



Матеріали XXV Міжнародної науково-практичної конференції  
«Екологія. Людина. Суспільство»  
пам'яті д-ра Дмитра СТЕФАНІШИНА  
(12 червня 2025 р., м. Київ, Україна)

Proceedings of the XXV International Science Conference  
«Ecology. Human. Society»  
dedicated to the memory of Dr. Dmytro STEFANYSHYN  
(June 12 2025, Kyiv, Ukraine)

ISSN (Online) 2710-3315

<https://doi.org/10.20535/ENS2710-3315.2025.330617>

## ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНІ ДОСЛІДЖЕННЯ ПРОЦЕСУ ГАЗИФІКАЦІЇ ТВЕРДИХ КОМБІНОВАНИХ ПАЛИВ

Олександр СНИГУР<sup>1</sup>, Тетяна ОВЕРЧЕНКО<sup>2</sup>, Олена ІВАНЕНКО<sup>2</sup>

<sup>1</sup> Інституту Газу НАН України

вул. Дегтярівська, 39, м. Київ, 03113, Україна

<sup>2</sup> Київський політехнічний інститут ім. Ігоря Сікорського

Берестейський п-т, 37, м. Київ, 03056, Україна

e-mail: overchenko.tanya@gmail.com

### Анотація:

Дослідження засвідчило, що використання методу комплексного (ТГА+ газового) лабораторного аналізу дає змогу оцінити теплотворну здатність нетрадиційних, у тому числі комбінованих палив. Виявлено, що теплота згоряння продуктів газифікації комбінованих палив залежить від їх складу та параметрів технологічного процесу в межах 6–12 МДж/м<sup>3</sup>. Це пояснюється тим, що запропонований метод та встановлення має низку особливостей, у тому числі можливість підтримки теплотворної здатності нетрадиційних, зокрема комбінованих палив, на заданому рівні. Досягнення ефекту очікується за рахунок вибору концентрацій компонентів, відповідних заданому значенню  $Q_p$ .

**Ключові слова:** комбіноване 2-компонентне тверде паливо, тверді побутові відходи, системи газифікації, теплотворна здатність синтез-газу.

За останній час інтерес до енергоефективного використання твердих побутових відходів набирає обертів [1-4], загалом це пов'язано зі зниженням доступності викопного палива, збільшення споживання енергії та негативний вплив на навколишнє середовище. Тверді побутові відходи можна віднести до низькосортного палива для процесів термохімічної конверсії в порівнянні з вугіллям. Відповідно сумісна газифікація стала привабливим варіантом не тільки для покращення результатів газифікації але і для збільшення доступності палива. Дослідження теплової поведінки ТПВ в поєднанні з вугіллям проводилися вченими різних країн світу [5-6], але все ще не достатні для створення технології стандартизованих комбінованих палив на основі ТПВ та вугілля для існуючих систем газифікації.

Наразі тривають дослідження в напрямку сумісної газифікації на базі існуючих газогенераторних установках. Такий підхід розглядається, як перспективний для вдосконалення процесів газифікації, зокрема для оптимізації характеристик синтез-газу. Водночас наявні результати досліджень все ще не достатні для створення технології виробництва стандартизованих комбінованих палив типу вугілля-ТПВ для існуючих систем газифікації [7-8].

Актуальність даного дослідження обумовлена необхідністю глибокого вивчення впливу технологічних параметрів процесу газифікації комбінованих палив на теплотворну здатність одержаного синтез-газу.

Метою роботи є експериментальне визначення чисельних показників складу та теплотворної здатності продуктів газифікації комбінованих палив залежно від співвідношення вхідних компонентів, а також підтвердження гіпотези щодо механізму газифікації.

Об'єктом дослідження є комбіноване 2- компонентне тверде паливо «вугілля ТПВ» (ТПВ – тверді побутові відходи) у 5 навісках з концентраціями 0- 100 (мас %) кожного компоненту. Одним з проблемних місць є удосконалення процесів газифікації ТПВ, зокрема оптимізація характеристик синтез-газу.

