

УДК 504.064:628.4.045

DOI: 10.15587/2312-8372.2019.188419

**ДОСЛІДЖЕННЯ ПРОЦЕСУ ГАЗИФІКАЦІЇ ТВЕРДИХ
КОМБІНОВАНИХ ПАЛИВ**

Снігур О. В., Марчук Ю. В., Праженнік Ю. Г., Бондаренко Б. І.

**ИССЛЕДОВАНИЕ ПРОЦЕССА ГАЗИФИКАЦИИ ТВЕРДЫХ
КОМБИНИРОВАННЫХ ТОПЛИВ**

Снигур А. В., Марчук Ю. В., Празхенник Ю. Г., Бондаренко Б. И.

**RESEARCH OF THE PROCESS OF SOLID COMBINED FUELS
GASIFICATION**

Snigur O., Marchuk Yu., Prazhennik Yu., Bondarenko B.

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 найбільш проблемних місць є удосконалення процесів газифікації ТПВ, зокрема оптимізація характеристик синтез-газу.

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.

У ході дослідження показано, що методом комплексного (ТГА + газового) лабораторного аналізу можна оцінювати теплотворну здатність нетрадиційних, зокрема комбінованих, палив. Отримано визначення залежності теплотворної здатності продуктів газифікації комбінованих палив від їх складу та параметрів технологічного процесу в межах 6–12 МДж/м³. Це пов'язано з тим, що запропоновані у роботі метод та установка має ряд особливостей, зокрема можливість підтримки теплотворної здатності нетрадиційних, зокрема комбінованих палив, на заданому рівні. Досягнення ефекту очікується за рахунок вибору концентрацій компонентів, які відповідають заданому значенню Q_n^P . Завдяки цьому забезпечується можливість отримання незмінних значень Q_n^P при надходженні різних партій ТПВ на виробництво синтез-газу без корекції технологічних параметрів.

Наведена у роботі методика дозволяє проводити експрес-оцінку різних партій ТПВ та визначати оптимальне співвідношення «вугілля-ТПВ». У порівнянні з аналогічними відомими методами, це забезпечує такі переваги: стабільність технологічних параметрів, інтенсифікацію виробництва та здешевлення синтез-газу.

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

Объектом исследования является комбинированное 2-компонентное твердое топливо «уголь-ТБО» (ТБО – твердые бытовые отходы) в 5 навесках с концентрациями 0–100 (мас. %) каждого компонента. Одним из самых проблемных мест является совершенствование процессов газификации ТБО, в том числе оптимизация характеристик синтез-газа.

В ходе исследования использовалась лабораторная термогравитационная установка, представляющая собой физическую модель реактора проточного типа с рециркуляцией промежуточных продуктов реакции. В состав данной установки входят блок установки ТГА (термогравиметрического анализа), хроматограф, компьютер с принтером, система автоматической обработки данных с помощью компьютерных методов, а именно: термогравиметрического и хроматографического анализа.

В ходе исследования показано, что методом комплексного (ТГА + газового) лабораторного анализа можно оценивать теплотворную способность нетрадиционных, в том числе комбинированных, топлив. Получено определение зависимости теплотворной способности продуктов газификации комбинированных топлив от их состава и параметров технологического процесса в пределах 6–12 МДж/м³. Это связано с тем, что предложенный метод и установка имеет ряд особенностей, в том числе возможность поддержки теплотворной способности нетрадиционных, в частности комбинированных топлив, на заданном уровне. Достижение эффекта ожидается за счет выбора концентраций компонентов, соответствующих заданному значению Q_H^P . Благодаря этому обеспечивается возможность получения постоянных значений Q_H^P при поступлении различных партий ТБО на производство синтез-газа без коррекции технологических параметров.

Приведенная в работе методика позволяет проводить экспресс-оценку различных партий ТБО и определять оптимальное соотношение «уголь-ТБО». По сравнению с аналогичными известными методами, это обеспечивает следующие преимущества: стабильность технологических параметров, интенсификацию производства и удешевление синтез-газа.

Ключевые слова: комбинированное 2-компонентное твердое топливо, твердые бытовые отходы, системы газификации, теплотворная способность синтез-газа.

1. Вступ

За останні два десятиріччя інтерес до енергоефективного використання твердих побутових відходів суттєво підвищився [1–3]. Головним чином через зниження доступності викопного палива, збільшення споживання енергії та негативний вплив на навколишнє середовище [4]. Проведені дослідження для визначення морфологічного та елементного складу твердих побутових відходів

(ТПВ) [5–7]. Доведено, що ТПВ (або окремі компоненти) можна вживати як паливо в процесах термохімічної конверсії.

