

I. К. Малік¹, В. В. Коваль², Д. В. Мірошніченко^{1,2},

А. Б. Контрерас, Н. Хассан

¹ Національний технічний університет “Харківський політехнічний інститут”,
кафедра технології переробки нафти, газу та твердого палива,

² Державне підприємство “Український державний
науково-дослідний вуглехімічний інститут (УХІН)”, вугільний відділ

³ Carbosur, Oaxaca, Mexico

⁴ Nader Group Engineering, Port Said, Egypt
dvmir79@gmail.com

ВИЗНАЧЕННЯ ТЕПЛОТИ ЗГОРЯННЯ РОСЛИННОЇ СИРОВИНИ ТА ДЕРЕВНОГО ВУГІЛЛЯ

<https://doi.org/10.23939/ctas2023.02.061>

Визначено значення найвищої теплоти згоряння на сухий беззолний стан згоряння 35 проб рослинної сировини та 35 деревного вугілля. Встановлені необхідні для розрахунку показники їх технічного, елементного та калориметричного аналізів. Визначено математичні та графічні залежності між фактичними та розрахунковими значеннями найвищої теплоти згоряння рослинної сировини для виробництва біогазу та деревного вугілля. Виконано статистичний аналіз цих залежностей. Результати аналізу свідчать про адекватність розроблених залежностей та дають підстави для висновку про можливість дуже точно прогнозувати значення вищої теплоти згоряння рослинної сировини за вмістом вуглецю або кисню, а деревного вугілля – за даними визначення виходу летких речовин або нелеткого вуглецю.

Ключові слова: рівняння регресії; найвища теплота згоряння; рослинна сировина; деревне вугілля; прогноз розрахунку; множинна кореляція; коефіцієнт детермінації.

Вступ

Нетрадиційні та відновлювані джерела енергії (НВДЕ) є характерною рисою сучасної енергетики. Використання НВДЕ сприяє розв'язанню не тільки питань ефективного енергозабезпечення, але й багатьох екологічних, економічних і соціальних проблем. НВДЕ є також однією із переваг світової політики низькокарбонного розвитку та засобом зменшення викидів діоксиду карбону (CO₂) в атмосферу та уникнення наслідків парникового ефекту. Проектом Нової енергетичної стратегії (НЕС) України до 2035 р. “Безпека, енергоефективність, конкурентоспроможність” передбачено розширення використання усіх видів відновлюваної енергетики, яке стане одним з інструментів гарантування енергетичної безпеки у коротко- та середньостроковому аспектах. НЕС прогнозує зростання частки відновлюваної енергетики до рівня 12 % від ЗППЕ (загального пер-

винного постачання енергії) та не менше ніж 25 % – до 2035 р. (ураховуючи всі гідроенергетичні потужності та термальну енергію) [1, 2].

Нині біомаса – четверте за значенням паливо у світі, її споживання становить приблизно 14 % загального споживання первинних енергоносіїв у світі (в країнах, що розвиваються – понад 30 %, іноді до 50–80 %). В європейських державах частка біомаси у загальному споживанні первинних енергоносіїв у середньому перевищує 3 %. Спалювання деревних відходів у сучасному розробленому обладнанні належить до екологічно прийнятних методів використання промислових відходів. Саме тому сучасні проблеми енергетики можуть бути вирішені у разі раціонального використання всіх наявних джерел палива й енергії, чільне місце з-поміж яких посідає деревна біомаса [3].

Серед різних видів біопалива особливе місце займає деревина, оскільки вона за енергетичними показниками рівноцінна бурому вугіллю. Крім цього, під час спалювання деревини утворюється така кількість CO_2 , яка була вилучена в ході фотосинтезу. Отже, деревина є екологічно чистим енергоносієм. Теплота згоряння деревини залежить від її густини (залежно від породи) та вмісту в ній вологи. Щорічний [4] обсяг заготовлення деревини в Україні становить 10308,7 тис м^3 , із них 7300 тис м^3 (4391,5 тис т) не використовують, їх можна застосувати для виробництва теплової енергії.

Пряме використання біомаси для одержання енергії екологічно безпечніше, ніж, наприклад, вугілля. Під час спалювання біомаси виділяється менше ніж 0,2 % сірки і 3–5 % золи порівняно з 2–3 і 10–15 % для вугілля, решта – переважно вуглекислий газ [5]. Крім того, зола біомаси може повернутися в ґрунт, що забезпечує замкнутість кругообігу біогенних елементів. З погляду обліку вуглекислого газу біомаса практично нейтральна, тобто в період росту рослини поглинають сонячну енергію, воду, вуглекислий газ, виділяють кисень і утворюють вуглець в процесі фотосинтезу; під час спалювання процес відбувається у зворотному напрямку: кисень поглинається, а теплота, вода і вуглекислий газ виділяються. У цьому процесі кількість поглиненого і виділеного вуглекислого газу абсолютно однакова. Для утворення 1 кг сухої біомаси (деревини) поглинається 1,83 кг CO_2 і стільки ж виділяється під час її розкладання (окиснення, горіння). Стосовно нафти, вугілля і газу спостерігається така сама закономірність для CO_2 , але час, необхідний для відновлення балансу CO_2 , сягає кількох мільйонів років.

В роботі [6] виконано статистичний аналіз взаємозв'язку показників технічного й елементного аналізів, а також вищої теплоти згорання 362 проб рослинної сировини для виробництва біогазу, деревного вугілля і торефікованої біомаси. Встановлено, що найтісніше в органічній масі рослинної сировини пов'язані показники вмісту вуглецю і кисню. Показано, що залежність вмісту вуглецю від вмісту кисню лінійна ($R^2 = 0,898$), а залежність атомного відношення вуглецю до кисню (C/O) від вмісту вуглецю і кисню – квад-

ратична ($R^2 = 0,946$ і $R^2 = 0,965$). Розроблено математичні та графічні залежності, що дають змогу з високою точністю ($R^2 > 0,849$) прогнозувати вищу теплоту згоряння рослинної сировини за даними її елементного аналізу, а саме: за вмістом вуглецю (1), кисню (2) й атомного відношення вуглецю до кисню (3):

$$Q_s^{daf} = 0,0066 \cdot (C^{daf})^2 - 0,3549 \cdot C^{daf} + 21,124, \quad (1)$$

$$Q_s^{daf} = 0,0055 \cdot (O_d^{daf})^2 - 0,569 \cdot O_d^{daf} + 42,294, \quad (2)$$

$$Q_s^{daf} = -0,3215 \cdot \left(\frac{C}{O}\right)^2 + 5,2847 \cdot \left(\frac{C}{O}\right) + 12,53, \quad (3)$$

де Q_s^{daf} – вища теплота згоряння на сухий беззолний стан, МДж/кг; C^{daf} , O_d^{daf} – вміст вуглецю та кисню на сухий беззолний стан, %; $\frac{C}{O}$ – атомне співвідношення.

Крім того, в роботах [6, 7] виконано статистичний аналіз взаємозв'язку між показниками технічного та елементного аналізів, а також теплоти згоряння 73 зразків деревного вугілля. Виявлено, що показники вмісту вуглецю та кисню найтісніше пов'язані в органічній масі деревного вугілля ($R^2 = 0,987$). Залежність атомних співвідношень (C/H і C/O) від вмісту вуглецю та кисню ступенева, а також залежність теплоти згоряння від цих співвідношень. Прогноз теплоти згоряння з найвищою точністю можна здійснити за даними визначення виходу летких речовин ($R^2 = 0,8002$) та нелеткого вуглецю ($R^2 = 0,8002$), або за даними вмісту вуглецю ($R^2 = 0,6928$), кисню ($R^2 = 0,7081$), атомних співвідношень вуглецю до кисню ($R^2 = 0,6358$) та вуглецю до водню ($R^2 = 0,4886$) у деревному вугіллі

$$Q_s^{daf} = -0,1777 \cdot V^{daf} + 35,609, \quad (4)$$

$$Q_s^{daf} = 0,1777 \cdot FC^{daf} + 17,836, \quad (5)$$

$$Q_s^{daf} = 0,2676 \cdot C^{daf} + 8,6568, \quad (6)$$

$$Q_s^{daf} = -0,3051 \cdot O_d^{daf} + 34,888, \quad (7)$$

$$Q_s^{daf} = 24,451 \cdot \left(\frac{C}{O}\right)^{0,0963}, \quad (8)$$

$$Q_s^{daf} = 27,265 \cdot \left(\frac{C}{H}\right)^{0,1244}, \quad (9)$$

де V^{daf} – вихід летких речовин на сухий беззолний стан, %; FC^{daf} – нелеткий вуглець на сухий беззолний стан, %. $\frac{C}{H}$ – атомне співвідношення.

Визначення теплоти згоряння рослинної сировини та деревного вугілля

Мета досліджень – перевірити раніше розроблені рівняння регресії для визначення найвищої теплоти згоряння на сухий беззолний стан рослинної сировини та деревного вугілля.

Матеріали та методи досліджень

Для досліджень використано 35 проб рослинної сировини (необроблена деревина,

оброблена деревина, солома, трава і рослини, лушпиння, шкаралупа, кісточки, морські водорості, а також відходи оливкової промисловості). Дані технічного (W^a , A^d , S^d , V^{daf} , FC^{daf}), елементного (C^{daf} , H^{daf} , N^{daf} , O_d^{daf}) та калориметричного (Q_s^{daf}) аналізів рослинної сировини наведено в табл. 1.

