямок знаходиться на початковій стадії розвитку та потребує вдосконалення. Проведені в роботі дослідження дають підстави зробити висновок, що для визначення елементного складу біомаси в процесі переробки перспективними є неруйнівні методи контролю, які можна проводити на місці. Такий підхід сприяє комерціалізації процесів виробництва біопалив, а та торгівлі, як сировиною так і готовими продуктами.

Ключові слова: лігноцелюозна біомаса; елементний склад; неруйнівні методи контролю.

Вступ

Енергетичний перехід наразі є одним із найважливіших викликів людства. На даний час викопні палива забезпечують 53% світового попиту на електроенергію, 66% промислового споживання тепла та до 98% попиту на транспортні потреби [1]. Запаси викопних палив є обмеженими та невідновлюваними, а їхня кількість невинно зменшуються. Очікується, що найближчим часом біомаса відіграватиме дуже важливу роль як джерело відновлюваної енергії та хімічних речовин [1,2]. За даними досліджень авторів [3] у 2050 році від 15 до 50% світового попиту на енергію припадатиме саме на біомасу.

Переваги застосування біомаси актуальні як для індустріалізованих країн, так і для країн, що розвиваються. Її децентралізований характер розміщення та широка доступність сприяють підвищенню енергетичної безпеки та розвитку сільських територій, особливо в регіонах з обмеженим доступом до традиційної енергетичної інфраструктури. У зв'язку з цим біомасу в цілому та лігноцелюозну зокрема, можна вважати найпридатнішим відновлюваним джерелом енергії для виробництва палив [4]. Крім того, використання біомаси також може зменшити проблему глобального потепління та покращення екологічної ситуації [5].

На відміну від продовольчого зерна, цукрових або крохмальних культур та олійного насіння, лігноцелюозна сировина є недорогою та наявна у великій кількості [3]. Лігноцелюозна біомаса відноситься до нехарчової сировини. Вона включає сільськогосподарські відходи: пшеничну, ячмінну та рисову соломку, кукурудзяне лушпиння, жом з буряків та цукрової тростини, багаторічні енергетичні дерева, а також відходи лісового господарства, такі як гілки, зрізана та висушена деревина, опале листя тощо. Лігноцелюозні види біомаси є багатими на вуглець, мають значну територіальну поширеність, чинять позитивний вплив на навколишнє середовище та відносно низьку ціну [5].

Одним з найперспективніших методів перетворення цього типу сировини в біопалива є її термічна обробка. Термічна обробка дозволяє утворювати широкий спектр корисних газоподібних, рідких та твердих продуктів і залежить від умов переробки [6]. Газоподібні та рідкі сполуки зазвичай використовуються як носії енергії або платформні молекули для численних хімічних процесів. З іншого боку, твердий залишок може бути застосований для заміни кам'яного вугілля, очищення ґрунтів та стічних вод, синтезу гетерогенних катализаторів, виробництва будівельних матеріалів, ком-

понентів паливних елементів, добрив з уповільненим вивільненням, мікробних носіїв тощо [7].

На даний час існує нагальна необхідність в розробленні ефективних термохімічних технологій для використання потенціалу біомаси в рамках циркулярної, декарбонізованої економіки, в якій дослідження та інновації дозволяють проводити оптимізацію отримання біопалив та зменшують вплив виробничих процесів на навколишнє середовище. За цього вибір раціонального шляху переробки певного типу біомаси визначається її хімічним складом. Тому глибоке розуміння хімічної будови та точне визначення елементного складу біомаси має визначальне значення для організації та комерціалізації підприємств переробної галузі [2].

Аналіз сучасних закордонних і вітчизняних досліджень та публікацій

Для ефективного функціонування переробного підприємства необхідним є визначення хімічного складу сировини та його контроль на всіх стадіях технологічного процесу. Елементний аналіз біомаси дає інформацію про якість вихідної сировини та про повноту її перетворення у енергетичні продукти. Він допомагає оцінити теплотворну здатність біомаси, прогнозувати викиди (особливо оксидів азоту), ідентифікувати та обмежувати шкідливі елементи, такі як сірка та хлор, а також оптимізувати технології перетворення, знаючи її хімічні характеристики [2].

Широка мінливість складу біомаси створює подвійну проблему: вона ускладнює стандартизацію процесів переробки та вимагає гнучких конструкцій реакторів і процесів. Ця гнучкість критично важлива для врахування гетерогенності сировини без погіршення виходу чи якості кінцевого продукту. Труднощі з визначенням елементного складу біомаси також пов'язані з наявністю неорганічної золи, складністю розділення органічних компонентів (C, H, O, N, S, Cl), відсутністю універсального аналітичного стандарту, а також складністю досягнення балансу маси.

Знання різниці в елементному складі між сировиною та біопаливом має вирішальне значення для розуміння трансформації біомаси та напрямків термохімічних перетворень під час проведення технологічних процесів.

У кількох дослідженнях [8,9,10] властивості біовугілля, включаючи вищу теплотворну здатність, щільність енергії та гідрофобність, були оцінені за допомогою емпіричних моделей з елементним складом як незалежними

змінними. Одна з таких емпіричних моделей – рівняння (1) – була розроблена авторами [9] для оцінки теплотворної здатності з високою точністю, порівнянню зі зразками, проаналізованими за допомогою бомбового калориметра [9].

$$GVC = 0,3491C + 1,1783H + 0,1005S - 0,1034O - 0,0151N - 0,0211, \quad (1)$$

де GVC – вища теплотворна здатність матеріалу;

C, H, N та S – концентрації вуглецю, водню, азоту та сірки відповідно.

Враховуючи те, що елементний склад біомаси служить вихідними змінними для кількох емпіричних рівнянь, які використовуються для енергетичної характеристики біомаси, слід приділити максимальну увагу методам, що використовуються для визначення та оцінки хімічних елементів.