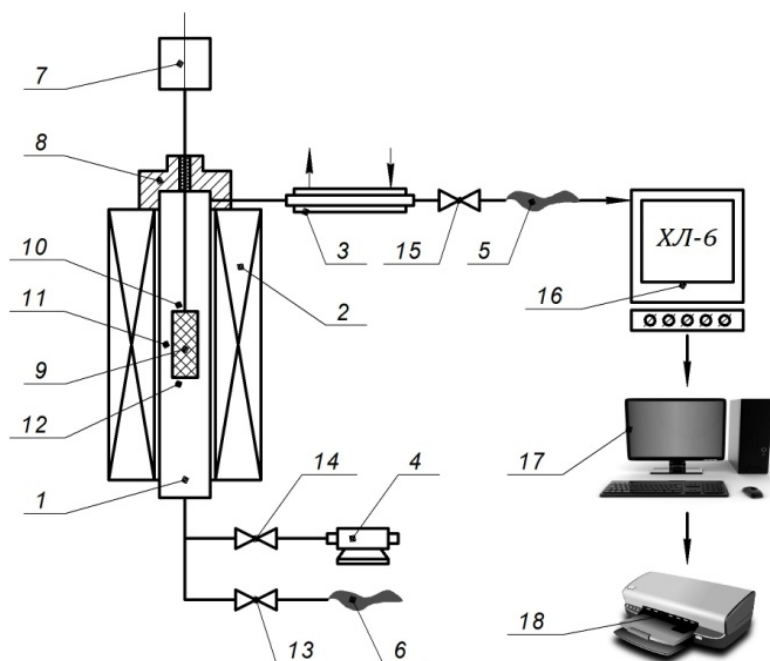
**Таблиця 1.** Склад комбінованого палива на основі збагаченого вугілля шахти «Білоріченська» (селище міського типу Білоріченський, Луганська обл., Україна)

| № навіски | Компоненти, г |          | Робоча маса, мас. % |          |          |          |          |          |          | $Q_{нр}$ ,<br>МДж/кг |
|-----------|---------------|----------|---------------------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|----------------------|
|           | Маса вугілля  | Маса ТПВ | <i>C</i>            | <i>H</i> | <i>N</i> | <i>S</i> | <i>O</i> | <i>A</i> | <i>W</i> |                      |
| 1         | 16            | 0        | 66,0                | 4,4      | 1,4      | 3,8      | 5,0      | 14,7     | 4,7      | 26,7                 |
| 2         | 12            | 4        | 61,5                | 5,0      | 1,2      | 3,6      | 10,1     | 13,9     | 4,8      | 25,3                 |
| 3         | 8             | 8        | 57,0                | 5,5      | 0,9      | 3,4      | 15,2     | 13,1     | 4,9      | 23,9                 |
| 4         | 4             | 12       | 52,5                | 6,1      | 0,6      | 3,2      | 20,3     | 12,3     | 4,9      | 22,5                 |
| 5         | 0             | 16       | 48,0                | 6,7      | 0,3      | 3,0      | 25,4     | 11,5     | 5,0      | 21,1                 |

В ході дослідження використовувалися лабораторна термогравітаційна установка, яка являє собою фізичну модель реактору проточного типу з рециркуляцією проміжних продуктів реакції. До складу цієї установки входять блок установки ТГА (термогравіметричного аналізу), хроматограф, комп'ютер з принтером, система автоматичної обробки даних за допомогою комп'ютерних методів, а саме: термогравіметричного та хроматографічного аналізу.