Таблиця 1

Дані технічного та елементного аналізів проб рослинної сировини

| № | W^a , % | A^d , % | V^{daf} , % | FC^{daf} , % | C^{daf} , % | H^{daf} , % | N^{daf} , % | S^{daf} , % | O_d^{daf} , % | Q_s^{daf} , МДж/кг |
|---------|--------------|--------------|------------------|-------------------|------------------|------------------|------------------|------------------|--------------------|-------------------------|
| 1 | 2,2 | 5,0 | 72,5 | 26,2 | 43,44 | 5,11 | 1,04 | 0,12 | 50,29 | 17,33 |
| 2 | 1,7 | 4,2 | 76,2 | 22,9 | 64,28 | 4,08 | 0,49 | 0,31 | 30,84 | 24,75 |
| 3 | 1,8 | 4,3 | 89,1 | 10,5 | 46,26 | 6,13 | 0,98 | 0,24 | 46,39 | 18,44 |
| 4 | 1,4 | 3,1 | 82,1 | 17,4 | 48,33 | 9,22 | 1,26 | 0,16 | 41,03 | 20,10 |
| 5 | 1,6 | 5,4 | 92,6 | 7,1 | 52,31 | 6,47 | 0,55 | 0,06 | 40,61 | 21,15 |
| 6 | 2,6 | 2,1 | 87,2 | 12,6 | 68,98 | 5,93 | 0,22 | 0,24 | 24,63 | 29,24 |
| 7 | 3,0 | 1,4 | 72,1 | 27,6 | 78,12 | 11,24 | 0,37 | 0,28 | 9,99 | 34,08 |
| 8 | 2,1 | 1,8 | 72,3 | 27,2 | 54,66 | 5,12 | 2,08 | 0,33 | 37,81 | 21,71 |
| 9 | 1,5 | 1,3 | 80,5 | 19,3 | 48,9 | 6,27 | 1,39 | 0,59 | 42,85 | 19,64 |
| 10 | 1,2 | 4,9 | 84,6 | 14,7 | 73,11 | 4,86 | 0,62 | 0,14 | 21,27 | 30,05 |
| 11 | 1,1 | 3,0 | 84,5 | 15,1 | 51,52 | 9,10 | 1,06 | 0,27 | 38,05 | 21,92 |
| 12 | 2,6 | 3,4 | 85,7 | 13,8 | 54,1 | 5,61 | 0,44 | 0,40 | 39,45 | 21,53 |
| 13 | 2,4 | 6,8 | 75,3 | 23,1 | 43,73 | 5,23 | 0,56 | 0,29 | 50,19 | 17,36 |
| 14 | 2,2 | 2,5 | 72,2 | 27,2 | 48,28 | 5,88 | 1,14 | 0,23 | 44,47 | 19,25 |
| 15 | 2,8 | 2,3 | 75,2 | 24,2 | 43,79 | 4,41 | 0,27 | 0,06 | 51,47 | 17,34 |
| 16 | 2,0 | 2,2 | 76,5 | 23,0 | 58,91 | 7,24 | 2,18 | 0,76 | 30,91 | 25,23 |
| 17 | 2,3 | 4,7 | 90,1 | 9,5 | 46,73 | 6,84 | 0,19 | 0,53 | 45,71 | 18,65 |
| 18 | 1,3 | 8,2 | 91,6 | 7,8 | 49,00 | 5,23 | 0,85 | 0,39 | 44,53 | 19,33 |
| 19 | 1,7 | 4,3 | 81,4 | 17,9 | 55,77 | 6,41 | 0,93 | 0,62 | 36,27 | 22,83 |
| 20 | 1,0 | 5,1 | 84,0 | 15,2 | 61,86 | 5,29 | 1,74 | 0,22 | 30,89 | 25,02 |
| 21 | 1,7 | 2,9 | 90,8 | 9,0 | 44,58 | 5,22 | 0,25 | 0,34 | 49,61 | 17,62 |
| 22 | 1,6 | 3,6 | 81,1 | 18,2 | 50,78 | 4,74 | 0,87 | 0,18 | 43,43 | 19,84 |
| 23 | 1,4 | 3,6 | 92,8 | 6,9 | 49,6 | 6,13 | 0,64 | 0,29 | 43,34 | 19,81 |
| 24 | 1,0 | 2,1 | 80,5 | 19,1 | 43,72 | 8,11 | 1,21 | 0,26 | 46,7 | 17,47 |
| 25 | 3,0 | 3,4 | 83,2 | 16,3 | 49,56 | 5,15 | 2,05 | 0,45 | 42,79 | 19,67 |
| 26 | 2,5 | 5,5 | 74,7 | 24,0 | 49,00 | 7,73 | 0,38 | 0,41 | 42,48 | 19,96 |
| 27 | 2,1 | 5,4 | 83,5 | 15,7 | 52,69 | 5,01 | 0,98 | 0,08 | 41,24 | 20,70 |
| 28 | 1,0 | 6,3 | 90,8 | 8,6 | 46,13 | 6,95 | 0,31 | 0,20 | 46,41 | 18,41 |
| 29 | 1,8 | 7,2 | 91,4 | 8,1 | 69,95 | 4,87 | 1,06 | 0,37 | 23,75 | 28,46 |
| 30 | 1,0 | 2,8 | 79,8 | 19,6 | 49,21 | 7,02 | 0,51 | 0,26 | 43,00 | 19,88 |
| 31 | 1,1 | 2,7 | 82,0 | 17,5 | 70,18 | 6,29 | 0,54 | 0,36 | 22,63 | 30,45 |
| 32 | 1,9 | 4,4 | 94,6 | 5,3 | 54,45 | 4,81 | 0,83 | 0,17 | 39,74 | 21,28 |
| 33 | 1,0 | 2,7 | 88,4 | 11,3 | 49,96 | 6,17 | 1,08 | 0,33 | 42,46 | 20,04 |
| 34 | 0,9 | 3,7 | 89,0 | 10,6 | 47,79 | 4,77 | 0,88 | 0,07 | 46,49 | 18,77 |
| 35 | 0,9 | 3,0 | 82,8 | 16,7 | 60,9 | 4,39 | 1,23 | 0,11 | 33,37 | 23,70 |
| Середнє | 1,8 | 3,9 | 83,2 | 16,3 | 53,73 | 6,09 | 0,89 | 0,29 | 39,00 | 22,03 |

Для отримання деревного вугілля зі зразків рослинної сировини використовували установку безперервної дії для термічної переробки рослинної сировини [8], схему якої наведено на рис. 1.

Утворення теплоносія відбувається безпосередньо в робочій камері установки. Під час піролізу (термічної переробки) сировини у каналах для сировини частина продуктів піролізу, яка власне являє собою теплоносій, перетікає в канали для теплоносія завдяки їх сполученню з каналами для сировини за потоком теплоносія та че-

рез стінку передає тепло сусідньому каналу з сировиною, тому піроліз відбувається безперервно. Інакше кажучи, так звана активна ділянка спалювання продуктів піролізу розташована між каналами для сировини, а нагрівання сировини відбувається крізь стінку. Варто зауважити, що сировина рухається у каналах для сировини зверху донизу, теплоносій знизу догори, а сполучення каналів для теплоносія з каналами для сировини дає змогу організувати протитечійний рух сировини та теплоносія.

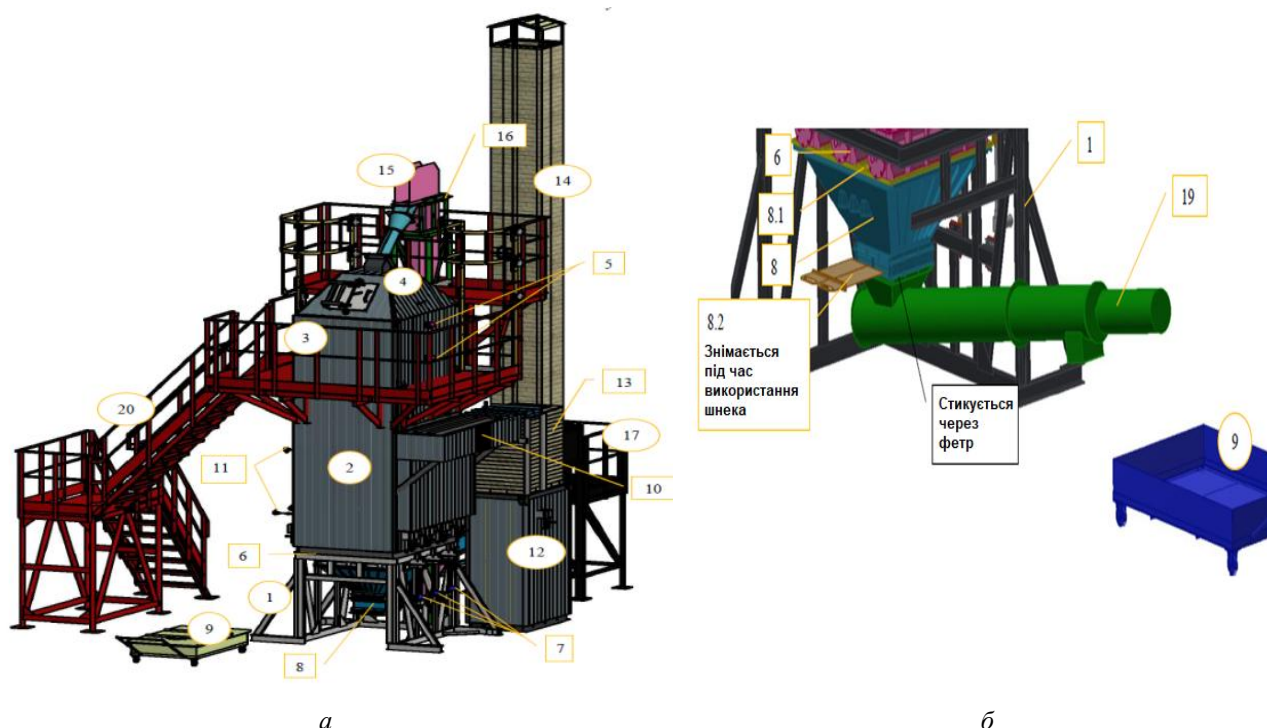


Рис. 1. Схема установки безперервної дії для термічної переробки рослинної сировини:
а – загальний вигляд; б – вузол розвантаження:

- 1 – підставка печі; 2 – камера печі; 3 – завантажувальний бункер; 4 – люк завантажувального бункера;
5 – ємнісні датчики (2 шт.); 6 – шлюзовий живильник сировинного каналу з приводом (3 шт.);
7 – привід шлюзового живильника (актуатор $L = 300$ мм, 3 шт.); 8 – стабілізаційний бункер; 8.1 – заглушка каналів; 8.2 – шибер стабілізаційного бункера (знімаються, якщо піч експлуатується зі шнеком); 9 – візок;
10 – канал відпрацьованого теплоносія з температурним датчиком; 11 – температурні датчики сировинних каналів ($T1$ зверху та $T2$ знизу); 12 – нижня частина допалювача; 13 – верхня частина допалювача;
14 – труба допалювача; 15 – норія; 16 – ферма норії; 17 – накопичувальний бункер 2 м^3 та майданчик обслуговування бункера; 18 – вібростіл; 19 – шнек вивантаження вугілля; 20 – сходи та майданчики обслуговування печі; 21 – шафа управління

Описану конструкцію робочої камери печі можна умовно розділити на чотири зони, розташовані вздовж всієї висоти каналу або каналів (коли їх два та більше) для сировини, а саме: перша зона – зона попереднього нагрівання сировини з температурою $100\text{--}250$ °С, де з сировини

виділяється тільки волога, друга зона – зона піролізу сировини з температурою $250\text{--}600$ °С, де відбувається власне стадія сухої перегонки (тобто піроліз), на цій стадії в дистилаті з'являються деякі органічні продукти та виділяється газ. Для цієї стадії характерний ще так зва-

ний екзотермічний період, що спостерігається за 275–400 °С, коли процес відбувається дуже енергійно, з явним виділенням реакційного тепла. Третя зона – зона прожарювання із температурою 450–600 °С, вона характеризується відділенням від вугілля, що утворилося в попередній стадії, невеликої кількості смол (1,5–2,0 %) та значної кількості неконденсованих газів (початок цієї стадії – 350–400 °С, а кінець задають відповідно до виробничих умов, зазвичай він не перевищує 400–600 °С). Четверта зона – зона стабілізації та охолодження сировини з температурою 300–600 °С. Нумерація зон здійснюється в напрямку руху сировини.

Продуктивність установки становить ~25 тонн на місяць залежно від сировини, що використовується.

Результати досліджень та їх обговорення

У табл. 2 наведено дані технічного, елементного та калориметричного аналізів проб де-

ревного вугілля, отриманого на установках безперервної дії з проб рослинної сировини, показники якості якої вказано у табл. 1.

На рис. 2–4 зображено графічні залежності фактичних і розрахункових значень найвищої теплоти згоряння рослинної сировини від вмісту в ній відповідно C^{daf} , O_d^{daf} та C/O ; на рис. 5–7 – графічні залежності між фактичними та розрахунковими за рівняннями (1)–(3) значеннями найвищої теплоти згоряння рослинної сировини відповідно.

Залежності фактичних і розрахункових значень найвищої теплоти згоряння отриманого деревного вугілля від його вмісту V^{daf} , FC^{daf} , C^{daf} , O_d^{daf} , C/O та C/H подано на рис. 8–13. Графічні залежності між фактичними та розрахунковими за рівняннями (4)–(9) значеннями найвищої теплоти згоряння деревного вугілля наведено на рис. 14–19.

Таблиця 2

Дані технічного, елементного та калориметричного аналізів проб деревного вугілля

| № | W^a , % | A^d , % | V^{daf} , % | FC^{daf} , % | C^{daf} , % | H^{daf} , % | N^{daf} , % | S^{daf} , % | O_d^{daf} , % | Q_s^{daf} , МДж/кг |
|----|-----------|-----------|---------------|----------------|---------------|---------------|---------------|---------------|-----------------|----------------------|
| 1 | 2,2 | 8,0 | 41,5 | 53,9 | 63,14 | 4,08 | 2,02 | 0,31 | 30,45 | 28,91 |
| 2 | 1,7 | 8,1 | 37,4 | 57,6 | 76,28 | 5,08 | 1,04 | 0,66 | 16,94 | 29,41 |
| 3 | 1,8 | 7,1 | 37,0 | 58,6 | 76,26 | 5,17 | 0,44 | 0,49 | 17,64 | 29,33 |
| 4 | 1,4 | 7,1 | 36,8 | 58,7 | 87,56 | 2,98 | 0,82 | 0,99 | 7,65 | 29,11 |
| 5 | 1,6 | 9,2 | 29,8 | 63,8 | 88,40 | 4,16 | 1,15 | 0,14 | 6,15 | 31,01 |
| 6 | 2,6 | 7,4 | 25,7 | 68,9 | 88,97 | 0,93 | 0,22 | 0,25 | 9,63 | 32,47 |
| 7 | 3,0 | 7,9 | 20,4 | 73,3 | 91,55 | 1,89 | 0,78 | 0,28 | 5,50 | 33,16 |
| 8 | 2,1 | 6,1 | 42,6 | 54,0 | 64,50 | 5,12 | 1,81 | 0,51 | 28,06 | 27,76 |
| 9 | 1,5 | 6,7 | 41,6 | 54,5 | 68,10 | 3,26 | 0,91 | 0,92 | 26,81 | 28,08 |
| 10 | 1,2 | 7,6 | 42,9 | 52,8 | 72,62 | 4,21 | 1,38 | 0,13 | 21,66 | 28,09 |
| 11 | 1,1 | 5,6 | 44,2 | 52,7 | 74,68 | 3,10 | 0,78 | 0,34 | 21,1 | 27,18 |
| 12 | 2,6 | 5,1 | 44,7 | 52,5 | 69,7 | 4,51 | 1,82 | 0,61 | 23,36 | 27,31 |
| 13 | 2,4 | 7,6 | 42,7 | 53,1 | 73,18 | 5,23 | 0,38 | 0,32 | 20,89 | 28,24 |
| 14 | 2,2 | 7,8 | 43,1 | 52,5 | 71,17 | 5,64 | 2,04 | 0,29 | 20,86 | 27,70 |
| 15 | 2,8 | 9,5 | 35,8 | 58,2 | 87,62 | 4,41 | 0,52 | 0,78 | 6,67 | 28,77 |
| 16 | 2,0 | 7,5 | 36,8 | 58,5 | 86,34 | 5,50 | 1,28 | 0,87 | 6,01 | 28,41 |
| 17 | 2,3 | 8,0 | 37,2 | 57,8 | 85,78 | 3,81 | 0,41 | 0,80 | 9,20 | 28,90 |

| 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | 9 | 10 | 11 |
|--------------|-----|------|------|------|-------|------|------|------|-------|-------|
| 18 | 1,3 | 7,6 | 36,1 | 59,1 | 86,20 | 4,22 | 0,51 | 0,57 | 8,50 | 30,04 |
| 19 | 1,7 | 8,5 | 38,5 | 56,3 | 86,84 | 5,45 | 1,27 | 0,99 | 5,45 | 28,06 |
| 20 | 1,0 | 8,6 | 31,2 | 62,9 | 87,56 | 5,21 | 1,17 | 0,24 | 5,82 | 31,04 |
| 21 | 1,7 | 8,6 | 29,7 | 64,3 | 87,55 | 4,20 | 0,23 | 0,44 | 7,58 | 31,19 |
| 22 | 1,6 | 9,1 | 30,1 | 63,6 | 88,38 | 2,17 | 0,98 | 0,53 | 7,94 | 29,45 |
| 23 | 1,4 | 10,1 | 31,9 | 61,3 | 87,52 | 4,31 | 1,21 | 0,31 | 6,65 | 30,02 |
| 24 | 1,0 | 8,6 | 31,0 | 63,1 | 87,50 | 3,36 | 0,90 | 0,28 | 7,96 | 29,15 |
| 25 | 3,0 | 7,7 | 31,2 | 63,5 | 87,50 | 5,15 | 0,36 | 0,60 | 6,39 | 29,79 |
| 26 | 2,5 | 8,3 | 31,4 | 63,0 | 87,71 | 2,74 | 1,10 | 0,44 | 8,01 | 29,10 |
| 27 | 2,1 | 8,7 | 30,5 | 63,5 | 86,92 | 5,01 | 1,23 | 0,38 | 6,46 | 29,72 |
| 28 | 1,0 | 8,7 | 26,6 | 67,1 | 89,33 | 3,11 | 2,11 | 0,33 | 5,12 | 31,09 |
| 29 | 1,8 | 9,8 | 26,5 | 66,4 | 89,06 | 4,22 | 1,04 | 0,67 | 5,01 | 30,70 |
| 30 | 1,0 | 11,5 | 30,1 | 61,9 | 87,96 | 5,02 | 1,01 | 0,43 | 5,58 | 29,15 |
| 31 | 1,1 | 7,0 | 19,8 | 74,6 | 90,16 | 1,78 | 0,54 | 0,36 | 7,16 | 32,78 |
| 32 | 1,9 | 8,9 | 20,5 | 72,4 | 90,35 | 1,80 | 0,37 | 0,27 | 7,21 | 32,83 |
| 33 | 1,2 | 7,5 | 37,6 | 57,8 | 88,6 | 2,34 | 0,81 | 0,19 | 8,06 | 29,11 |
| 34 | 2,1 | 8,5 | 34,7 | 59,9 | 75,9 | 3,48 | 0,98 | 0,54 | 19,1 | 29,62 |
| 35 | 1,6 | 5,9 | 31,5 | 64,5 | 80,8 | 5,11 | 1,12 | 0,49 | 12,48 | 30,20 |
| Серед- не | 1,8 | 8,0 | 36,9 | 55,4 | 82,6 | 3,94 | 0,99 | 0,48 | 12,09 | 29,62 |