Хімічний склад різних типів рослинної біомаси можна визначити звичайними методами класичного хімічного аналізу. Класичний метод, що використовується для визначення елементного складу біомаси – це остаточний аналіз, під час якого зразки спалюють за температури понад 900°C в аналізаторі [10]. У цьому методі концентрації елементів вуглецю C, водню H, азоту N та сірки S оцінюються як функція газів (наприклад, CO₂, N₂O), що виділяються під час горіння зразків; концентрація кисню (O) потім визначається за різницею (100 – C (%) – H (%) – N (%) – S (%) – Зола (%)) на основі висушеної в печі беззолної маси [11].

Хоча класичні методи є типовими та високоточними, вони також є деструктивними, трудомісткими, дорогими та вимагають використання небезпечних хімічних речовин, що генерують велику кількість шкідливих відходів [2]. Крім того, класичні методи відрізняються складністю та високою вартістю. Варто відзначити, що дослідники з різних країн використовують різні підходи та процедури для визначення складу зразків біомаси [45].

Вагомим недоліком таких способів є те, що дослідження зразків потрібно проводити у приміщенні лабораторії. Класичні способи досить складно, а в деяких випадках практично неможливо використовувати на місці розташування досліджуваного матеріалу, відповідно до технологічного процесу, що є досить важливим для комплексного управління якістю продукції на підприємстві.

Незважаючи на значні інвестиції в дослідження і розвиток енергетичних технологій, на даний час недостатньо вивченими є методики

дослідження властивостей біологічної сировини, особливо визначення її хімічної будови. Тому дослідження, аналіз та систематизація методів визначення елементного складу біомаси та продуктів її переробки є актуальним завданням для кращого розуміння для покращення ефективності функціонування та комерціалізації переробних виробництв.

Висвітлення невирішених раніше частин загальної проблеми

Проблеми визначення елементного складу біомаси включають притаманну їй мінливість, оскільки різні типи сировини, а також варіації в межах одного типу, впливають на її хімічний склад. Інші труднощі виникають через відсутність стандартизованих, загальноприйнятих систем класифікації та термінології, що призводить до неузгодженості (або невідповідності) у зборі та інтерпретації даних досліджень. Сучасні переробні підприємства потребують швидких, ефективних та надійних методів визначення хімічного складу біомаси на місці. Такі методи в даний час є недостатньо вивченими, а їх використання є обмеженим. Тому необхідним є проведення досліджень для встановлення можливості застосування методів визначення елементного складу біомаси за допомогою явищ флуоресценції, аналізу спектрів, забезпечених методиками підготовки зразків та відповідним математичним апаратом для обробки даних

Тому, є необхідність у проведенні досліджень для встановлення можливості застосування методів визначення елементного складу біомаси, що базуються на явищах флуоресценції та спектральному аналізі. Для успішної реалізації цих методів критично важливими є: оптимізація методик підготовки зразків; розробка або адаптація відповідного математичного апарату для ефективної обробки та інтерпретації отриманих спектральних даних.

Мета та завдання досліджень

Метою даної роботи є дослідження та систематизація методів визначення елементного складу біопалив та сировини для їхнього виробництва для кращого розуміння процесів теплового перетворення біомаси, а також покращення ефективності функціонування та комерціалізації переробних підприємств.

Для цього потрібно вирішити наступні завдання:

1. Провести дослідження та систематизувати методи встановлення елементного складу лігноцелюлозних матеріалів;

2. Визначити ефективні методи для проведення швидкого та надійного хімічного аналізу елементного складу біопалив та сировини для їх виробництва.

Висвітлення основного матеріалу дослідження

Інфрачервона спектроскопія з перетворенням Фур'є

Дослідження біологічних матеріалів за допомогою інфрачервоної спектроскопії (FTIR) стало альтернативою традиційним методам класичного хімічного аналізу [3]. Інфрачервона спектроскопія – метод дослідження, що базується на спроможності молекул вбирати інфрачервоне випромінювання з відповідною довжиною хвилі. За цього спектри поглинання є унікальними для кожної хімічної речовини. Вони можуть служити “молекулярним відбитком”, таким же унікальними, як і відбиток пальця людини. Тому цей метод можна використовувати для ідентифікації хімічних речовин та вивчення матеріалів [14],

Метод інфрачервоної спектроскопії передбачає аналіз притаманних властивостей для кожної хімічної речовини, завдяки чому є можливість їх порівняння з спектральною бібліотекою. Наявність великої бази даних хімічних речовин у спектральній бібліотеці дозволяє проводити ідентифікацію досліджуваного зразка на основі його унікального “молекулярного відбитка” [15].

Методом інфрачервоної спектроскопії можна проводити дослідження речовин у формі тонкої плівки, порошків, а також можливим є безпосереднє вивчення їхніх поверхонь, включити етап підготовки зразків [2].

Дотепер виконано ряд наукових робіт із використанням методу інфрачервоної спектроскопії для визначення складу та структурної будови деревини, рослинної біомаси [16,17], харчових продуктів [18] і навіть біологічних утворень [19]. Застосування багатовимірного аналізу та програмних пакетів під час проведення досліджень дозволило з високою точністю визначити вміст лігніну, целюлози та геміцелюлози в зразках біомаси [20,21].

В роботі [1] інфрачервону спектроскопію у поєднанні зі статистичним аналізом було застосовано для оцінки змін у тканинах бавовняних рослин, включаючи корінь, стебла, листя та інші частини рослин на стадіях її репродуктивного розвитку та дозрівання. Аналіз коефіцієнтів кореляції діапазонів “молекулярних відбитків” з основними хімічними компонен-

тами показав, що інтенсивність діапазонів при 1620 см^{-1} , 1525 см^{-1} , 1235 см^{-1} та 1050 см^{-1} має позитивну збіжність з рівнями досліджуваних хімічних елементів у рослинах.

Авторами [2] метод інфрачервоної спектроскопії з перетворенням Фур'є було застосовано для аналізу зразків біомаси, отриманої з пагонів кардону, конопель та проса прутоподібного. Під час досліджень, дані про елементний склад зразків біомаси, отримані за допомогою стандартних хімічних методів, порівнювали з відповідними спектрами (наприклад, ІЧ-спектрами) та даними термогравіметричного аналізу (TGA). Такий підхід дозволив визначити та розрізнити серію коливальних піків та областей, виявлених в межах нижнього хвильового числа. Було виявлено, що ці піки здатні кількісно визначати різні хімічні одиниці, такі як лігнін, жири та ліпіди, а також структурні полісахариди – целюлозу, геміцелюлозу та пектин, які є основними складовими рослинних клітин.