Проводяться дослідження в напрямку сумісної газифікації на існуючих газогенераторних установках [8–10], тобто сумісна газифікація стала привабливим варіантом для удосконалення процесів газифікації, зокрема для оптимізації характеристик синтез-газу. Але результати досліджень все ще не достатні для створення технології виробництва стандартизованих комбінованих палив типу вугілля-ТПВ для існуючих систем газифікації.

Актуальність цього дослідження полягає у детальному вивченні впливу параметрів технологічного процесу газифікації комбінованих палив на теплотворну здатність одержаного синтез-газу.

Таким чином, *об'єктом дослідження* є комбіноване 2-компонентне тверде паливо «вугілля-ТПВ» у 5 навісках з концентраціями 0–100 (мас. %) кожного компоненту:

1. Збагачене вугілля шахти «Білоріченська» (селище міського типу Білоріченський, Луганська обл., Україна), $W^a=4,7$, суха маса: $C^d=69,28$; $H^d=4,63$; $N^d=1,52$; $S_t^d=3,96$; $O_d^d=5,21$; $A^d=15,4$ $Q_n^p=26,67$ МДж/кг.

2. Модельне ТПВ (подрібнені деревні пелети). Аналітична маса: $C^a=48,04$; $H^a=7,03$; $S^a=3,0$; $O^a=25,41$; $A^a=11,52$; $W^a=5,00$ $Q_n^p=21,08$ МДж/кг.

Маса навіски: $M_{\Sigma}=16$ г (постійна протягом всього дослідження).

В табл. 1 надані склади зразків та значення Q_n^p в експериментах №№ 1–5.

Таблиця 1

Склад комбінованого палива

| Навіска* | Маса, г | | Робоча маса, мас. % | | | | | | | Q_n^p , МДж/кг |
|----------|---------|-----|---------------------|-----|-----|-----|------|------|-----|---------------------|
| | Вугілля | ТПВ | С | Н | N | S | O | A | W | |
| 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 |

Примітка: * – відповідає номеру окремого експерименту; ТПВ – тверді побутові відходи

Мета дослідження – експериментальне визначення залежності теплотворної здатності продуктів газифікації комбінованих палив від їх складу та параметрів технологічного процесу.

2. Методика проведення дослідження

Установка для проведення експерименту розроблена, створена та випробувана в Інституті газу Національної академії наук України (м. Київ, Україна).

Лабораторна термогравітаційна установка являє собою фізичну модель реактору проточного типу з рециркуляцією проміжних продуктів реакції (рис. 1).

Основний блок установки термогравіметричного (ТГА) аналізу 1–2 виконаний як реактор проточного типу з зовнішнім обігріванням та/або компенсацією втрат теплоти, з датчиком маси 7 та термопарами, встановленими в точках 10–12. Рециркуляція забезпечується еластичними ємностями 5, 6. Установка обладнана хроматографом 16, комп'ютером 17 з принтером 18.

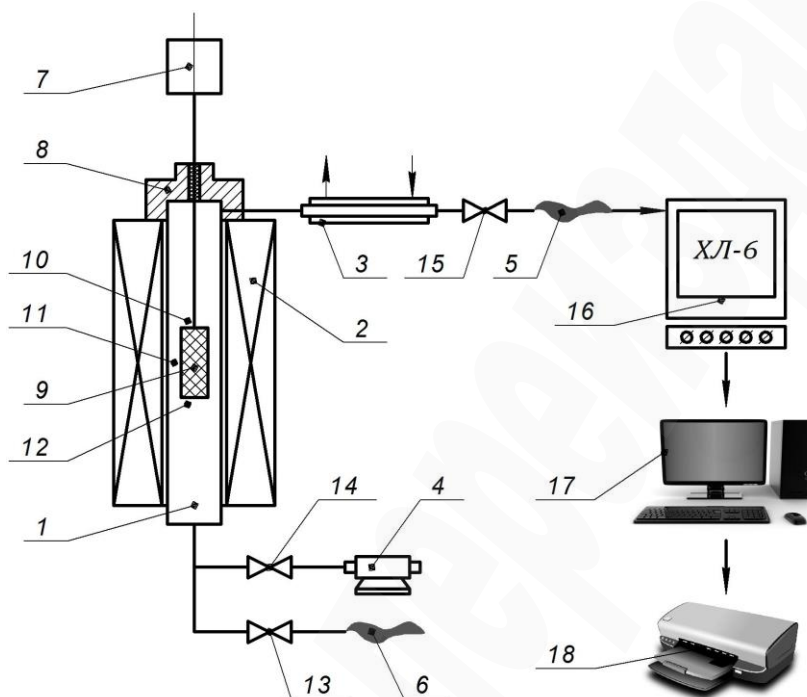


Рис. 1. Схема лабораторної установки: 1 – реактор; 2 – піч; 3 – холодитильник;

