

Технічні науки

УДК 664.2.032.1

Золотовська Олена Володимирівна

*кандидат технічних наук,
доцент кафедри тракторів і сільськогосподарських машин
Дніпровський державний аграрно-економічний університет*

Золотовская Елена Владимировна

*кандидат технических наук,
доцент кафедры тракторов и сельскохозяйственных машин
Днепропетровский государственный аграрно-экономический университет*

Zolotovs'ka Olena

Candidate of Technical Sciences, Associated Professor

Dnipro State Agrarian and Economic University

ОСОБЛИВОСТІ ФОРМУВАННЯ СКЛАДУ ПРОДУКТІВ

ЗГОРЯННЯ ПІРОЛІЗНОГО ГАЗУ

ОСОБЕННОСТИ ФОРМИРОВАНИЯ СОСТАВА ПРОДУКТОВ

СГОРАНИЯ ПИРОЛИЗНОГО ГАЗА

PECULIARITIES OF FORMATION OF PYROLYSIS GAS

COMBUSTION PRODUCTS COMPOSITION

Анотація. В статті наведені дослідження складу продуктів згоряння піролізного газу методом газової хроматографії. Представлені експериментальні дані, які дозволяють визначити раціональні режими проведення процесу піролізу з рослинної біомаси для отримання газу, з можливістю його використання в сільськогосподарському виробництві.

Ключові слова: термічне розкладання часток, піролізний газ, хроматографія, біомаса, температура.

Аннотация. В статье приведены исследования состава продуктов сгорания пиролизного газа методом газовой хроматографии. Представленные экспериментальные данные позволяют определять рациональные режимы проведения процесса пиролиза из растительной биомассы для получения газа, с возможностью его использования в сельскохозяйственном производстве.

Ключевые слова: термическое разложение частиц, пиролизный газ, хроматография, биомасса, температура.

Summary. The article presents a study of the composition of the combustion products of pyrolysis gas by gas chromatography. The presented experimental data make it possible to determine the rational modes of the pyrolysis process from plant biomass to obtain gas, with the possibility of using it in agricultural production.

Key words: thermal decomposition of particles, pyrolysis gas, chromatography, biomass, temperature.

Постановка проблеми. Технології утилізації відходів рослинного походження знаходяться на початку свого розвитку в Україні та мають хороші перспективи для комерціалізації в найближчому майбутньому, особливо з різким підвищенням вартості природного газу. Відомо, що відходи сільськогосподарського виробництва (солома, стебла і качани кукурудзи, стебла і лузга соняшника та інші відходи біомаси) складають основу потенціалу біомаси в Україні [1-2].

Піроліз відходів біомаси рослинного походження є практично єдиною можливою технологією для використання в транспортних установках, оскільки технології прямого спалювання та газифікації не мають споживача на виробниче тепло і генераторний газ безпосередньо в місцях збору (виращування) сільськогосподарських культур. Також,

використання транспортних установок дозволить значно знизити собівартість енергії виробленої з біомаси внаслідок відсутності капітальних і експлуатаційних витрат на брикетування, зберігання і сушку біомаси. Наприклад, швидкий піроліз деревини або шкарлупи горіха при температурі 800-900°C призводить до утворення 10% твердого деревного вугілля і перетворює 60% вихідної сировини в газ, який містить велику кількість водню і монооксиду вуглецю. Швидкий піроліз може скласти конкуренцію традиційному піролізу, але для масштабного використання його необхідно відпрацювати в технологічному обсязі. В даний час традиційний піроліз вважається найбільш привабливим видом. Так як використання відносно низьких температур означає, що в атмосферу потрапляє мала кількість забруднювачів, якщо порівнювати зі спалюванням. Ця обставина дає екологічну перевагу переробці деяких видів відходів.

Відомо, що температура впливає на перебіг термічного розкладу в процесі піролізу, в результаті якого сировинна маса розкладається з утворенням газоподібних продуктів. Вибір оптимального значення температури зумовлює ефективність здійснення процесу термічної переробки відходів біомаси, таких як рисове і гречане лушпиння, деревна тирса, шкарлупа горіхів, лушпиння соняшнику та інше.

Тому **метою роботи** є визначення складу продуктів згоряння піролізного газу для подальшого пошуку якісного функціонального взаємозв'язку теплоенергетичних показників піролізного газу і температури теплоносія. В свою чергу, склад продуктів згоряння залежить від складу горючого газу (складу продуктів піролізу). Одним з ефективних методів аналізу, що дозволяє отримати експериментальним шляхом дану залежність є хроматографічні дослідження складу газу.