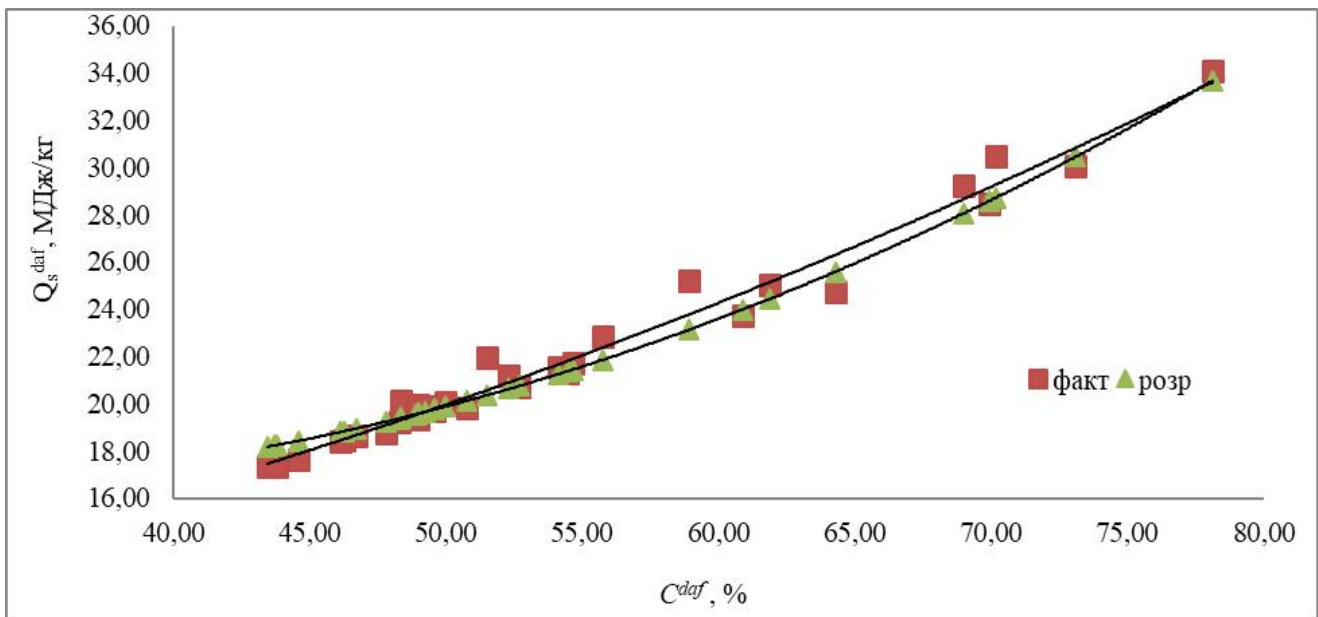


Рис. 2. Залежність між Q_s^{daf} від C^{daf}

Визначення теплоти згоряння рослинної сировини та деревного вугілля

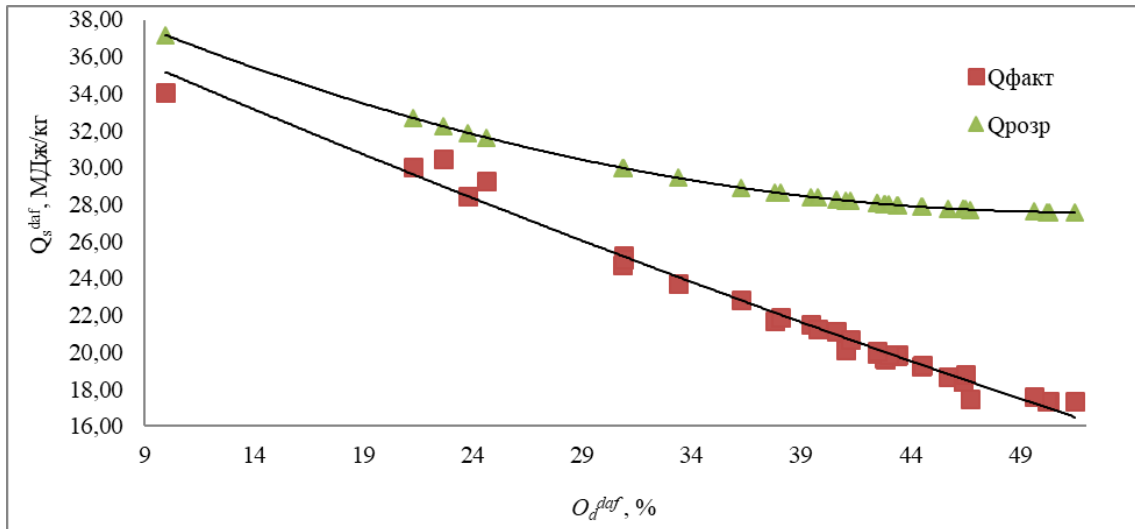


Рис. 3. Залежність Q_s^{daf} від O_d^{daf}

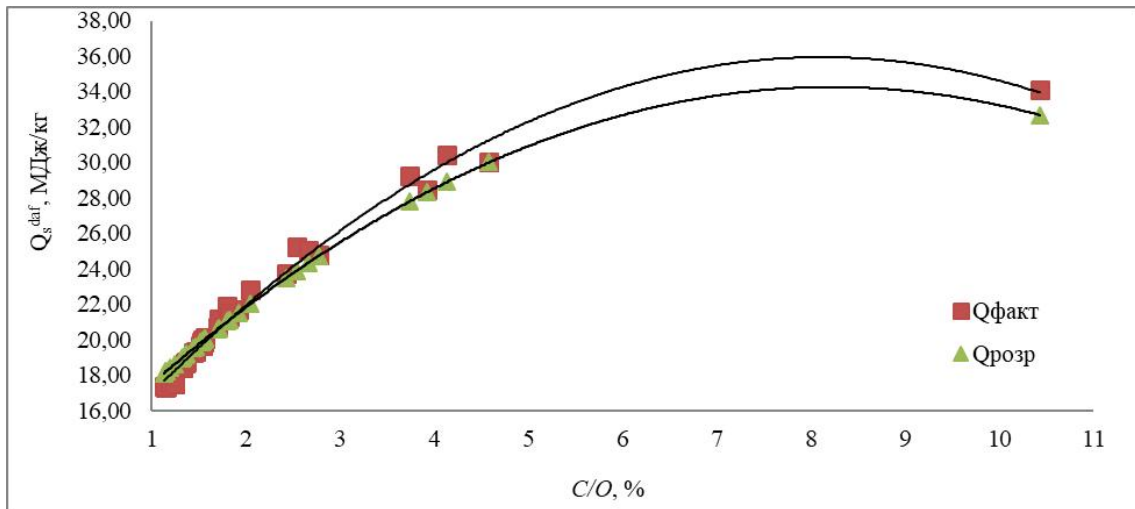


Рис. 4. Залежність Q_s^{daf} від C/O

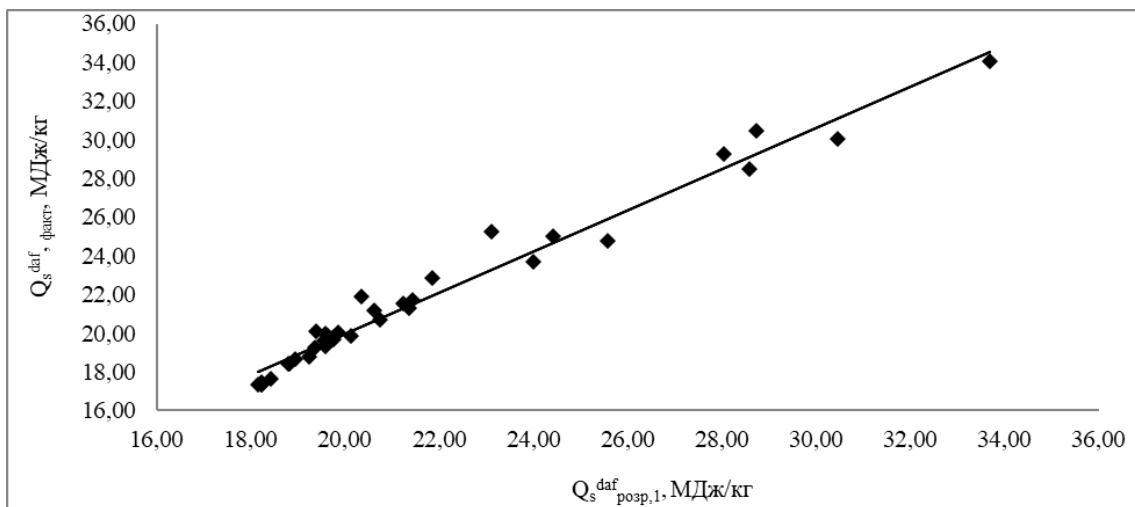


Рис. 5. Залежність між $Q_{s,факт}^{daf}$ і $Q_{s,розн,1}^{daf}$

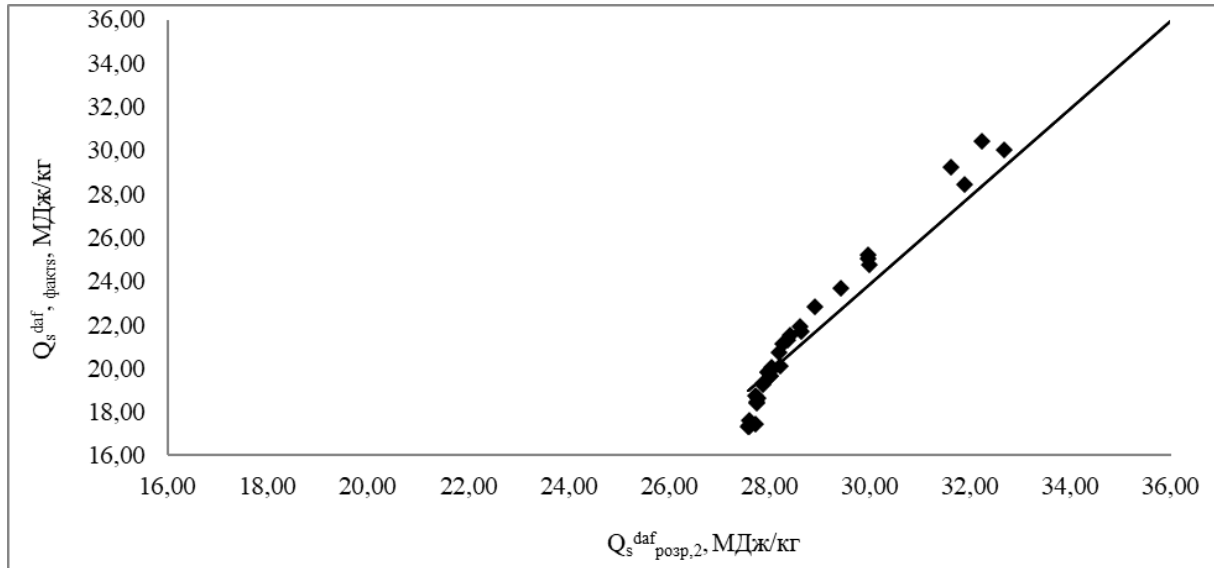


Рис. 6. Залежність між $Q_s^{daf} \text{ факт}$ і $Q_s^{daf} \text{ розр,2}$

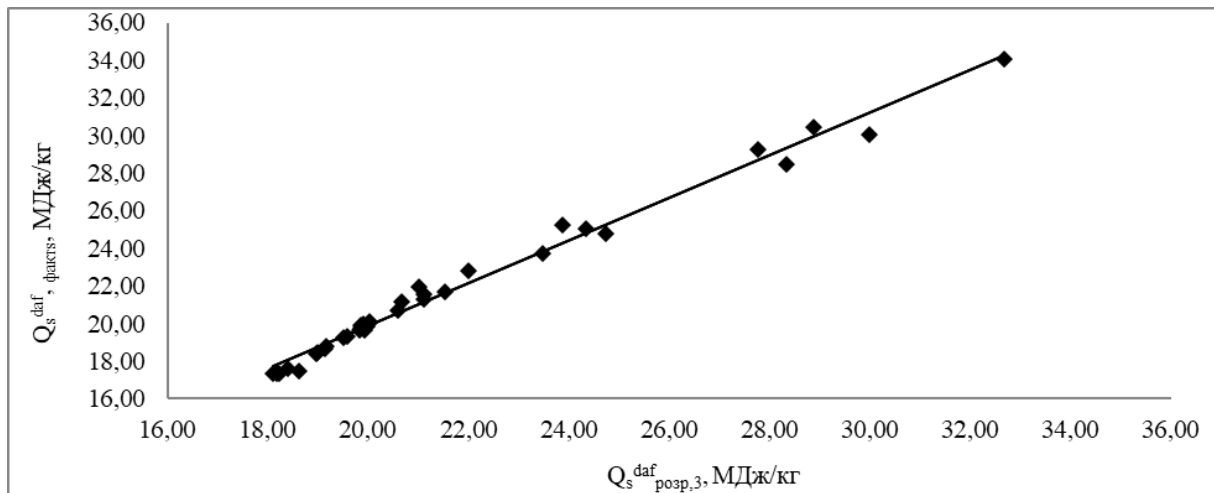


Рис. 7. Залежність між $Q_s^{daf} \text{ факт}$ і $Q_s^{daf} \text{ розр,3}$

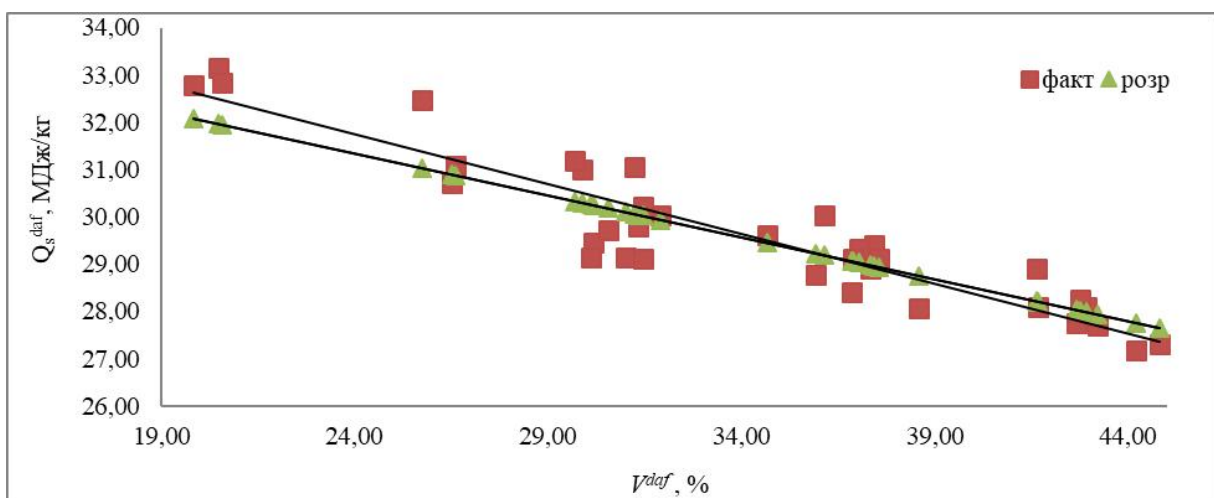


Рис. 8. Залежність Q_s^{daf} від V^{daf}

Визначення теплоти згорання рослинної сировини та деревного вугілля

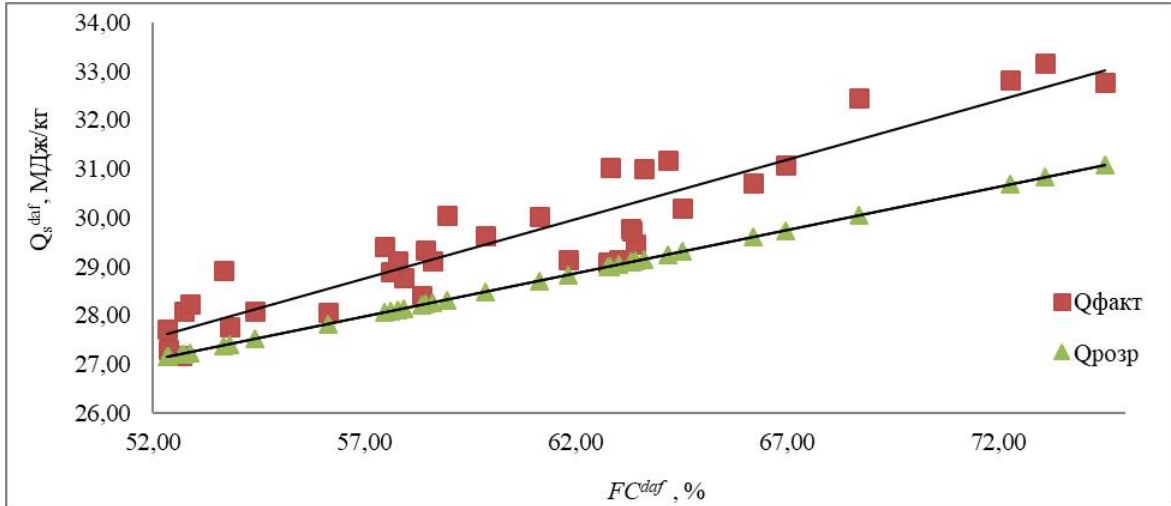


Рис. 9. Залежність Q_s^{daf} від FC^{daf}

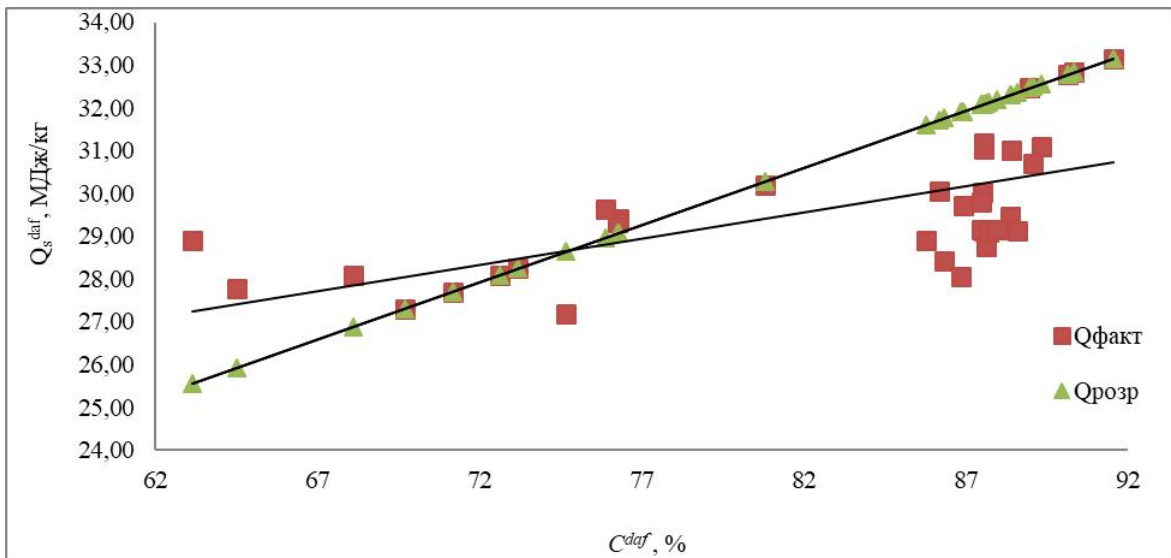