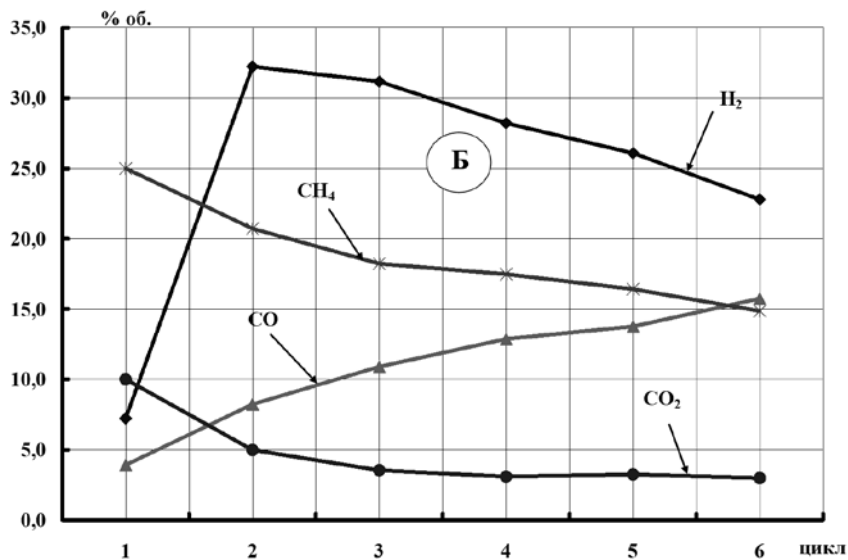
#### **Схема установки, вузлів та елементів**

Основний блок установки (реактор-піч) виконаний як реактор проточного типу з зовнішнім обігріванням та/або компенсацією втрат теплоти. На вхід реактору знизу підведена лінія подачі повітря від компресору 4 або від ємності 6. Вихід реактора з верхньої частини з'єднаний з холодильником 3 і далі – з еластичною ємністю 5. В реакторі встановлені термопари у вказаних точках виміру – для вимірювання температур над кошиком (10), у зоні нагрівання (11) та під кошиком (12). Кошик підвішений на датчику 7, сигнал від якого заведений у систему АЦП. Склад газу аналізувався на стаціонарному хроматографі ХЛ-6.



**Рис. 1.** Схема модифікованої лабораторної установки. 1 – реактор; 2 – піч; 3 – холодильник; 4 – компресор; 5, 6 – еластична ємність; 7 – датчик маси; 8 – кришка; 9 – кошик з навіскою; 10-12 – точки виміру температури; 13-15 – вентиль; 16 – хроматограф, 17 – комп'ютер, 18 – принтер

Наведені графіки показують яким чином відбуваються зміни складу газової фази згідно з ступенями її рециркуляції в реакторі проточного типу.