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

Навіска розміщена в циліндричному кошику, поверхня якого виконана з жаростійкої сітки і утворює кільцевий проміжок з внутрішньою стінкою реактору. При русі повітря в реакторі більша частина його проходить через кільцевий проміжок, внаслідок чого більша частина повітря не встигає окислювати паливо, а потрапляє безпосередньо до холодитильнику. У першому циклі при відкритому вентилі 14 та закритому 13 повітря подається до реактору, а газовий потік з реактору через холодитильник та вентиль 15 поступає до еластичної ємності 5. Сумарна кількість повітря, поданого у першому циклі, відповідає теоретичному значенню коефіцієнту витрати повітря α , розрахованому за умови повної газифікації навіски до $\text{CO} + \text{H}_2$. Подачу повітря у першому циклі починають з моменту досягнення температури навіски 200–300 °С, коли починається вихід летких, в першу чергу – постійних газів, далі – вищих вуглеводнів. Після набору повітря компресор відключають, закривають

вентиль 15, а ємності 5 та 6 міняють місцями. На вході реактору закривають вентиль 14, відкривають 13 і з вхідної ємності подають через реактор та холодильник у вихідну ємність. Потік газу регулюють підбором зовнішнього тиску на вхідну ємність. Кожний дослід з однією навіскою (від № 1 до № 5) складається з шести циклів. Після закінчення кожного циклу продукти газифікації аналізують на хроматографі. Результати аналізу обробляються автоматично.

Система автоматичної обробки даних за допомогою комп'ютерних методів, яка входить до складу установки, забезпечує розширення функціональних можливостей проведення експерименту та полегшує подальшу систематизацію результатів.

Вузол передачі зусилля виготовлений та відцентрований з високою точністю, завдяки чому навантаження на датчик спрямовано суворо по вертикалі. Сигнали від термопар та тензодатчика надходять на входи аналогово-цифрового перетворювача, який зв'язаний з комп'ютером конвертером інтерфейсу, що формує пакети даних та передає їх. Для захисту датчика від теплового випромінювання та шкідливого впливу гарячих газів між ним і реактором встановлені горизонтальні термоекрани з термостійкого теплоізоляційного матеріалу. Система реактор-датчик розміщена під витяжною системою.

Дані, отримані в ході лабораторного експерименту, представлені в аналоговому вигляді. Необхідний аналогово-цифровий інтерфейс забезпечує система збору даних. Вона перетворює вихідні дані від одного чи декількох вимірювальних перетворювачів у вихідний сигнал, придатний для цифрової обробки.

Система збору даних створена на базі комп'ютера, 8-ми каналного модуля М-7019 та конвертера інтерфейсу І-7561. Модуль ІСРСОН М7019 (Тайвань) є основною складовою оскільки виконує роль перетворювача аналогових сигналів, має роздільну здатність 16-bit, частоту дискретизації 8 Гц, та похибку вимірювання $\pm 1\%$. Модуль ІСРСОН І-7561 (Тайвань) виступає в ролі шлюза між М-7019 та комп'ютером. Для керування лабораторним дослідом розроблене спеціалізоване програмне забезпечення на базі комплексу LabView.

Після закінчення дослідження пробу коксо-золяного залишку з кошика спалюють у потоці повітря до постійної маси, яка є вмістом золи у пробі. Сигнал датчику, а також сигнали від термопар синхронно подаються до комп'ютеру після обробки у системі модулів сполучення датчиків.

3. Результати дослідження та обговорення.

Типова масо-термограма одиначного досліду надана на рис. 2.

