

**Мисак Й.С.**, докт. техн. наук, проф., **Лис С.С.**, канд. техн. наук  
**Національний університет «Львівська політехніка»**, Львів  
вул. С. Бандери, 12, 79013 Львів, Україна, e-mail: Lysss@ukr.net

## Дослідження процесу газифікації деревної біомаси у суцільному шарі

Технологія газифікації деревної біомаси є актуальною задачею, вирішення якої дасть змогу створити екологічно чисте джерело енергії, яке є альтернативою спалюванню викопних палив та газифікації вугілля. Вона дає змогу вирішити проблеми екологічної утилізації промислових та побутових відходів деревини, отримання дешевої енергії та покращення екологічного стану довкілля. На основі аналізу теоретичних положень та експериментальних досліджень доведено можливість перероблення деревини під час газифікації у газогенераторі з суцільним шаром на газоподібне паливо з нижчою теплотворною здатністю у 1,5 рази більшою, ніж у газоподібного палива, отриманого іншими газогенераторами такого типу. За результатами експериментальних досліджень отримано регресійні залежності теплоти згоряння синтез-газу під час газифікації низькосортних палив від фракційного складу палива, кількості повітря, висоти шару палива. Одержані рівняння регресії можуть бути основою для проведення досліджуваного процесу та раціонального керування ним. Маючи рівняння залежності вхідних факторів від вихідного параметра, можна прогнозувати всі можливі значення параметра оцінки досліджуваного процесу за будь-яких значень факторів, що знаходяться між верхнім та нижнім рівнями. *Бібл. 12, рис. 1, табл. 2.*

**Ключові слова:** деревна біомаса, нижча теплота згоряння, синтез-газ, газифікація, регресійні залежності.

Одним з найперспективніших способів перероблення низькосортних палив на енергію є газифікація, тому що синтез-газ можна використовувати як паливо для котлів комунальних котельень, для зріджування, як паливо для двигуна внутрішнього згоряння з метою отримання механічної або електричної енергії.

Українська енергетика є невід'ємною складовою світового енергетичного ринку, для якої характерні висока енергоемність продукції, низька енергоефективність, значний вплив на екологію. Для вирішення цих проблем серед головних заходів є впровадження новітніх енергоефективних технологій, спрямованих на підвищення ефективності використання паливно-енергетичних ресурсів, впровадження альтернативних та екологічно чистих джерел енергії. Одним з найпопулярніших альтернативних та екологічно чистих джерел енергії є деревне паливо. Суттєвою перевагою деревного палива є його екологічна чистота: деревина не містить сірки, хлору та інших шкідливих для атмосфери елементів. Під час згоряння деревина виділяє таку саму кількість  $\text{CO}_2$ , яку спожила у процесі зростання.

Технологія газифікації деревної біомаси є актуальною задачею, вирішення якої дасть змо-

гу створити екологічно чисте джерело енергії, яке є альтернативою спалюванню викопних палив та газифікації вугілля.

### Аналіз літературних даних та постановка проблеми

У зв'язку з напруженою екологічною ситуацією та обмеженим доступом до викопних палив деревина є одним з найбільш перспективних джерел відновлюваної енергії у багатьох країнах. У працях [1–3] приведено аналіз світових тенденцій впровадження газогенераторних установок у комерційних та наукових цілях. Так, у США та Австрії існують газифікатори зі зрідженим шаром, які дають понад 80 % горючого газу, при цьому синтез-газ має високу теплотворну здатність (до 18,5 МДж/м<sup>3</sup>). Газифікатори з суцільним шаром дають змогу отримати низькокалорійний синтез-газ (до 7,5 МДж/м<sup>3</sup>).

У світі широко використовуються газогенератори з суцільним шаром [3–5]. Сировина подається в газифікатор згори та, переміщуючись вниз, проходить послідовно зони сушіння, піролізу, газифікації та горіння. Зола, що залишилася, видаляється через колосникову решітку в нижній частині газифікатора. Темпера-

тура в зоні горіння регулюється зміною вологості повітряного дуття. Повітря та пара подаються в газифікатор знизу через колосникову решітку, що обертається. Синтез-газ по короткій теплоізолюваній трубі поступає у палиник, сконструйований спеціально для спалювання низькокалорійного газу. На тепловій станції «Kauhaajoki» (Фінляндія) потужністю 5 МВт<sub>т</sub>, як на усіх інших теплових станціях з газифікатором «Bioneer», синтез-газ спалюється у котлі з метою вироблення тепла [2]. Внаслідок високого рівня вмісту смол такий синтез-газ не може транспортуватися на великі відстані або безпосередньо використовуватися в двигунах внутрішнього згорання. Ще одним недоліком газогенераторів «Bioneer» є те, що сировина, яка переробляється, має задовільняти таким вимогам (специфікація виробника): максимальний вміст дрібних часток 30–50 %, вологість не більше 50 %, температура плавлення золи не нижче 1190 °С. На практиці для газифікаторів цього типу використовують сировину вологістю не більше 45 % у звичайному режимі роботи та не більше 40 % у разі роботи газифікатора при максимальному навантаженні впродовж тривалого періоду. При недовготриманні цієї умови горіння синтез-газу з великим вмістом аерозолів смол та пари води стає нестабільним.