Рис. 10. Залежність Q_s^{daf} від C^{daf}

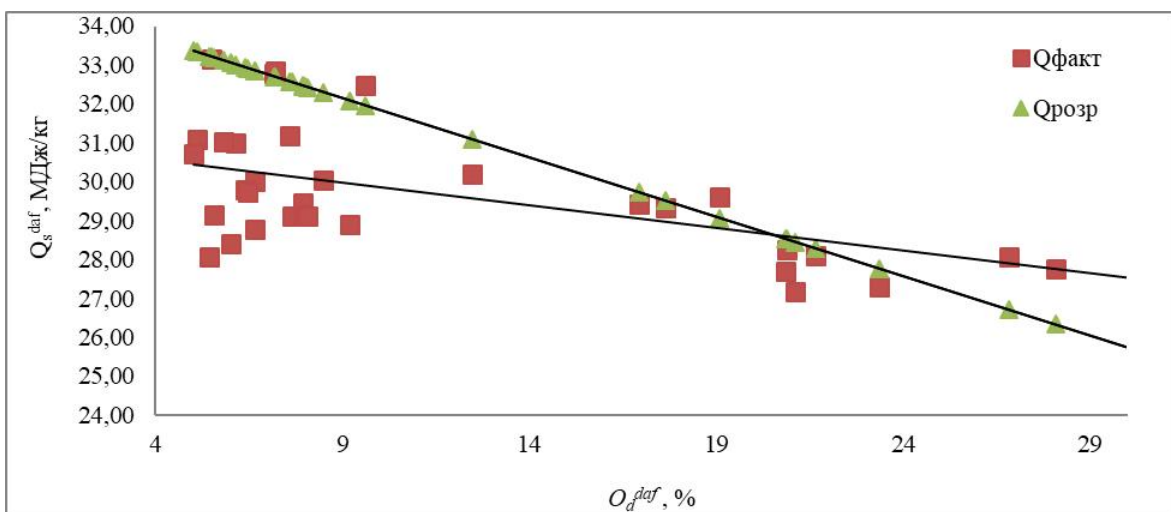


Рис. 11. Залежність Q_s^{daf} від O_d^{daf}

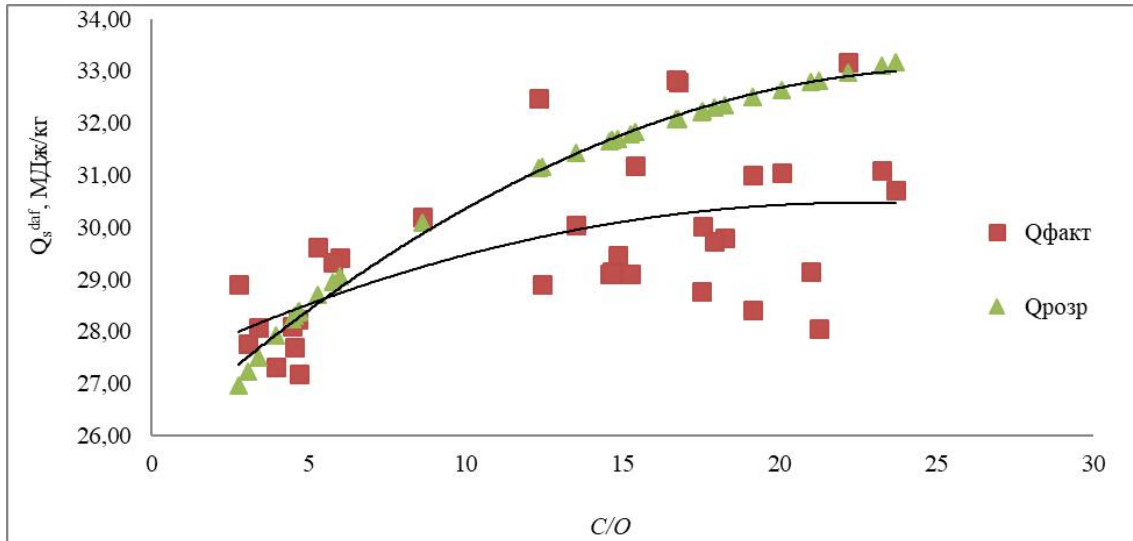


Рис. 12. Залежність Q_s^{daf} від C/O

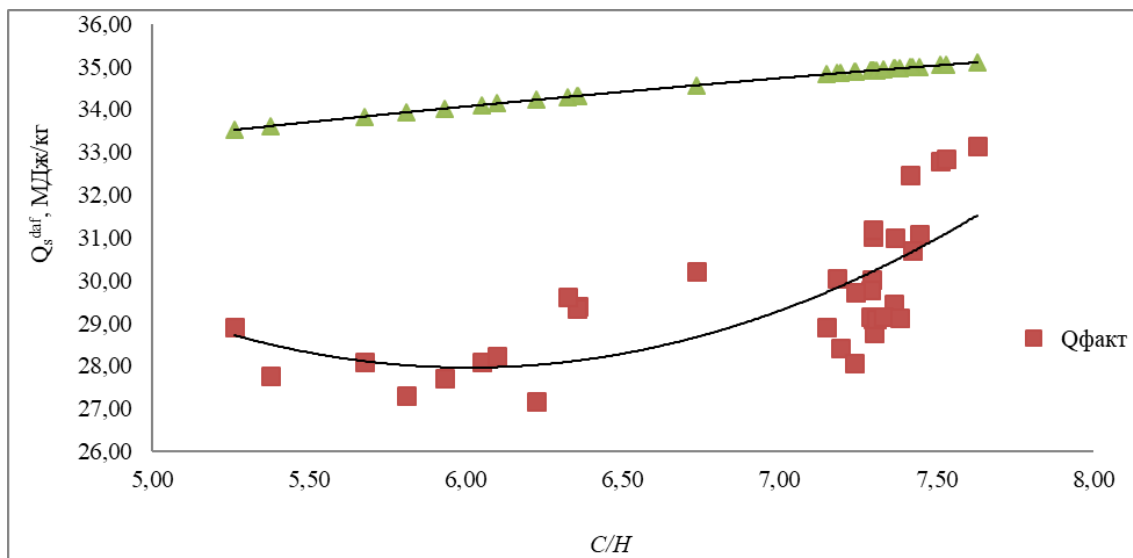


Рис. 13. Залежність Q_s^{daf} від C/H

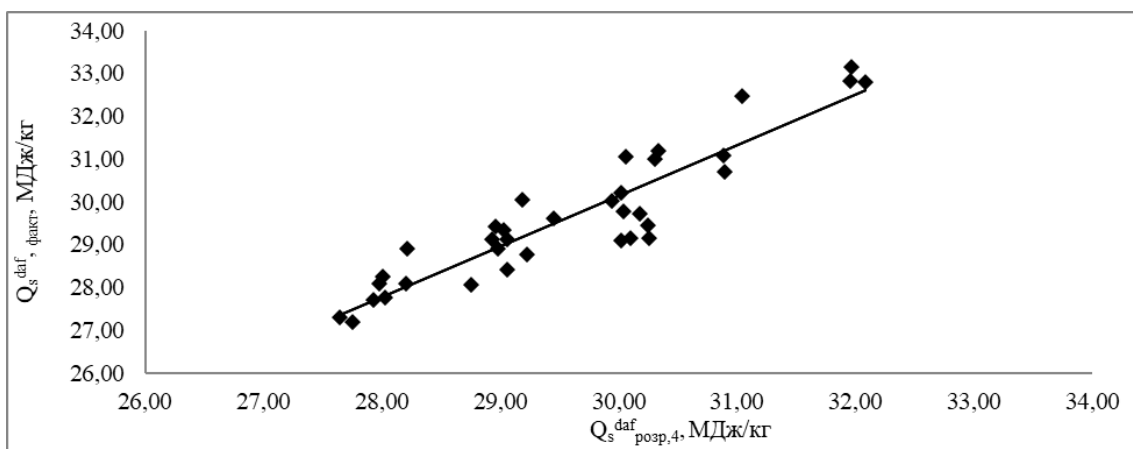


Рис. 14. Залежність між Q_s^{daf} і Q_s^{daf}

Визначення теплоти згоряння рослинної сировини та деревного вугілля

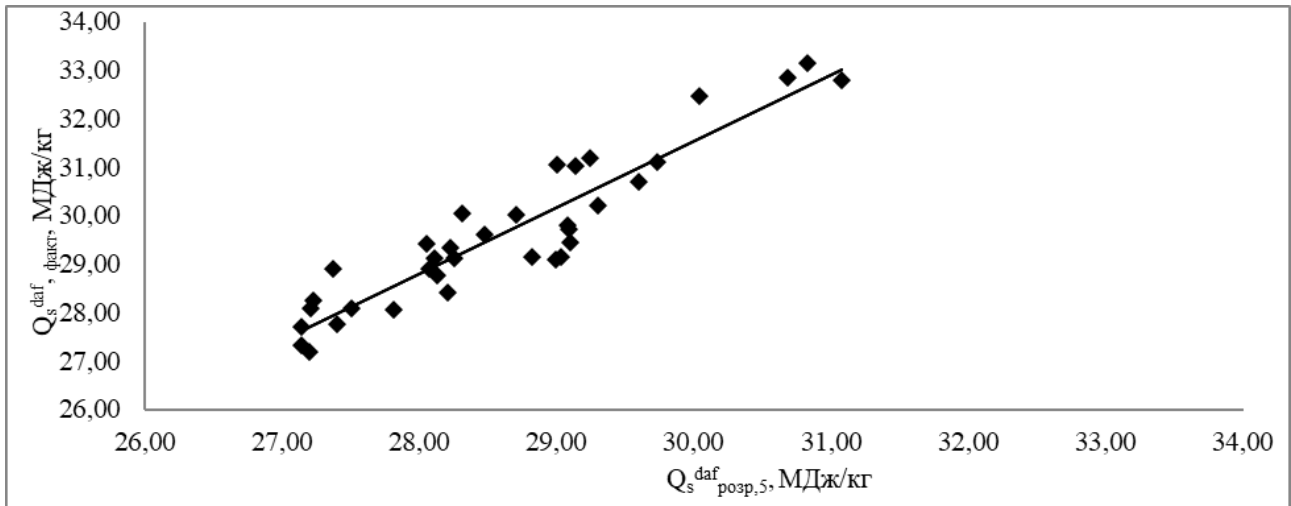


Рис. 15. Залежність між Q_s^{daf} факт і Q_s^{daf} розр,5

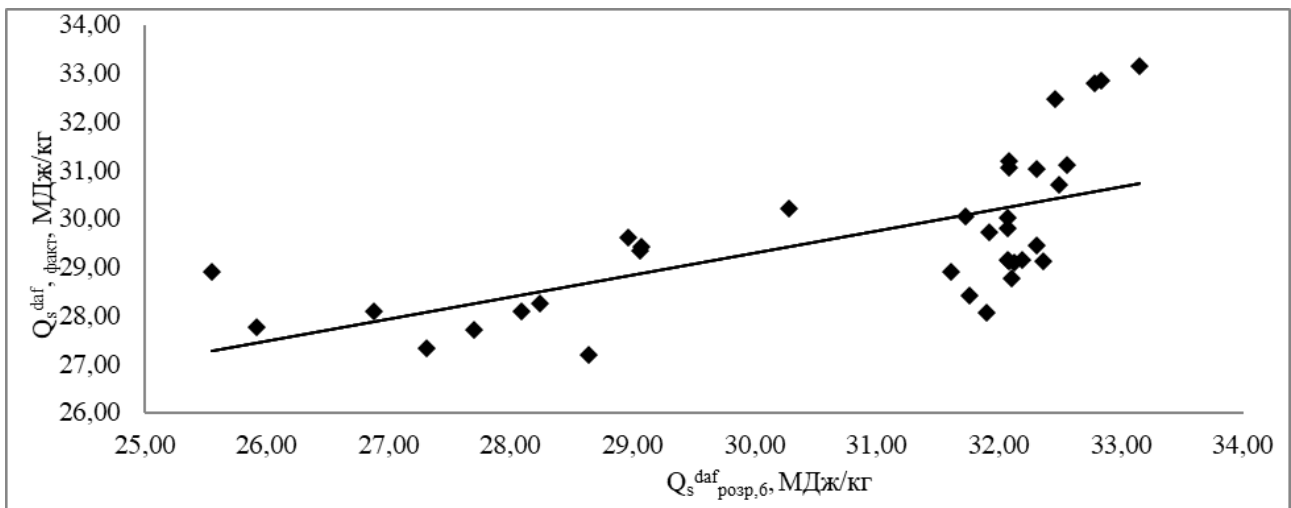


Рис. 16. Залежність між Q_s^{daf} факт і Q_s^{daf} розр,6

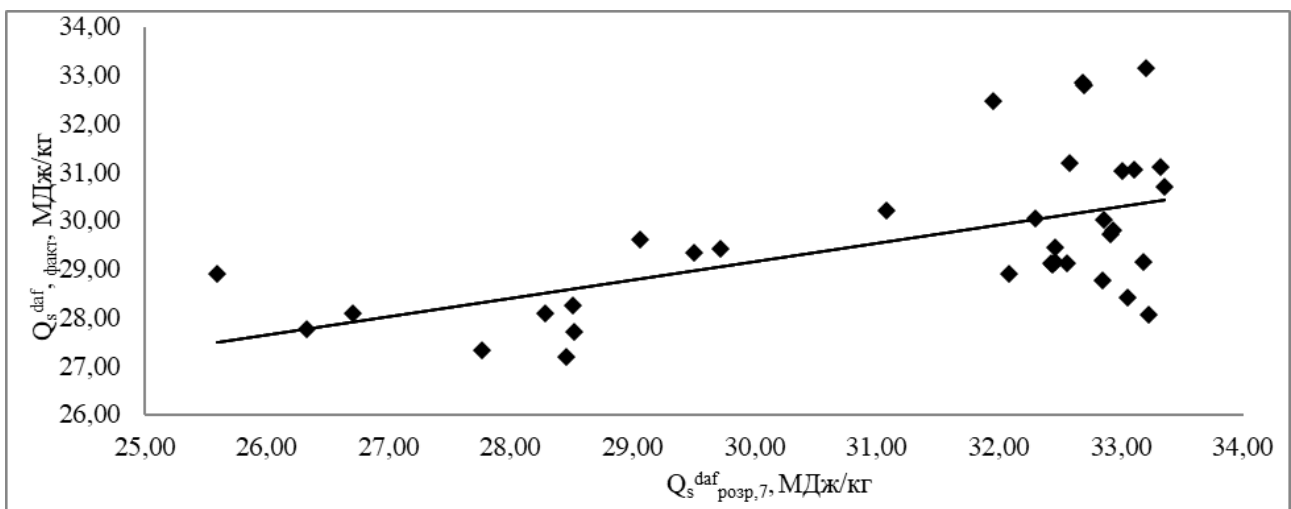


Рис. 17. Залежність між Q_s^{daf} факт і Q_s^{daf} розр,7

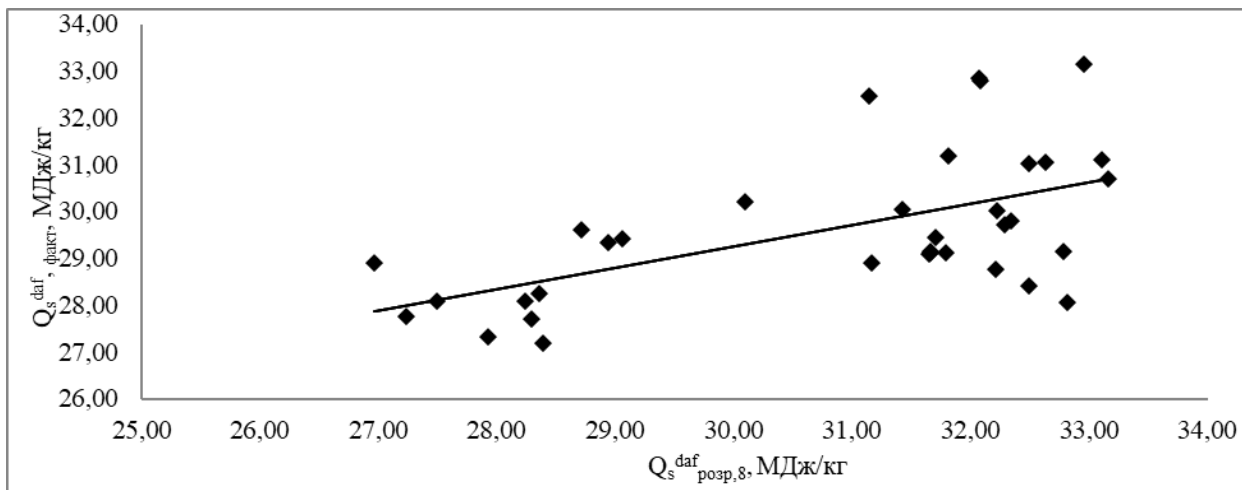


Рис. 18. Залежність між $Q_{s \text{ факт}}^{daf}$ і $Q_{s \text{ розр,8}}^{daf}$

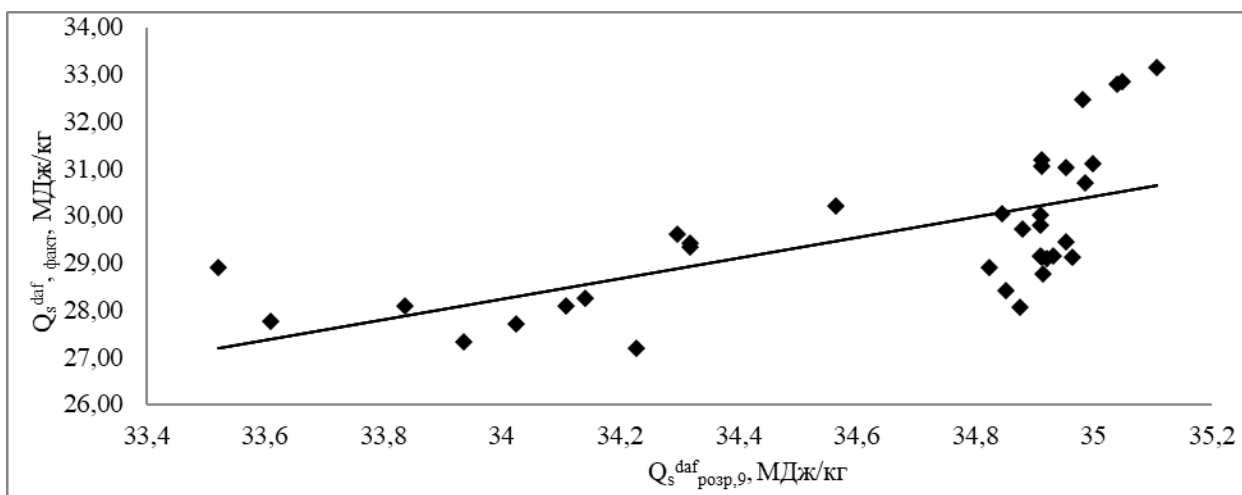


Рис. 19. Залежність між $Q_{s \text{ факт}}^{daf}$ і $Q_{s \text{ розр,9}}^{daf}$