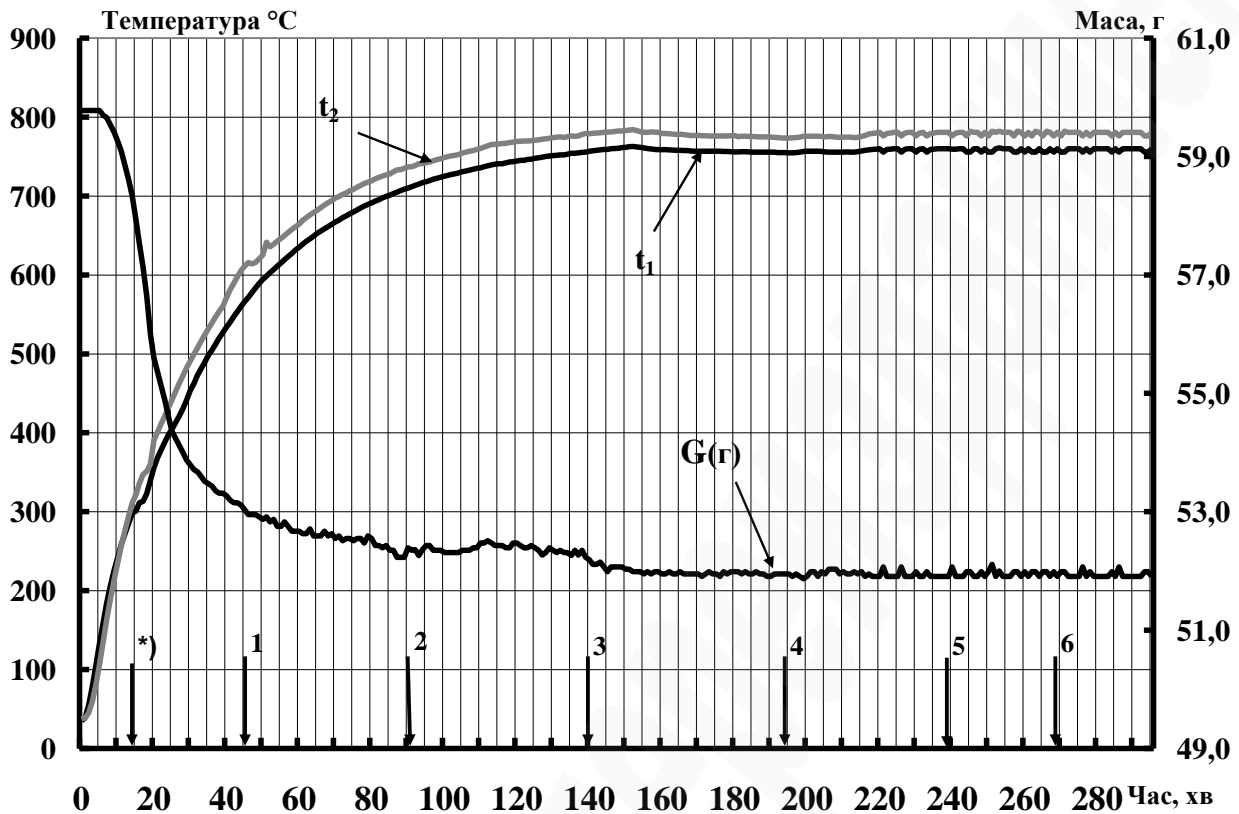


Рис. 2. Характер зміни маси навіски та температур в реакторі протягом одиначного досліду. Навіска: вугілля – 8 г, ТПВ – 8 г.

Позначки 1–6 – номери циклів

Наступні графіки (рис. 3) відображують характер зміни складу газової фази згідно з ступенями її рециркуляції в реакторі.