Жири та ліпіди легко виявлялися в області $3050\ldots2800\text{ см}^{-1}$, а їхні концентрації визначалися за допомогою ізольованих піків 720 см^{-1} та 728 см^{-1} , якщо вони були присутні.

Концентрацію лігніну визначали за піком 1508 см^{-1} . Геміцелюлоза сприяє формуванню піків 1640 , 1245 см^{-1} , а також 1740 см^{-1} , а її концентрація визначалася в області $850\ldots750\text{ см}^{-1}$. Вміст целюлози кількісно визначали за піком 895 см^{-1} , тоді як пектин з'являвся на піку 915 см^{-1} і також робив свій внесок у сигнал 1640 см^{-1} .

Автори [2] повідомляють, що проведені дослідження дали адекватні результати з точністю близько 20%. Такий результат доводить вищу ефективність використання методу інфрачервоної спектроскопії з перетворенням Фур'є (FTIR) для швидшої оцінки концентрації цих компонентів у біомасі, ніж класичні хімічні методи. Цей метод може бути корисним для біотехнологічних процесів, що включають рослинну сировину та готові продукти її переробки.

Таким чином, можна зробити висновок, що склад біомаси можна адекватно визначати за допомогою інфрачервоних спектрів з перетворенням Фур'є, без необхідності застосування інтенсивних методів аналізу, що забезпечить швидший та ефективніший підхід.

Тим не менш, інфрачервоний аналіз поверхонь біомаси не вважається достатньо чутливим, оскільки глибина проникнення інфрачервоного випромінювання у зразок становить близько 100 мкм [4]. За цього, зміни інфрачер-

воних характеристик в результаті змін хімії поверхні в деяких випадках маскуються спектральними особливостями, що походять від об'єму [5].

Рентгенівська фотоелектронна спектроскопія

Рентгенівська фотоелектронна спектроскопія (XPS), також відома як електронна спектроскопія для хімічного аналізу (ESCA) — це неруйнівний метод досліджень, за допомогою якого можна встановити атомний склад зразків, а також отримати інформацію про їх константи зв'язування, ступені окислення та видоутворення.

Під час проведення аналізу за допомогою рентгенівської фотоелектронної спектроскопії (XPS) електрони вилітають з основних рівнів атомів на поверхню, а енергія зв'язку визначається з їхньої кінетичної енергії та енергії падаючого променя [16]. Саме тоді на енергію зв'язку даного атома впливає його хімічне оточення. Оскільки глибина проникнення рентгенівських променів у зразок складає $5\text{--}10\text{ нм}$, то даний метод дозволяє проводити специфічний аналіз поверхні, а не об'ємний хімічний аналіз [4].

Рентгенівська фотоелектронна спектроскопія — це один з найефективніших та широко використовуваних методів дослідження поверхні матеріалів у всіх галузях науки та техніки [22,23].

Завдяки своїй чутливості до хімічного складу та середовища атомних частинок, рентгенівська фотоелектронна спектроскопія широко використовується для визначення особливостей структури вуглецю на поверхні графіту та оксидів графену, що надає цінну інформацію про механічні та електронні властивості цих матеріалів [18].

Не зважаючи на те, що метод рентгенівської фотоелектронної спектроскопії спочатку розроблявся для дослідження тонких плоских плівок, в даний час його можна використовувати для дослідження порошків. Використання методу для дослідження порошків вимагає спеціальних методів підготовки проб [24].

Одним з поширеніших способів підготовки є пресування порошку в індієву фольгу високої чистоти. Інший підхід передбачає розчинення порошку у розчиннику, що швидко випаровується, а потім виготовлення зразка шляхом відливання на підкладку. Використання липкої вугільної стрічки для прилипання порошку до диска або стискання зразка в таблетку також є способом його підготовки. Кожний

з перелічених способів передбачає прикріплення порошку до основи, оскільки неприкріплений порошок у зваженому стані, може забруднювати вакуумну камеру приладу. Важливим також є те, щоб зразок був повністю сухим. В іншому випадку залишки розчинника, присутні у зразку, можуть зруйнувати необхідний рівень вакууму, а також забруднити машину, впливаючи на дані поточних і майбутніх досліджень [25].

Результати проведених досліджень [19] демонструють здатність методу рентгенівської фотоелектронної спектроскопії (XPS) оцінювати хімічний склад поверхні лігноцелюлозних продуктів. Авторами повідомляється також, що даний вид аналізу не дає оцінки морфології досліджуваних зразків.

В роботі [4] продемонстровано застосування методу рентгенівської фотоелектронної спектроскопії (XPS) для вивчення лігноцелюлозних матеріалів, таких як тріска деревної верби та павловнії. Результати досліджень демонструють здатність методу оцінювати характеристики поверхні, такі як хімічний склад та наявні функціональні групи в лігноцелюлозних продуктах. Повідомляється, що цим методом можна визначати вміст вуглецю та кисню в досліджуваних зразках, що дає можливість оцінювати теплотворну здатність продуктів. Крім того проведені в роботі дослідження допомагають з'ясувати механізм адсорбції, а саме, встановлення розташування місць, де відбувається адсорбція, ступінь окиснення, а також оцінити координацію адсорбованих іонів. Встановлено, що досліджувані лігноцелюлозні матеріали можуть бути використані як носії для каталітично активних компонентів, що збільшують поглинальну здатність процесу. Процес адсорбції широко використовується для очищення забруднених ґрунтів за допомогою біовугілля [26]. Тому проведені дослідження є актуальними з практичної точки зору.

Визначення хімічної структури та складу біопалива за допомогою рентгенівської фотоелектронної спектроскопії може надати фундаментальні знання про їх структури, корисні для розуміння та прогнозування поведінки палив під час використання.