У табл. 3 подано отримані математичні залежності фактичних значень найвищої теплоти зго-

рання рослинної сировини та деревного вугілля від розрахункових, а також їх статистичну оцінку.

Таблиця 3

Математичні залежності та їх статистична оцінка

| № | Вид залежності | Статистична оцінка ¹ | | |
|-------------------|--|---------------------------------|-----------------------|-----------|
| | | <i>r</i> | <i>R</i> ² | σ, МДж/кг |
| 1 | 2 | 3 | 4 | 5 |
| Рослинна сировина | | | | |
| (10) | $Q_{s \text{ факт}}^{daf} = 1,2962 \cdot Q_{s \text{ розр,1}}^{daf} - 6,0416$ | 0,959 | 0,92 | 4,632 |
| (11) | $Q_{s \text{ факт}}^{daf} = 12,6165 \cdot Q_{s \text{ розр,2}}^{daf} - 53,723$ | 0,991 | 0,98 | 5,290 |
| (12) | $Q_{s \text{ факт}}^{daf} = 12,6165 \cdot Q_{s \text{ розр,3}}^{daf} - 53,723$ | 0,959 | 0,92 | 4,547 |

¹ *r* – коефіцієнт множинної кореляції; *R*² – коефіцієнт детермінації; σ – середньоквадратичне відхилення, МДж/кг