Для хроматографічного аналізу складу продуктів піролізу була розроблена лабораторна установка, яка реалізована у вигляді апаратно-

програмного комплексу, автоматизованого процесу обробки і візуалізації експериментальних даних в масштабі реального часу[3]. Сутність цього аналізу полягає в фізичному поділі газової суміші на окремі компоненти, заснованому на відмінності їх фізико-хімічних властивостей.

За допомогою фізико-хімічних методів аналізу продуктів згоряння досліджуваного газу можна визначити їх кількісний склад. Для реалізації цієї методики вимірювання використовуємо прилад, який фіксує у відпрацьованих газах наявність NO_x , CH_4 , CO , CO_2 . Схема приладу представлена на рис. 1.

Тиск газу перед колонкою вимірюється манометром, а його витрати - ротаметром. Проба, яка аналізується вводиться в дозатор разом з газом-носієм та переміщається в хроматографічну колонку. Безпосередньо на виході з колонки розміщується детектор, що вимірює кількість компонента, який знаходиться в газі-носії. Зміна складу газової суміші фіксується датчиками, які реагують на відповідні зміни в електричній схемі.

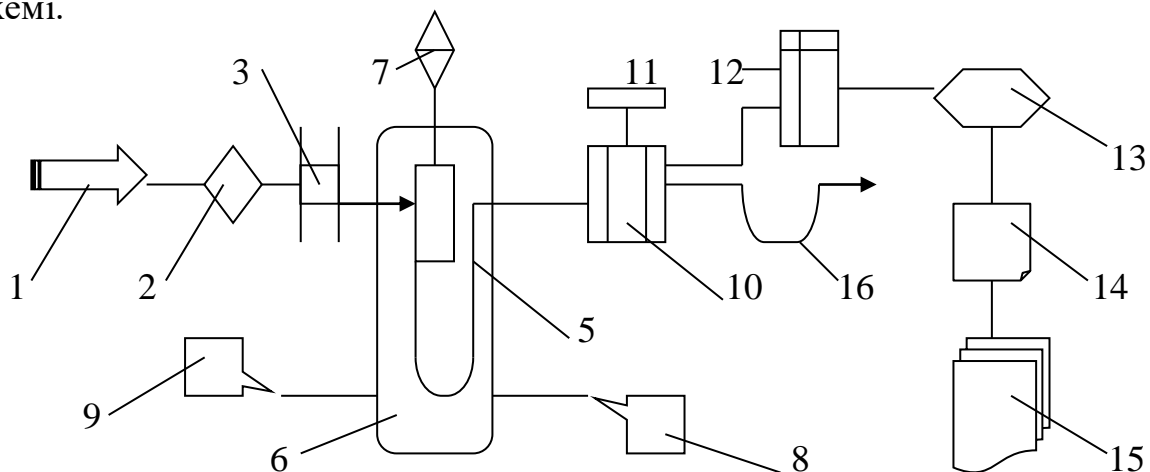


Рис. 1. Схема визначення кількісного складу продуктів згоряння піролізного газу:

1 – газ-носії; 2 – регулятор витрати газу; 3 - витратомір; 4 - дозатор – випарник; 5 - хроматографічна колонка; 6 - термостат; 7 - дозатор; 8 - терморегулятор; 9 - прилад для програмування температури; 10 - детектор; 11 - живлення детектора; 12 - підсилювач; 13 – самозаписуючий прилад; 14 - інтегратор; 15 - принтер; 16 – уловлювач

Таким чином, на самописці записується крива зміни електричного потенціалу за певний термін, пропорційний концентрації або току речовини в газі-носії на виході з колонки. З цієї кривої (хроматограма), представленої на рис. 2 роблять висновки про якісний і кількісний склад аналізованої суміші.

Обробку отриманих даних за змістом NO_x в продуктах згоряння піролізного газу у суміші з повітрям виконували з використанням методу планування експериментів.