Авторами [27] проведено дослідження елементного складу соломи - побічного продукту сільськогосподарського виробництва харчових продуктів та кормів. Повідомляється, що XPS-спектри соломи дають уявлення як про її елементний склад, так і про рівень зв'язків між елементами. В роботі було визначено вміст вуглецю, водню, азоту сірки та кисню в біома-

сі, проведено аналіз зольності її зразків та встановлено склад золи, вираженого через оксиди,

В роботі [8] метод фотоелектронної спектроскопії (XPS) було використано для визначення елементного складу біовугілля. На основі досліджень було розроблено адитивну модель залежності вищої теплоти згоряння біовугілля та його елементний склад. Кореляція між експериментальними та розрахунковими даними становила 80% та вище. Автори також встановили, що точність визначення елементного складу біовугілля суттєво залежить від обраного аналітичного методу. З огляду на це, у роботі запропоновано (або розроблено) узагальнені адитивні моделі. Ці моделі можуть бути використані для калібрування та узгодження даних елементного складу, отриманих за допомогою різних аналітичних підходів, забезпечуючи таким чином вищу надійність результатів.

Повідомляється, що під час досліджень за допомогою методу фотоелектронної спектроскопії елементний склад біовугілля визначали шляхом інтегрування площі (при різних енергіях зв'язку), обмеженої піками на оглядовому спектрі, що генерувався, коли сфокусований рентгенівський промінь збуджував внутрішні орбітальні та зв'язуючі електрони цільових зразків [8,28]. Елементний склад, як атомні концентрації, також визначався у вигляді відсоткового відношення інтенсивності елемента до інтенсивності всього спектру та/або вимірювання.

Таким чином, можна зробити висновки, що рентгенівська фотоелектронна спектроскопія, є поверхнево-чутливим методом та корисним для дослідження вмісту вуглецю, кисню, водню та азоту в різних органічних матеріалах.

Метод рентгенівської фотоелектронної спектроскопії має помітні переваги перед класичним методом, оскільки він, окрім елементного складу, може одночасно вимірювати інші властивості біовугілля, наприклад стани зв'язків [29], та має кращі економічні показники під час використання. Разом з тим, для правильного застосування цього методу необхідні математичні рівняння для калібрування засобів вимірювання за допомогою класичного методу.

Рентгенофлуоресцентний аналіз

Флуоресценція – один із двох видів фотолюмінесценції, випромінювання світла речовиною, яка поглинає світло або інше електромагнітне випромінювання [30]. Під впливом

ультрафіолетового випромінювання багато речовин світяться (флуоресціюють) кольоровим видимим світлом. Колір випромінюваного світла залежить від хімічного складу речовини.

Флуоресцентні матеріали зазвичай перестають світитися майже одразу після припинення дії джерела випромінювання. Це відрізняє їх від іншого типу випромінювання світла – фосфоресценції. Фосфоресцентні матеріали продовжують випромінювати світло ще деякий час після припинення випромінювання. Ця різниця в тривалості є результатом квантових спінових ефектів [31].

Оскільки структура атомного рівня кожного елемента є специфічною, енергія рентгенівських, променів, що випромінюються при його збудженні та стрибках, також специфічна і називається характеристичним рентгенівським випромінюванням. Визначаючи енергію характеристичного рентгенівського випромінювання, можна встановити присутність відповідного елемента, а інтенсивність характеристичного рентгенівського випромінювання (або кількість фотонів рентгенівського випромінювання) представляє вміст елемента [32].

Розроблення надійних та ефективних концепцій перероблення лігноцелюлозної біомаси вимагає врахування наявності в ній мінеральних елементів, оскільки вони є присутніми у високій концентрації в різних видах біологічної сировини [33].

Мінеральні елементи, зокрема кальцій, магній та кремній можуть спричинити певні практичні труднощі в роботі обладнання, оскільки в процесі переробки відбувається їхнє накопичення у різних потоках, що призводить до відкладення цих мінералів на стінках реакторів та утворення накипу в трубах [34].

Мінерали часто концентруються у вихідних фракціях та впливають на валоризацію целюлози та лігніну [35]. Тому розуміння поведінки мінеральних елементів під час переробки біомаси є необхідним чинником для ефективного проведення процесу. Елементний аналіз технологічних зразків є важливим кроком до такого розуміння [36].

У роботах [37,38] розглядалася роль лужних та лужноземельних металів, присутніх у біомасі на процес піролізу. Автори повідомили про синергетичні та каталітичні ефекти, які змінюють вихід та хімічний склад біовугілля та піролізного газу. Біовугілля з високою концентрацією лужних та лужноземельних металів, має високий рівень рН і у випадку використання його у якості добрив для ґрунту, може мати значний позитивний ефект. Однак чітке

розуміння зв'язку між цими металами та структурою та походженням біомаси насправді все ще відсутнє.

Нещодавно було показано, що рентгенофлуоресцентна спектроскопія (XRF) забезпечує швидкий та ефективний метод елементного аналізу зразків твердої біомаси безпосередньо [39,40,41].

В роботі [42] показано можливість використання методу рентгенофлуоресцентної спектроскопії для багатоелементного аналізу, виконаного для п'ятиох зразків поширених видів біомаси: проса, кукурудзи, деревини евкаліпту, бука та сосни. Метод включає підготовку біомаси – її подрібнення до розмірів 200 мкм, пресування біомаси в гранули (таблетки), а потім проведення досліджень з можливістю запису повного спектру рентгенівського випромінювання. Під час проведення досліджень кількість вологи в досліджуваних зразках не перевищувала 8%. За таких умов дані рентгенівської флуоресценції відображають стан практично сухої речовини. Встановлено, що метод рентгенівської флуоресценції дозволяє визначати не тільки елементний склад зразків біомаси, але й вихід та склад їхньої золи. Очевидно, що вихід золи та її склад є важливими параметрами для багатьох застосувань біомаси, включаючи її спалювання та газифікацію.