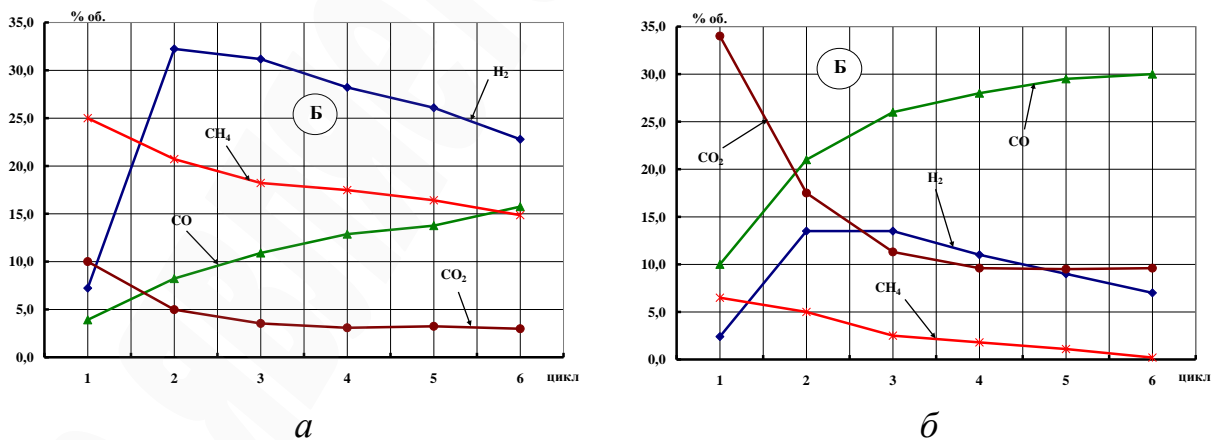


Рис. 3. Приклади зміни складу газової суміші в окремих дослідях: а – дослід № 1 (вугілля); б – дослід № 5 (ТПВ)

Наступний графік (рис. 4) показує зміну теплотворної здатності генераторного газу протягом експерименту, а також залежність останньої від вихідного палива.

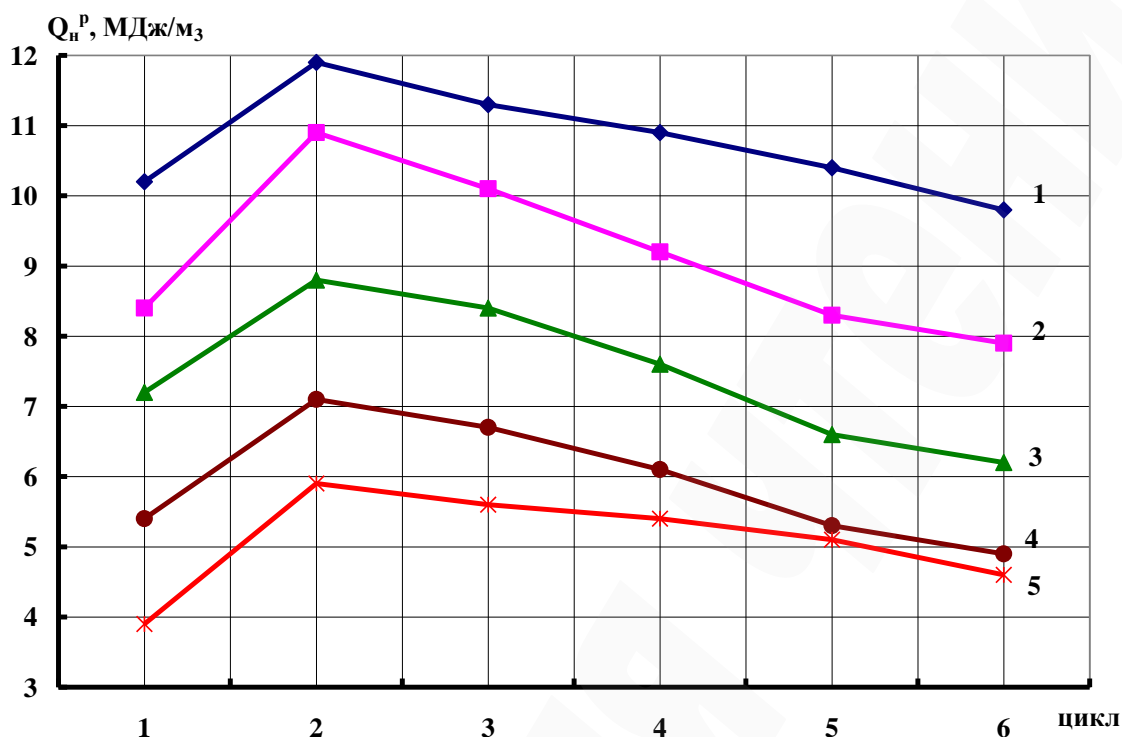


Рис. 4. Залежність Q_n^p від складу комбінованого палива (1–5 – табл. 1)

Як відомо, леткі речовини не містяться в паливі як індивідуальні речовини, а утворюються при нагріванні палива (саме тому йдеться не про «вміст» летких, а про їх «вихід»). До складу летких входять, крім легких газів, також інші більш складні газоподібні вуглеводні. Зміна маси в залежності від складу навіски відбувається у діапазоні температур від (200–300) °С до ~800 °С; саме у ньому відбувається вихід летких речовин. Результати показані у табл. 2.