**Рис. 2.** Склад газової суміші у досліді №1

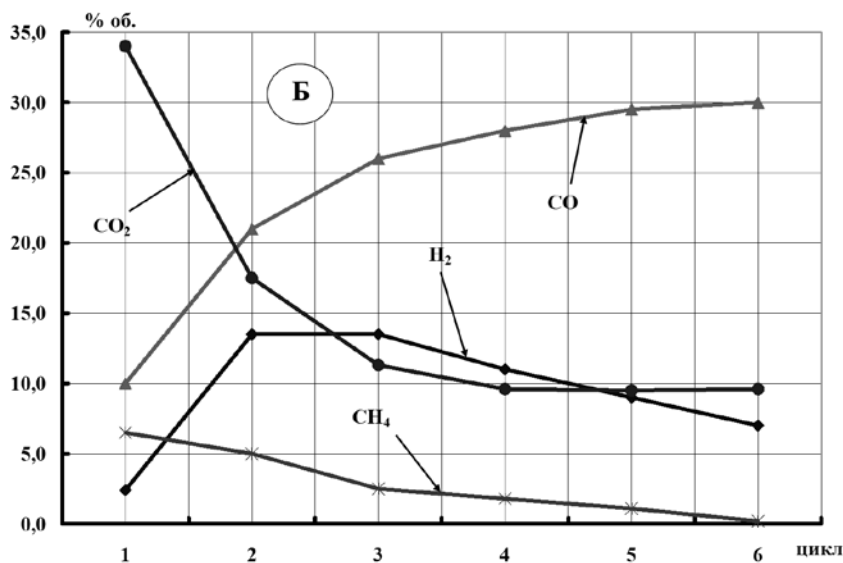


Рис. 3. Склад газової суміші у досліді №5

Відомо, що леткі речовини не містяться в паливі як індивідуальні речовини, а мають властивість утворюватися при нагріванні палива (саме тому кажуть не про «вміст» летких, а про їх «вихід»). До складу летких входять CO<sub>2</sub>, H<sub>2</sub>O (пара), CO, H<sub>2</sub>, CH<sub>4</sub> та інші більш складні газоподібні вуглеводні.

Характер кривих маси та температур як функцій часу є однаковим для всіх навісок різного складу, подібно до графіку, наведеному як приклад на рис. 4. Різниця полягає у чисельних показниках.

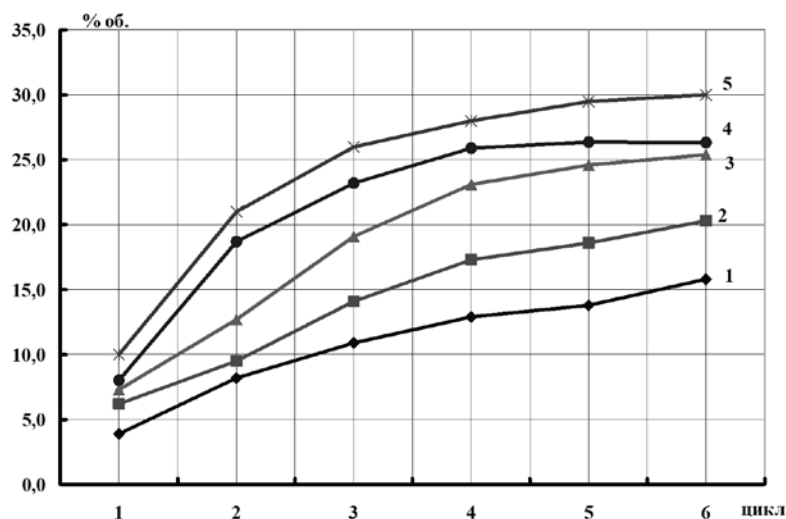


Рис.4. Залежність концентрації CO від складу комбінованого палива

Зміна маси в залежності від складу навіски відбувається у діапазоні температур від (200-300)°C до ~ 800 °C; саме у ньому відбувається вихід летких речовин. Результати показані в таблиці 2.