Автори повідомляють про значні відносні похибки, які виникали під час визначення вмісту деяких хімічних елементів, сягаючи меж 50–90 %. Це підкреслює необхідність ретельної валідації застосування обраного методу для конкретних елементів. Незважаючи на це, стверджується, що дані рентгенофлуоресценції (РФА), загалом, демонструють невелике випадкове розсіювання результатів, проте часто домінують систематичні помилки.

В роботі [36] за допомогою методу рентгенофлуоресцентної спектроскопії проводилось дослідження поведінки мінеральних елементів у процесі гідротермальної обробки біомаси. Для проведення досліджень використовувались: пшенична солома, кукурудзяні стебла, багаса цукрової тростини, порожні пучки пальмової олії та деревина тополі. Встановлено, що під час проведення процесу гідротермальної обробки для всіх видів біомаси спостерігалось накопичення кремнію, алюмінію та кальцію у твердій фракції, тоді як калій та магній розчинялися та видалялися з газами та рідинами. Концентрація натрію була досить низькою. Загальних тенденцій щодо концентрації фосфору, сірки та заліза не спостерігалось. Важливим є те, що передумовою для проведення

елементного аналізу за допомогою рентгенофлуоресцентної спектрометрії є визначення середньої хімічної формули органічної матриці зразків біомаси, отриманої в процесі.

Для оптимізації роботи теплових та електричних електростанцій, що працюють на деревині, важливим є швидке визначення хімічного складу твердого біопалива на місці перед його спалюванням. Однак, стандартні процедури хімічного аналізу є трудомісткими, дорогими та вимагають висококваліфікованого персоналу. Вони не підходять для онлайн-аналізу палива. Для швидкого визначення хімічних елементів у деревному паливі на місці автори [43] застосували рентгенофлуоресцентний аналіз. Рентгенофлуоресцентний аналізатор був відкалібрований з використанням кількох зразків деревної тріски. Дані досліджень до та після калібрування порівнювалися з еталонним методом.

Результати досліджень показують, що рентгенофлуоресцентний аналіз можна рекомендувати для визначення елементів Mg, P, K, Ca, Si, Al, Cr, Mn, Fe, Zn і Pb, тоді як S, Cl, Ti і Ni можна потенційно визначати за допомогою калібрування для конкретних елементів. Елементи Cu, As та Cd не вдалося виміряти задовільно, оскільки багато вимірювань були нижчими за межу виявлення. Автори вважають за доцільне використання результатів їхнього дослідження для визначення певних хімічних елементів в біомасі вже в даний час та вдосконалення вимірювальних систем для можливостей розширення визначення кількості хімічних елементів у біомасі.

Наведені літературні джерела стосовно застосування рентгенофлуоресценції для визначення хімічного складу біомаси в основному підтверджують його ефективність. Отримані експериментальні дані мають відхилення в діапазоні від $\pm 10\%$ до $\pm 20\%$, що видається цілком задовільним для багатьох застосувань. Разом з тим, для деяких елементів систематичні похибки (відхилення) можуть бути досить вираженими і складати – 50...100%. Тому, на нашу думку, даний напрямок досліджень знаходиться на початковій стадії розвитку та потребує подальших досліджень.

Висновки

1. Важливим чинником, що визначає ефективність процесів переробки біомаси, є елементний склад вихідної сировини, зміна його в процесі переробки та хімічний склад готових біопалив. Проведення швидкого та надійного елементного аналізу біомаси та продуктів її

переробки має важливе значення для комерціалізації виробництва.

2. В роботі проаналізовано основні способи визначення складу біомаси: класичний, інфрачервона спектроскопія з перетворенням Фур'є, рентгеновська фотоелектронна спектроскопія та рентгенофлуоресцентний аналіз.

3. Встановлено, що класичний метод є високоточним, проте трудомістким, дорогими та вимагає використання небезпечних хімічних речовин, що генерують велику кількість шкідливих відходів. Метод інфрачервоної спектроскопії з перетворенням Фур'є є досить ефективним для швидшої оцінки елементного складу біомас, однак його вважають не достатньо чутливим. Рентгеновська фотоелектронна спектроскопія (XPS), є поверхнево-чутливим методом та корисним для дослідження вмісту вуглецю, кисню та азоту в різних органічних матеріалах. У той же час для отримання точних експериментальних даних при застосуванні цього методу необхідними є математичні залежності для калібрування засобів вимірювання за допомогою класичного методу. Використання рентгенофлуоресценції для визначення хімічного складу біомаси в основному підтверджують ефективність методу. Отримані експериментальні дані мають відхилення в діапазоні від $\pm 10\%$ до $\pm 20\%$, що видається цілком задовільним для багатьох застосувань, але для деяких елементів систематичні похибки можуть бути досить вираженими і складати – 50...100%.

4. Проведені в роботі дослідження дають підстави зробити висновок, що для визначення хімічного складу біомаси в процесі її переробки перспективними є швидкі, неруйнівні методи аналізу, які можна проводити на місці. Такий підхід сприяє комерціалізації процесів виробництва біопалив, а також торгівлі, як сировиною так і готовими продуктами. Водночас даний напрямок знаходиться на початковій стадії розвитку та потребує подальших досліджень.

Подяки

Відсутні.

Конфлікт інтересів

Відсутній.