Таблиця 2

Втрата маси навіски у дослідях №№ 1–5

| № досліду | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 |
|----------------|-----|-----|------|------|------|
| ΔM , г | 5,7 | 8,9 | 10,4 | 11,3 | 12,0 |

Характер зміни ΔM (табл. 2) 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. 2). Розгляд термограми показує, що процес газифікації практично повністю закінчується у 2-му циклі, що підтверджується максимальною втратою маси G (г).

Графіки рис. 3 характеризують послідовність утворення генераторного газу, що дозволяє простежити перші дві стадії процесу газифікації у реакторах з інтенсивним міжфазним масообміном: повне окислення горючих компонентів до CO_2 (та відповідно H_2O). А також подальше окислення ними CH_4 і остаточного вуглецю до CO та H_2 – як, наприклад, у реакторах з супутнім потоком реагентів. Сума $(\text{CO}+\text{H}_2)=40\%$ у досліді 1 не змінюється від 2-го до 6-го циклу, а у досліді 5 незначно підвищується: від 34 % до 37 % . При цьому зниження концентрації H_2 з одночасним підвищенням концентрації CO пояснюється зсувом за реакцією водяного газу внаслідок нагріванням реагентів при постійній температурі близько 800 °С.

Q_n^p досягає максимуму для кожної комбінації «вугілля-ТПВ» (рис. 4). У подальших циклах рециркуляції спостерігається рівномірне зниження цієї величини, можливе при втраті важких летких (смола та ін.) внаслідок їх конденсації в холодильнику і далі по тракту перед реактором. Подібність кривих для всіх складів «вугілля-ТПВ» відповідає адитивності величин Q_n^p . Внаслідок цього, при розробці автотермічного процесу термохімічної утилізації ТПВ виникає можливість, регулюючи співвідношення «вугілля-ТПВ», досягати постійного значення Q_n^p при надходженні різних партій відходів різного складу.

4. Висновки

У ході дослідження показано, що методом комплексного (ТГА + газового) лабораторного аналізу можна оцінювати теплотворну здатність нетрадиційних, зокрема комбінованих, палив.

Наведена у роботі методика дозволяє проводити експрес-оцінку різних партій ТПВ та визначати оптимальне співвідношення «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"*. Seriya: Girnictvo, 21, 136–143.
6. Pliaskina, N. I. (2012). Ocenka energeticheskogo potenciala utilizacii tverdykh bytovykh otkhodov (na primere Novosibirskoi oblasti). *Gorenie tverdogo topliva*. Available at: <http://www.itp.nsc.ru/conferences/gtt8/files/79Plyaskina.pdf>

7. Mikhailenko, V. P., Alekseevec, I. L., Denafas, G., Shmarin, S. L., Luchko, I. A. *Osobennosti sostava tverdykh bytovykh otkhodov v Ukraine*. Available at: <http://www.myshared.ru/slide/188864/>

8. 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>

9. 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.

10. Higman, C., van der Burgt, M. (2008). *Gasification*. Gulf Professional Publishing, 456. doi: <http://doi.org/10.1016/b978-0-7506-8528-3.x0001-6>

The object of research is the combined 2-component solid fuel «coal-municipal solid waste» (MSW) in 5 parts with concentrations of 0–100 (wt. %) of each component. One of the most problematic places is the improvement of solid waste gasification processes, including the optimization of synthesis gas characteristics.

In the course of the study, laboratory thermogravimetry equipment is used, which is a physical model of a flow-type reactor with recirculation of intermediate reaction products. This installation includes a TGA (thermogravimetric analysis) installation unit, a chromatograph, a computer with a printer, and an automatic data-tracing system using computer methods, namely, thermogravimetric and chromatographic analysis.

The study shows that the method of complex (TGA + gas) laboratory analysis can evaluate the calorific value of non-traditional, including combined, fuels. The determination of the dependence of the calorific value of gasification products of combined fuels on their composition and process parameters is in the range of 6–12 MJ/m³. This is due to the fact that the method and installation proposed in the work has a number of features, the ability to support the calorific value of non-traditional, including combined fuels at a given level. Achievement of the effect is expected due to the choice of concentrations of components corresponding to a given value of Q_H^P . Thanks to this, it is possible to obtain constant values of Q_H^P upon receipt of various lots of solid waste for the production of synthesis gas without correction of technological parameters.

The technique presented in the work allows for an express assessment of various batches of solid waste and determine the optimal ratio of coal-solid waste. Compared with similar well-known methods, this provides the following advantages: stability of technological parameters, intensification of production and cheaper synthesis gas.

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