Приймаємо, що вологість досліджуваної біомаси X_1 варіюється у межах 1-40%, температура досліджуваного газу X_2 визначається в діапазоні 160-490 °С, час перебування частинок в досліджуваній зоні X_3 – 0,6-10 хвилин, коефіцієнт надлишку повітря X_4 складає від 1 до 3. Умови проведення дослідів представлені в таблиці 1

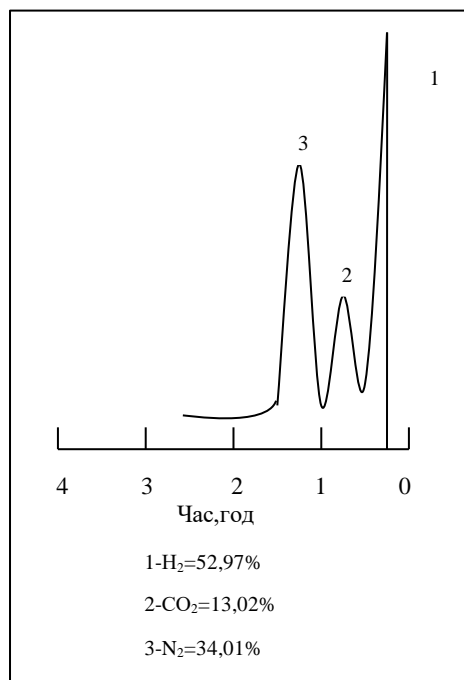


Рис. 2. Хроматограма продуктів згоряння піролізного газу

Умови проведення експерименту

Рівні варіювання	Фактор			
	Вологість частинок X ₁ , %	Температура газу X ₂ , °С,	Час перебування X ₃ , год	Коефіцієнт надлишку повітря X ₄
-1,414	0	25	0	1
-1	1	180	0,001	1,5
0	20,5	335	0,084	2
1	40	490	0,167	2,5
+1,414	59,5	645	0,25	3

В якості залежної змінної Y розглядали зміст NO_x в продуктах згоряння. Для виключення систематичної помилки встановлювали випадковий порядок дослідів в часі. Багатофакторна залежність описується ортогональним планом 2⁴. Математичну обробку експериментів виконували за прийнятою методикою [3-4].

Перевірку відтворюваності дослідів проводили за критерієм Кохрена. Значимість отриманих коефіцієнтів рівняння регресії визначали критерієм Стьюдента. Адекватність отриманої математичної моделі оцінювали за допомогою F-критерію Фішера. Після обробки результатів експериментів отримано рівняння регресії для обчислення параметра оптимізації з точністю до 0,7%.

$$Y=1.387-3.6 \cdot 10^{-2} X_1+4.08 \cdot 10^{-2} X_4+8.54 \cdot 10^{-3} X_3^2-2.187 \cdot 10^{-2} X_1 \cdot X_2-0.0194 X_1 \cdot X_3-2.187 \cdot 10^{-2} X_1 \cdot X_4+0.0118 X_2 \cdot X_4 \quad (1)$$

Вплив досліджуваних факторів показано на діаграмі (рис. 3).

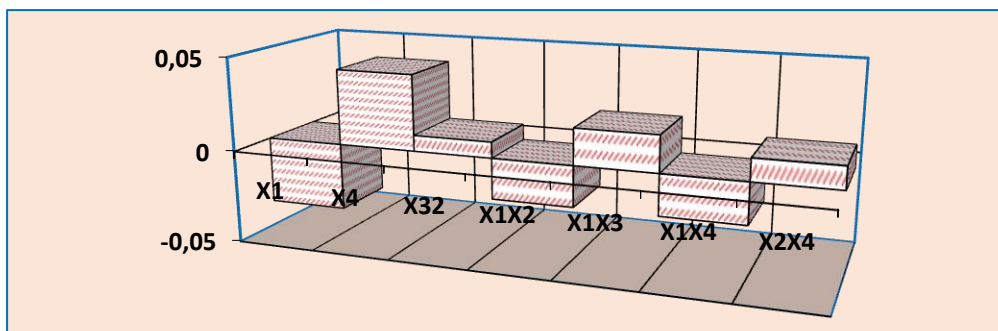


Рис. 3. Діаграма значущості факторів моделі

Очевидно, що при збільшенні кількості вологи зміст NO_x в продуктах згоряння зменшується. Дисоціація водяної пари, що вивільнилася в результаті випаровування, призводить до збільшення концентрації активних центрів реакції. Значні концентрації гідроксильного радикала збільшує швидкість вигорання окису вуглецю. Спалювання піролізного газу призводить до зменшення оксидів азоту в продуктах згоряння, тому що знижується температура полум'я. Крім того, збільшення кількості активних центрів реакції активізує горіння і відповідно знижує концентрацію атомарного кисню. В результаті знижується швидкість окислення азоту.