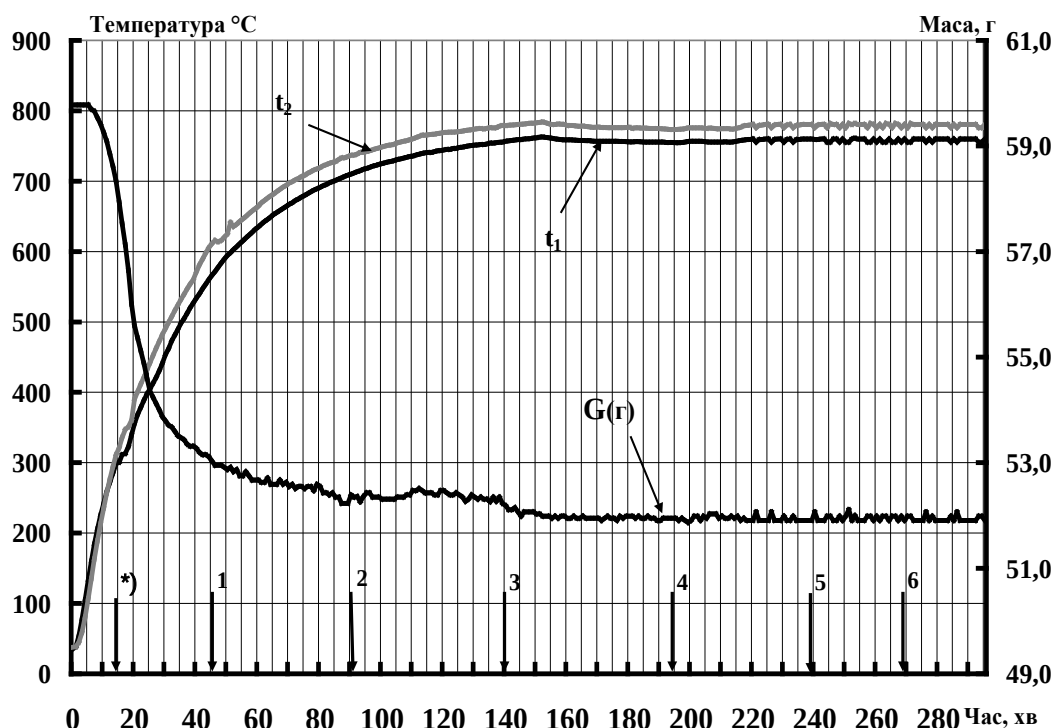
**Таблиця 2.** Втрата маси навіски у дослідях

| № досліду      | 1   | 2   | 3    | 4    | 5    |
|----------------|-----|-----|------|------|------|
| $\Delta M$ , г | 5,7 | 8,9 | 10,4 | 11,3 | 12,0 |

Характер зміни  $\Delta M$  відповідає даним по виходу летких речовин:

- вугілля шахти «Белореченская» – 30,8 (на суху масу);
- ТПВ – від 80–90 (папір, текстиль, пластмаси) до 50–65 (шкіра, гума, харчові відходи, та ін.).

Характер кривих маси та температур як функцій часу є однаковим для всіх навісок різного складу (рис. 5). Розгляд термограми показує, що процес газифікації практично повністю закінчується у 2-му циклі, що підтверджується максимальною втратою маси  $G$  (г).



**Рис.5.** Динаміка зміни маси навіски та температурних показників у реакторі впродовж одиничного досліду (навіска: вугілля – 8 г, ТПВ – 8 г)

Зольність, визначена шляхом спалювання коксо-зольного залишку та вимірювання початкової та остаточної маси, складала у різних дослідях 14,5 – 18,0%, відповідний вміст коксу: 85,5 – 82%. Якщо припустити, що кокс складається з 100%-ного вуглецю, відповідна теплотворна здатність твердого залишку  $Q_{HP} = (29,0 - 27,8)$  МДж/кг у порівнянні з первинним паливом: (26,7 – 21,1) МДж/кг (табл.1). Якщо враховувати навіть незначний вміст водню у вигляді важких вуглеводнів (у даному дослідженні не аналізувався), реальна величина  $Q_{HP}$  є значно більшою. Цей факт необхідно враховувати при розробці технології автотермічного процесу.

Процес утворення генераторного газу також має однаковий характер для всіх варіантів комбінованого палива, відрізняючись чисельними значеннями концентрацій окремих компонентів. В усіх дослідях спостерігалось різке зростання концентрації  $H_2$  у другому циклі

(що відповідає досягненню температури (750 - 800)°C), яка досягає максимуму, після чого повільно знижується. Концентрація CO плавно збільшується та у дослідах з навіскою 75% та 100% ТПВ перевищує криву H<sub>2</sub>. Концентрація CO<sub>2</sub> у всіх дослідах максимальна у першому циклі, далі знижується, що пояснюється початковим окисленням горючих компонентів та подальшими витратами на конверсію вуглеводнів та окислення твердого вуглецю. Відповідно зменшується також концентрація CH<sub>4</sub>, досягаючи мінімуму в кінці експерименту.