| 1 | 2 | 3 | 4 | 5 |
|-----------------|---|-------|------|-------|
| Деревне вугілля | | | | |
| (13) | $Q_{s \text{ факт}}^{daf} = 1,1838 \cdot Q_{s \text{ розр},4}^{daf} - 5,3728$ | 0,923 | 0,85 | 1,395 |
| (14) | $Q_{s \text{ факт}}^{daf} = 1,3713 \cdot Q_{s \text{ розр},5}^{daf} - 9,6073$ | 0,933 | 0,87 | 1,425 |
| (15) | $Q_{s \text{ факт}}^{daf} = 0,4551 \cdot Q_{s \text{ розр},6}^{daf} + 15,624$ | 0,642 | 0,41 | 1,987 |
| (16) | $Q_{s \text{ факт}}^{daf} = 0,3776 \cdot Q_{s \text{ розр},7}^{daf} + 17,83$ | 0,566 | 0,32 | 2,140 |
| (17) | $Q_{s \text{ факт}}^{daf} = 0,4557 \cdot Q_{s \text{ розр},8}^{daf} + 15,57$ | 0,574 | 0,33 | 1,873 |
| (18) | $Q_{s \text{ факт}}^{daf} = 2,1802 \cdot Q_{s \text{ розр},9}^{daf} - 45,898$ | 0,631 | 0,39 | 2,774 |

Як бачимо, отримані залежності фактичних значень найвищої теплоти згоряння рослинної сировини характеризуються високими значеннями коефіцієнтів детермінації (0,92–0,98) та множинної кореляції (0,959–0,991).