Стосовно впливу фактору X_4 – коефіцієнта надлишку повітря, відзначим наступне. За ступенем впливу на Y він домінує і проявляється прямопропорційна залежність. Експериментально встановлено, що вихід NO_x збільшується до критичного значення. Це пояснюється тим, що підвищується концентрація вільного кисню. При подальшому підвищенні надлишку повітря на вихід NO_x впливає температура горіння. Було встановлено, що в факелі NO в основному утворюється в зоні максимальних температур, і в порівняно вузькому їх діапазоні, на ділянці малої довжини.

При форсуванні факела концентрація NO зростає пропорційно $q_F^{0.5}$ (де q_F – поверхнева щільність тепловиділення, МВт/м^2).

Очевидно, з експериментально встановленого факту, що в зоні реакції при високих температурах утворюється атомарний кисень, кількість якого в кілька разів перевищує кількість атомарного кисню, що утворюється в результаті дисоціації атмосферного повітря, і представляється наступний механізм утворення окислів азоту: $\text{O} + \text{N}_2 \leftrightarrow \text{O} + \text{N}$; $\text{N} + \text{O}_2 \leftrightarrow \text{NO} + \text{O}$. При цьому атомарний кисень утворюється в значній кількості в проміжних стадіях протікання реакції горіння вуглеводнів та окису вуглецю (рис. 4), зокрема по реакції (2).

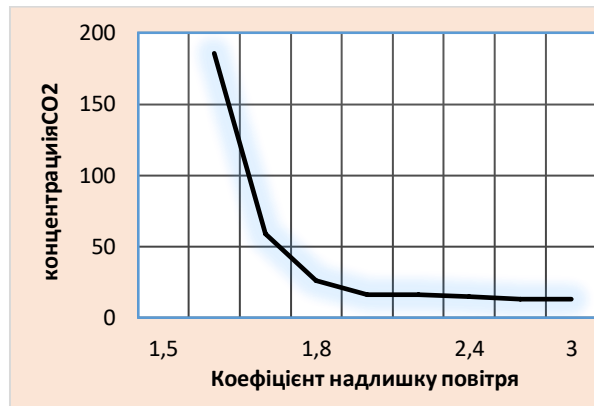
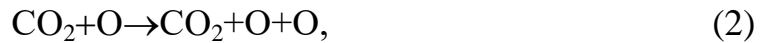


Рис. 4. Залежність концентрації CO₂ від коефіцієнту надлишку повітря

Розпад надмірної кількості молекулярного кисню відбувається в зіткненнях з активованими молекулами вуглекислого газу CO₂, які утворились в процесі горіння, що призводять до розриву зв'язків в молекулі кисню і звільнення його атомів. В утворюванні атомарного кисню значно меншу роль відіграє термічний розпад молекул кисню.

Залежність Y від тривалості термообробки часток X₃ має нелінійний характер, тому практично не значим.

В ефектах взаємодії проявляється вплив домінуючого фактору. Виключенням складає X₁·X₄.

В ефектах взаємодій проявляється вплив домінуючого фактору. Ісключение составляет X₁·X₄. Мабуть збільшення концентрації вологи в досліджуваному газі сприяє утворенню додаткового атомарного кисню в реакції горіння при дисоціації води або зниженні температури. В результаті чого, зменшується вихід окислів азоту. Таким чином, чим більші значення приймає співвідношення X₁·X₄, тим менше Y.

Висновок. Отже, при низькому надлишку повітря ($\alpha_T=1,02\dots1,03$) і менш високих температурах горіння, зменшення утворення атомарного кисню може привести до зменшення виходу окислів азоту.

Література

1. Гелетуха Г.Г., Железна Т.А. Стан та перспективи розвитку біоенергетики в Україні // Промислова теплотехніка. 2017. Т. 39. №2. С. 60-64.
2. Денисенко В. О. Оцінка потенціалу біомаси в Україні // Агросвіт. 2019. № 24. С. 84-89. DOI: [10.32702/2306-6792.2019.24.84](https://doi.org/10.32702/2306-6792.2019.24.84)
3. Золотовская Е.В Особенности процесса термического разложения частиц биомассы / Золотовская Е.В. // Збірник наукових праць Дніпродзержинського державного технічного університету. Дніпродзержинськ. 2010. №2. С. 129-136.
4. Хартман К. Планирование эксперимента в исследовании технологических процессов / К. Хартман. М.: Мир, 1977. 552 с.
5. Адлер Ю.П. Планирование эксперимента при поиске оптимальных условий / Ю.П. Адлер, Е.В Маркова, Ю.В. Грановский. М.: Наука, 1976. 279 с.