Список використаних джерел / References

1. He Z., Liu Y., Kim H. J., Tewolde H., Zhang H. (2022). Fourier transform infrared spectral features of plant biomass components during cotton organ development and their biological implications. *Journal of Cotton Research*, 5, 11. <https://doi.org/10.1186/s42397-022-00117-8>.
2. Tsaousis P. C., Sarafidou M., Soto Beobide A. (2025). Quantification of plant biomass composition via a single FTIR absorption spectrum supported by reference component extraction/isolation protocols. *Biomass Conv. Bioref*, 15, 25273–25288. <https://doi.org/10.1007/s13399-025-06858-1>.
3. Xu F., Yu J., Tesso T., Dowell F., Wang D. (2013). Qualitative and Quantitative Analysis of Lignocellulosic Biomass Using Infrared Techniques: A Mini-Review. *Applied Energy*, 104, 801–809. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2012.12.019>.
4. Avramova A., Radoykova Hr., Valchev I. V., Mehandjiev D. R. (2018). X-ray photoelectron spectroscopy investigations of lignocellulosic materials. *Bulgarian Chemical Communications*, 50(3), 411–416. https://www.researchgate.net/publication/328800658_X-ray_photoelectron_spectroscopy_investigations_of_lignocellulosic_materials.
5. Panchuk M., Kryshchtopa S., Shlapak L., Kryshchtopa L., Panchuk A., Yarovy V., Sladkovskyi A. (2017). Main Trends of Biofuels Production in Ukraine. *Transport Problems*, 12(4), 95–103. <https://dspace.nuft.edu.ua/handle/123456789/26654>.
6. Панчук А. М., Панчук М. В., Дейнега Р. О. Перспективи впровадження технологій піролізу біомаси для збільшення обсягів виробництва біопалив. *Нафтогазова енергетика*. 2024. № 2(42). С. 137–145 / Panchuk A. M., Panchuk M. V., Deineha R. O. (2024). Perspektyvy vprovadzhennia tekhnolohii pirolizu biomasy dlia zbilshannia obsiahiv vyrobnytstva biopalyv [Prospects for introducing biomass pyrolysis technologies to increase of volumes biofuel production]. *Naftohazova enerhetyka [Oil and Gas Power Engineering]*, 2(42), 137–145. [https://doi.org/10.31471/1993-9868-2024-2\(42\)-137-145](https://doi.org/10.31471/1993-9868-2024-2(42)-137-145) [in Ukrainian].
7. Panchuk M., Kryshchtopa S., Śladkowski A., Panchuk A. (2020). Environmental Aspects of the Production and Use of Biofuels in Transport. In Śladkowski A. (Eds.), *Ecology in Transport: Problems and Solutions* (Vol. 124). Springer, Cham. https://doi.org/10.1007/978-3-030-42323-0_3.
8. Nzediegwu C., Naeth M. A., Chang S. X. (2021). Elemental composition of biochars is affected by methods used for its determination. *J. Anal. Appl. Pyrolysis*, 156, 105174. <https://doi.org/10.1016/j.jaap.2021.105174>.
9. Channiwal S. A., Parikh P. P. (2002). A unified correlation for estimating HHV of solid, liquid and gaseous fuels. *Fuel*, 81(8), 1051–1063. [https://doi.org/10.1016/S0016-2361\(01\)00131-4](https://doi.org/10.1016/S0016-2361(01)00131-4).
10. Feng D., Zhao Y., Zhang Y., Gao J., Sun S. (2017). Changes of biochar physiochemical structures during tar H₂O and CO₂ heterogeneous reforming with biochar. *Fuel Process Technol*, 165, 72–79. <https://doi.org/10.1016/j.fuproc.2017.05.011>.
11. Панчук А. М., Панчук М. В. Особливості визначення хімічного складу біомаси. *Теоретичні і прикладні проблеми фізики, математики та інформатики: матеріали тез доповідей XIV Міжнародної науково-практичної конференції, м. Чернігів, 2–23 травня 2025 р. У 2 т. Чернігів: НУ «Чернігівська політехніка», 2025. Т. 1. С. 259. / Panchuk A. M., Panchuk M. V. (2025). Osoblyvosti vyznachennia khimichnoho skladu biomasy [Peculiarities of determining the chemical composition of biomass]. In *Teoretychni i prykladni problemy fizyky, matematyky ta informatyky: materialy tez dopovidei XIV Mizhnarodnoi naukovo-praktychnoi konferentsii* (Vol. 1, p. 259). NU «Chernihivska politehnika». URL: <https://conf.chnu.edu.ua/conf/2025/fizmat> [in Ukrainian].*
12. Wang S., Ai S., Nzediegwu C., Kwak J. H., Islam M. S., Li Y., Chang S. X. (2020). Carboxyl and hydroxyl groups enhance ammonium adsorption capacity of iron (III) chloride and hydrochloric acid modified biochars. *Bioresour Technol*, 309, 123390. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2020.123390>.
13. Srinivasan P., Sarmah A. K. (2015). Characterisation of agricultural waste-derived biochars and their sorption potential for sulfamethoxazole in pasture soil: a spectroscopic investigation. *Sci Total Environ*, 502, 471–480. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2014.09.048>.
14. Khan S. A., Khan S. B., Khan L. U., Farooq A., Akhtar K., Asiri A. M. (2018). Fourier Transform Infrared Spectroscopy: Fundamentals and Application in Functional Groups and Nanomaterials Characterization. In Sharma S. (Eds.), *Handbook of Materials Characterization*. Springer, Cham. https://doi.org/10.1007/978-3-319-92955-2_9.