У ході дослідження встановлено, що за допомогою комплексного (ТГА + газового) лабораторного аналізу можливо оцінювати теплотворну здатність нетрадиційних, зокрема комбінованих, палив.

Запропонована у роботі методика забезпечує можливість експрес-оцінки різних партій ТПВ та визначати оптимальне співвідношення компонентів у системі «вугілля-ТПВ».

### **Література**

1. Klinghoffer, N. B., Castaldi, M. J. (2013). *Waste to Energy Conversion Technology*. Elsevier, 256. doi: <http://doi.org/10.1533/9780857096364>
2. Young, G. C. (2010). *Municipal solid waste to energy conversion processes: economic, technical, and renewable comparisons*. John Wiley & Sons, 396. doi: <http://doi.org/10.1002/9780470608616>
3. Rogoff, M. J., Screve, F. (2011). *Waste-to-Energy: Technologies and Project Implementation*. Elsevier, 184.
4. Bilitewski, B., Härdtle, G., Marek, K. (2013). *Waste Management*. Springer Science & Business Median, 699.
5. Shmarin, S. L., Luchko, I. A. (2011). Pomesiachnoe izmenenie morfologicheskogo sostava, kaloriinosti, vlazhnosti i zolnosti tverdykh bytovykh otkhodov. *Visnik Nacionalnogo tekhnichnogo universitetu Ukraini "Kiivskii politekhnichnii institut". Seriia: Girnictvo*, 21, 136–143.
6. Pliaskina, N. I. (2012). Ocenka energeticheskogo potentsiala utilizacii tverdykh bytovykh otkhodov (na primere Novosibirskoi oblasti). *Gorenie tverdogo topliva*. Available at: <http://www.itp.nsc.ru/conferences/gtt8/files/79Plyaskina.pdf>
7. Farzad, S., Mandegari, M. A., Görgens, J. F. (2016). A critical review on biomass gasification, co-gasification, and their environmental assessments. *Biofuel Research Journal*, 3 (4), 483–495. doi: <http://doi.org/10.18331/brj2016.3.4.3>
8. Tanigaki, N., Ishida, Y., Osada, M. (2012). A case-study of landfill minimization and material recovery via waste co-gasification in a new waste management scheme. *Elsevier Waste Management*, 32 (4), 667–675.

EXPERIMENTAL STUDIES OF THE PROCESS  
OF GASIFICATION OF SOLID COMBINED FUELS

**Oleksandr SNIGUR**

*Of the Gas Institute of the National Academy of Sciences of Ukraine*

st. Degtyarivska, 39, Kyiv, 03113, Ukraine

<https://orcid.org/0000-0001-7100-850X>

**Tetyana OVERCHENKO**

*Ihor Sikorskyi Kyiv Polytechnic Institute*

Peremohy Ave. 37, Kyiv, 03056, Ukraine

<https://orcid.org/0000-0002-5883-6228>

**Olena IVANENKO**

*Ihor Sikorskyi Kyiv Polytechnic Institute*

Peremohy Ave. 37, Kyiv, 03056, Ukraine

<https://orcid.org/0000-0001-6838-5400>

**Abstract:** The study showed that the use of the method of complex (THA + gas) laboratory analysis makes it possible to assess the calorific value of unconventional fuels, including combined fuels. It was found that the heat of combustion of gasification products of combined fuels depends on their composition and technological process parameters within the range of 6–12 MJ/m<sup>3</sup>. This is explained by the fact that the proposed method and installation has a number of features, including the ability to maintain the calorific value of unconventional, in particular combined fuels, at a given level. The effect is expected to be achieved by selecting the concentrations of components corresponding to the given value of  $Q_r$ .

**Keywords:** combined 2-component solid fuel, solid household waste, gasification systems, calorific value of synthesis gas.