А для деревного вугілля задовільними значеннями коефіцієнтів детермінації та множинної кореляції характеризуються отримані залежності фактичних значень найвищої теплоти згоряння на сухий беззольний стан від її значень, розрахованих за рівнянням (4) від V^{daf} – ($R^2 = 0,85$; $r = 0,923$) та за рівнянням (5) від FC^{daf} – ($R^2 = 0,87$; $r = 0,933$).

Отже, рівняння регресії (1)–(6), які ми розробили, описують залежність значення вищої теплоти згоряння рослинної сировини за вмістом вуглецю, кисню або їх атомне співвідношення ($\frac{C}{O}$), а рівняння (4) і (5) – залежності вищої теплоти згоряння деревного вугілля від його вмісту відповідно летких речовин V^{daf} та нелеткого вуглецю FC^{daf} . Вони адекватно описують відповідні залежності та дають змогу прогнозувати вищу теплоту згоряння з високою точністю.

У роботі [9] наведено чотири рівняння для прогнозування теплоти згоряння за допомогою показників технічного аналізу вуглеводнів. Ці рівняння отримано в роботах [10–12] та перевірено на сумішах нафтових залишків, вугілля, полімерів та рослинних відходів. Зазначено, що середнє значення коефіцієнта детермінації (R^2) становить 0,965. На підставі цього можна зробити

висновок, що рівняння для прогнозування теплоти згоряння рослинної сировини, які ми розробили, на одному рівні із закордонними аналогами.

Крім того, запропоновані рівняння доводять той факт, що вміст вуглецю найточніше відображає теплоту згоряння рослинної сировини. Це збігається із думкою авторів [13], які проаналізували 69 різних математичних рівнянь для прогнозування теплоти згоряння рослинної сировини.

Висновки

Визначено значення найвищої теплоти згоряння на сухий беззольний стан згоряння 35 проб рослинної сировини та таку саму кількість проб деревного вугілля. Встановлено необхідні для розрахунку показники їх технічного, елементного та калориметричного аналізів.

Одержано графічні залежності фактичних і розрахункових значень найвищої теплоти згоряння рослинної сировини та деревного вугілля від вмісту показників технічного та елементного аналізів.

Розроблено математичні та графічні залежності між фактичними та розрахунковими значеннями найвищої теплоти згоряння рослинної сировини та деревного вугілля. Виконано статистичний аналіз цих залежностей.

Отримані залежності фактичних значень найвищої теплоти згоряння рослинної сировини характеризуються високими значеннями коефі-

цієнтів детермінації та множинної кореляції. Для рослинної сировини коефіцієнт детермінації, розрахований за рівнянням залежності Q_s^{daf} від вмісту C^{daf} , дорівнював 0,92, а коефіцієнт множинної кореляції – 0,960; для рівняння залежності Q_s^{daf} від вмісту O_d^{daf} коефіцієнти детермінації та множинної кореляції становлять відповідно 0,98 та 0,991; а для рівняння (3) залежності Q_s^{daf} від атомного співвідношення $\frac{C}{O}$ коефіцієнти детермінації та множинної кореляції – відповідно 0,92 та 0,959.

Також задовільними значеннями коефіцієнтів детермінації та множинної кореляції характеризуються отримані залежності фактичних значень найвищої теплоти згоряння на сухий беззольний деревного вугілля стан від її значень, розрахованих за рівнянням від V^{daf} – ($R^2 = 85,14\%$; $r = 0,923$) та за рівнянням від FC^{daf} – ($R^2 = 87,02\%$; $r = 0,933$).

Такі результати свідчать про адекватність розроблених залежностей та дають підстави зробити висновок про можливість з високою точністю прогнозувати значення вищої теплоти згоряння рослинної сировини за вмістом вуглецю, кисню або їх атомного співвідношення, а деревного вугілля – за даними визначення виходу летких речовин або нелеткого вуглецю.

References

1. Zapaiowska A., Bashutska U. (2016). Otrymannya derevnoyi biomasy z enerhetychnoyu metoyu u Pol'shchi ta Ukraini. *Naukovi pratsi Lisivnychoyi akademiyi nauk Ukrainy*. No. 14. S. 17–22. <https://doi.org/10.15421/411601>.
2. Klymenko V. V., Kravchenko V. I., Lychuk M. V., Soldatenko V. P. (2016). Eksperymental'na otsinka vyhotovlennya tverdoho biopalyva z kompozytiv na osnovi roslynnykh vidkhodiv. *Énerhotekhnolohyy u resursoberezhnye*. No. 3. S. 18–24. http://nbuv.gov.ua/UJRN/ETRS_2016_3_4.
3. Klymenko V. V., Kravchenko V. I., Lychuk M. V., Soldatenko V. P. (2016). Eksperymental'na otsinka vyhotovlennya tverdoho biopalyva z kompozytiv na osnovi roslynnykh vidkhodiv. *Énerhotekhnolohyy u resursoberezhnye*. No. 3. S. 18–24. http://nbuv.gov.ua/UJRN/ETRS_2016_3_4.
4. Barbash V. A. (2018). *Innovatsiyini tekhnolohiyi roslynnoho resursoberezhennya: navch. posib*. K.: Karavela, 288 s.
5. Plachkova S. H., Plachkov I. V., Dunaevs'ka N. I., Podhurenko V. S., Shylyayev B. A., Landau Yu. O., Syhal I. Ya., Danylko H. D. (2012–2013). *Enerhetyka: istoriya, suchasnist' i maybutnye*. Knyha 5. Elektroenerhetyka ta okhrona navkolyshn'oho seredovyscha. Funktsionuvannya enerhetyky v suchasnomu sviti. K.: Enerhetyka: istoriya, suchasnist' i maybutnye, 589 s. <http://energetika.in.ua/ru/books/book-1>
6. Mirosnichenko D. V., Malik I. K. Vyznachennya teploty z-horyannya roslynnoyi syrovyny ta derevynnoho vuhillya. *Vuhlekhimichnyy zhurnal*. 2023. No. 2. S. 31–48. <https://doi.org/10.31081/1681-309X-2023-0-2-31-481>
7. Malik I., Contreras A. B., Hassan N., El Rasoul A. (2022). Prediction of the Higher Heating Value of Charcoal. *Petroleum and Coal*. Vol. 64 (1). P. 100–105. https://www.vurup.sk/wp-content/uploads/2022/05/PC-X_Mirosnichenko_121.pdf
8. Malik I. K. Patent Ukrainy na korysnu model' No. 133566. Ustanovka bezperervnoyi termichnoyi pererobky roslynnoyi syrovyny. *Promyslova vlasnist'*. 2019. No. 7.
9. Ahmaruzzaman M. (2008). Proximate analyses and predicting HHV of chars obtained from cocracking of petroleum vacuum residue with coal, plastics and biomass. *Bioresource Technology*. 2008. 99 (11). P. 5043–5050. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2007.09.021>
10. Parikh J., Channiwala S. A., Chosal G. K. (2005). A correlation for calculating HHV from proximate analysis of solid fuels. *Fuel*. 84. P. 487–494.
11. Cordero T., Marquez F., Rodriguez-Marasol J., Rodriguez J. J. (2001). Predicting heating values of lignocellulosic and carbonaceous materials from proximate analysis. *Fuel*. 80. P. 1567–1571.
12. Jimenez L., Gonzalez F. (1991). Study of the physical and chemical properties of lignocellulosic residues with a view to the production of fuels. *Fuel*. 70. P. 947–950.
13. Noushabadi A. S., Dashti A., Ahmadijokani F., Hu J., Mohammadi A. H. (2021). Estimation of higher heating values (HHVs) of biomass fuels based on ultimate analysis using machine learning technique and improved equation. *Renewable Energy*. 179. P. 550–562. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2021.07.003>

I. K. Malik¹, V. V. Koval², D. V. Miroshnichenko^{1,2}, A. B. Contreras³, N. Hassan⁴

¹ National Technical University “Kharkiv Polytechnic Institute”,

Department of oil, gas and solid fuel processing technology,

² State Enterprise “Ukrainian State Research

Institute for Carbochemistry” (UKHIN), coal department,

³ Carbosur, Oaxaca, Mexico

⁴ Nader Group Engineering, Port Said, Egypt

DETERMINATION OF THE HEAT OF COMBUSTION OF VEGETABLE RAW MATERIALS AND CHARCOAL

The values of the highest heat of combustion for the dry ashless state of combustion of 35 samples of vegetable raw materials and 35 charcoal were determined. The need for calculating indicators of their technical and elemental analysis was established. Mathematical and graphical relationships between the actual and estimated values of the highest heat of combustion of plant raw materials for the production of biogas and charcoal were developed. A statistical analysis of the dependence data was performed. The results of the analysis indicate the adequacy of the developed dependencies, and allow us to draw a conclusion about the possibility of predicting with high accuracy the value of the higher heat of combustion of vegetable raw materials by carbon or oxygen content, and charcoal for this determination of the yield of volatile substances or non-volatile carbon.

Key words: regression equation; highest heat of combustion; vegetable raw materials; charcoal; calculation forecast; multiple correlation; determination of coefficients.