15. Cu Y., Liao Y., Sun Y., Wang W., Wu J., Dai W., Huang T. (2024). Advanced XPS-Based Techniques in the Characterization of Catalytic Materials: A Mini-Review. *Catalysts*, 14(9), 595. <https://doi.org/10.3390/catal14090595>.
16. Shard A. G., Counsell J. D. P., Cant D. J. H., Smith E. F., Navabpour P., Zhang X., Blomfield C. J. (2019). Intensity calibration and sensitivity factors for XPS instruments with monochromatic Ag L α and Al K α sources. *Surf. Interface Anal.*, 51, 763–773. <https://doi.org/10.1002/sia.6647>.
17. Cerciello F., Forgione A., Lacovig P., Lizzit S., Fabozzi A., Salatino P., Senneca O. (2025). The Influence of Mineral Matter on X-Ray Photoelectron Spectroscopy Characterization of Surface Oxides on Carbon. *Appl. Sci.*, 15(6), 2993. <https://doi.org/10.3390/app15062993>.
18. Kim S., Zhou S., Hu Y., Acik M., Chabal Y. J., Berger C. de Heer W., Bongiorno A., Riedo E. (2012). Room-temperature metastability of multilayer graphene oxide films. *Nat. Mater.*, 11, 544. <https://hal.science/hal-00911814v1/document>.
19. Grams J. (2022). Surface analysis of solid products of thermal treatment of lignocellulosic biomass. *Journal of Analytical and Applied Pyrolysis*, 16, 105429. <https://doi.org/10.1016/j.jaap.2021.105429>.
20. Rhein F., Sehn T., Meier M. A. R. (2025). Efficient and accurate determination of the degree of substitution of cellulose acetate using ATR-FTIR spectroscopy and machine learning. *Sci Rep*, 15, 2904. <https://doi.org/10.1038/s41598-025-86378-0>.
21. Tsaousis P. C., Sarafidou M., Soto Beobide A. (2025). Quantification of plant biomass composition via a single FTIR absorption spectrum supported by reference component extraction/isolation protocols. *Biomass Conv. Bioref.* <https://doi.org/10.1007/s13399-025-06858-1>.
22. Cui Y., Liao Y., Sun Y., Wang W., Wu J., Dai W., Huang T. (2024). Advanced XPS-Based Techniques in the Characterization of Catalytic Materials: A Mini-Review. *Catalysts*, 14, 595. <https://doi.org/10.3390/catal14090595>.
23. Krishna D. N. G., Philip J. (2022). Review on surface-characterization applications of x-ray photoelectron spectroscopy (xps): recent developments and challenges. *Applied Surface Science Advances*, 12, 100332. <https://doi.org/10.1016/j.apsadv.2022.100332>.
24. Stevie F. A., Garcia R., Shallenberger J., Newman J. G., Donley C. L. (2020). Sample handling, preparation and mounting for XPS and other surface analytical techniques. *Journal of Vacuum Science and Technology A: Vacuum, Surfaces and Films*, 38(6), 063202. <https://doi.org/10.1116/6.0000421>.
25. Bennet F., Müller A., Radnik J., Hachenberger Y., Jungnickel H., Laux P., Luch A., Tentschert J. (2020). Preparation of Nanoparticles for ToF-SIMS and XPS Analysis. *J. Vis. Exp.*, 163, e61758. <https://doi.org/10.3791/61758>.
26. Yaashikaa P. R., Kumar P. S., Varjani S., Saravanan A. (2020). A critical review on the biochar production techniques, characterization, stability and applications for circular bioeconomy. *Biotechnol Rep (Amst)*, 28, e00570. <https://doi.org/10.1016/j.btre.2020.e00570>.
27. Jiang G., Hussein G. A., Baxter L. L., Linford M. R. (2005). Analysis of straw by x-ray photoelectron spectroscopy. *Surface Science Spectra*, 11(1), 91–96. <https://doi.org/10.1116/11.20040801>.
28. Rose N. L., Yang H., Turner S. D., Simpson G. L. (2012). An assessment of the mechanisms for the transfer of lead and mercury from atmospherically contaminated organic soils to lake sediments with particular reference to Scotland, UK. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 82, 113–135. <https://doi.org/10.1016/j.gca.2010.12.026>.
29. El-Naggar A., Shaheen S. M., Ok Y. S., Rinklebe J. (2018). Biochar affects the dissolved and colloidal concentrations of Cd, Cu, Ni, and Zn and their phytoavailability and potential mobility in a mining soil under dynamic redox-conditions. *The Science of the Total Environment*, 624, 1059–1071. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2017.12.067>.
30. Висоцький П. П., Монастирський Г. Є., Дужерученко О. Г. Використання ефектів дифракції для визначення методом рентгенофлуоресцентного аналізу концентрації вуглецю у сталях. *Теоретичні і прикладні проблеми фізики, математики та інформатики: матеріали конференції*. Київ: КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2023. С. 17–20. / Vysotskyi P. P., Monastyrskyi H. Ye., Duzheruchenko O. H. (2023). Vykorystannia effektiv dyfraktsii dlia vyznachennia metodom renthenofluorestsentnoho analizu kontsentratsii vuhletsu u staliakh [Using diffraction effects to determine carbon concentration in steels by X-ray fluorescence analysis]. In *Teoretychni i prykladni problemy fizyky, matematyky ta informatyky: materialy konferentsii* (pp. 17–20). KPI im. Ihoria Sikorskoho. URL: <https://ela.kpi.ua/handle/123456789/62314> [in Ukrainian].

31. Lachance G. R. (1994). *Quantitative X-ray fluorescence analysis: Theory and application*. Wiley.
32. Beckhoff B., Kanngießer B., Langhoff N., Wedell R., Wolff H. (2006). *Handbook of Practical X-Ray Fluorescence Analysis*. Springer. <https://link.springer.com/book/10.1007/978-3-540-36722-2>.
33. Raveendran K., Ganesh A., Khilar K. C. (1995). Influence of Mineral Matter on Biomass Pyrolysis Characteristics. *Fuel*, 74(12), 1812–1822. [https://doi.org/10.1016/0016-2361\(95\)80013-8](https://doi.org/10.1016/0016-2361(95)80013-8).
34. Patwardhan P. R., Satrio J. A., Brown R. C., Shanks B. H. (2010). Influence of inorganic salts on the primary pyrolysis products of cellulose. *Bioresour Technol*, 101(12), 4646–4655. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2010.01.112>.
35. Le D. M., Sørensen H. R., Knudsen N. O., Meyer A. S. (2015). Implications of silica on biorefineries – interactions with organic material and mineral elements in grasses. *Biofuels, Bioproducts and Biorefining*, 9, 109–121. <https://doi.org/10.1002/bbb.1511>.
36. Le D. M., Sørensen H. R., Meyer A. S. (2017). Elemental analysis of various biomass solid fractions in biorefineries by X-ray fluorescence spectrometry. *Biomass and Bioenergy*, 97, 70–76. <https://doi.org/10.1016/j.biombioe.2016.12.018>.
37. Wang B., Liu N., Wang S., Li X., Li R., Wu Y. (2023). Study on Co-Pyrolysis of Coal and Biomass and Process Simulation Optimization. *Sustainability*, 15(21), 15412. <https://doi.org/10.3390/su152115412>.
38. Panchuk A., Panchuk M., Śladkowski A., Kryshchuk S., Kryshchuk L. (2024). Methanol potential as an environmentally friendly fuel for ships. *Naše More*, 71(2), 75–82. <https://doi.org/10.17818/NM/2024/2.5>.
39. Andersen L. K., Morgan T. J., Boulamanti A. K., Alvarez P., Vassilev S. V., Baxter D. (2013). Quantitative X-ray fluorescence analysis of biomass: Objective evaluation of a typical commercial multi-element method on a WD-XRF spectrometer. *Energy Fuels*, 27(12), 7439–7454. <https://doi.org/10.1021/ef4015394>.
40. Margui E., Hidalgo M., Queralt I. (2005). Multielemental fast analysis of vegetation samples by wavelength dispersive X-ray fluorescence spectrometry: Possibilities and drawbacks. *Spectrochim. Acta, Part B*, 60(10-11), 1363–1372. <https://doi.org/10.1016/j.sab.2005.08.004>.
41. Margui E., Queralt I., Hidalgo M. (2009). Application of X-ray fluorescence spectrometry to determination and quantitation of metals in vegetal material. *Trends Anal. Chem*, 28(3), 362–372. <https://doi.org/10.1016/j.trac.2008.11.011>.
42. Morgan T., George A., Boulamanti A., Álvarez P., Adanouj I., Dean C., Vassilev S., Baxter D., Andersen L. (2015). Quantitative X-ray Fluorescence Analysis of Biomass (Switchgrass, Corn Stover, Eucalyptus, Beech, and Pine Wood) with a Typical Commercial Multi-Element Method on a WD-XRF Spectrometer. *Energy and Fuels*, 29(3), 1669–1685. <https://doi.org/10.1021/ef502380x>.
43. Endriss F., Kuptz D., Wissmann D., Hartmann H., Dietz E., Kappler A., Thorwarth H. (2024). Evaluation and Optimization of an X-ray Fluorescence Analyzer for Rapid Analysis of Chemical Elements in Solid Biofuels. *Energy and Fuels*, 38(17), 16426–16440. <https://doi.org/10.1021/acs.energyfuels.4c01771>.

IMPROVEMENT OF METHODS FOR RESEARCHING THE ELEMENTAL COMPOSITION OF BIOFUELS AND RAW MATERIALS FOR THEIR PRODUCTION

Panchuk A. M. *

PhD, assistant

Ivano-Frankivsk National Technical University of Oil and Gas

Karpatska Str., 15, Ivano-Frankivsk, 76019, Ukraine

<https://orcid.org/0000-0003-1784-7374>,

e-mail: andrii_panchuk@ukr.net

Boichuk V. M.

Doctor of Physical and Mathematical Sciences, Professor
Vasyl Stefanyk Carpathian National University
Shevchenko Str., 57, Ivano-Frankivsk, 76000, Ukraine
<https://orcid.org/0000-0002-3870-1481>
e-mail: volodymyra.boichuk@pnu.edu.ua

Prysiashniuk P. M.

Doctor of Technical Sciences, Professor
Ivano-Frankivsk National Technical University of Oil and Gas
Karpatska Str., 15, Ivano-Frankivsk, 76019, Ukraine
<https://orcid.org/0000-0002-8325-3745>,
e-mail: pavlo.prysiashniuk@nung.edu.ua

Panchuk M. V.

Candidate of Technical Sciences, Associate Professor
Ivano-Frankivsk National Technical University of Oil and Gas
Karpatska Str., 15, Ivano-Frankivsk, 76019, Ukraine
<https://orcid.org/0000-0002-4898-2707>,
e-mail: myroslav_panchuk@ukr.net

Sheketa V. I.

Doctor of Technical Sciences, Professor
Ivano-Frankivsk National Technical University of Oil and Gas
Karpatska Str., 15, Ivano-Frankivsk, 76019, Ukraine
<https://orcid.org/0000-0003-1784-7374>,
e-mail: vasylsheketa@gmail.com

Abstract. Lignocellulosic biomass is a reliable source of renewable energy and important chemicals for industrial use. Its popularity is due to its high prevalence, limited environmental impact and relatively low price. One of the most promising methods for converting this type of raw material into biofuel is thermal treatment. Thermal treatment allows for the formation of a wide range of useful gaseous, liquid, and solid products depending on the reaction conditions. The main and most important factor determining the efficiency of processing is the elemental composition of the initial biomass, its change during processing, and the composition of the finished products. Rapid and reliable elemental analysis of biomass and its processing products is important for commercialising production. The paper discusses the main methods for determining the composition of biomass, in particular, classical, Fourier transform infrared spectroscopy, X-ray photoelectron spectroscopy, and X-ray fluorescence analysis. The features of each method are analysed. The classical method used to determine the elemental composition of biomass is highly accurate but, at the same time, labour-intensive, expensive and requires the use of hazardous chemicals that generate large amounts of waste. The Fourier transform infrared spectroscopy (FTIR) method is quite effective for a faster assessment of the elemental composition of biomass, but it is considered insufficiently sensitive. X-ray photoelectron spectroscopy (XPS) is a surface-sensitive method and useful for studying the carbon, oxygen and nitrogen content in various organic materials, but to obtain accurate experimental data when using this method to determine the elemental composition of biomass, mathematical dependencies are required to calibrate the measuring instruments using the classical method. The use of X-ray fluorescence (XRF) to determine the chemical composition of biomass basically confirms the effectiveness of the method. The experimental data obtained have deviations in the range from $\pm 10\%$ to $\pm 20\%$, which seems quite satisfactory for many applications. At the same time, for some elements, systematic errors (deviations) can be quite pronounced and amount to 50–100%. Therefore, in our opinion, this direction is at an early stage of development and needs improvement. The research conducted in this work gives grounds to conclude that non-destructive control methods that can be carried out on site are promising for determining the elemental composition of biomass during processing. This approach contributes to the commercialisation of biofuel production processes and trade in both raw materials and finished products.

Keywords: lignocellulosic biomass; elemental composition; non-destructive testing methods.