У технічному університеті Данії (DTU) розроблена технологія двохстадійної газифікації біомаси на основі газогенератора з суцільним шаром. Основна ідея полягає в оптимальному розподілі зон піролізу, вторинного розкладання піролізних смол та газифікації вуглицевої речовини. Сировина надходить у шнековий живильник, що підігрівається ззовні повітрям, де відбувається сушіння та піроліз. Після живильника сировина завантажується у верхню частину газифікатора. Підігріте повітря подається у середню зону реактора, де відбувається часткове окислення біомаси. Із зони часткового окислення біомаса опускається вниз у зону газифікації. Технологія реалізована на демонстраційній установці «Viking» потужністю 80 кВт<sub>т</sub> [3]. Недоліком такої конструкції є складність у виготовленні та обслуговуванні.

Якість газу, що отриманий у процесі газифікації, залежить від багатьох факторів, головними з яких є вид та характеристики палива, температура та тиск у зоні реакції, кількість повітря, висота шару палива. Незважаючи на великий досвід експлуатації газогенераторів, існує багато технічних та технологічних проблем: стабільність та ефективність роботи газогенераторів; низька калорійність синтез-газу; специфічні особливості різних видів палива, тощо.

Для підвищення ефективності процесу термічного перероблення деревини на газоподібне паливо необхідно провести комплекс досліджень з використанням сучасної методології та досягнень сучасної науки та техніки. Аналізуючи відомі роботи [3–6], можна зробити висновок, що найбільш технологічним, конструктивно простим та інтенсивним способом газифікації деревини є газифікація у реакторі з суцільним шаром.

Переваги газифікаторів із суцільним шаром такі: високий ступінь перетворення вуглеводню; мала кількість золи; тривале перебування твердого палива у реакторі; достатньо проста конструкція газифікатора. Однак сучасні газогенератори з суцільним шаром дають змогу отримувати синтез-газ з теплотворною здатністю 5–7,5 МДж/нм<sup>3</sup>, вимогливі до якості палива, що газифікується, та складні в обслуговуванні. Треба було розробити таку конструкцію газогенератора, яка б дозволяла отримувати синтез-газ з більшою теплотворною здатністю, газифікувати паливо з більшою вологістю та щоб була нескладною в експлуатації.

Мета дослідження — підвищення ефективності процесу газифікації деревної біомаси у суцільному шарі як альтернатива спалюванню вихисних палив та газифікації вугілля.

Аналіз впливу вхідних параметрів на теплотворну здатність синтез-газу дозволить знайти оптимальні режимні параметри процесу газифікації та роботи лабораторної газогенераторної установки, що дає змогу розробити технологію процесу газифікації та конструктивну схему промислової газогенераторної установки.

Для проведення експериментальних досліджень використовувалися такі матеріали: сосна (*Pinus sylvestris*); верба (*Salix alba* L.); береза (*Betula pendula* Roth.).

Завдання полягало у знаходженні залежності нижчої теплоти згорання синтез-газу від розмірів частинок деревини, яка подається в газогенератор, а також кількості повітря та кількості палива від загального об'єму реактора під час газифікації досліджуваних порід деревини.

Для проведення експериментальних досліджень та визначення раціональних параметрів роботи газогенераторної установки розроблено газогенератор із суцільним шаром [7].

У серії дослідів завдання полягало у знаходженні залежності нижчої теплоти згорання синтез-газу від розмірів частинок подрібненої деревини, що подається у газогенератор, кількості повітря та кількості палива в камері газифікації для кожної з досліджуваних порід деревини, а також залежності нижчої теплоти зго-

ряння синтез-газу від породи деревини, що газифікується.

З метою встановлення характеру впливу змінних факторів на нижчу теплоту згоряння синтез-газу застосовано тривірневий В-план (В<sub>3</sub>). Рівні та інтервали змінювання факторів наведено в табл. 1.

Число дослідів, що дублювалися у кожній серії,  $n = 6$ . Дані кожного дослідів піддавалися статистичній обробці з метою відшукання грубих помилок, сумнівні результати перевірялися за допомогою  $t$ -критерію Стьюдента. Сумнівний результат ( $y_i$ ) тимчасово виключали з вибірки. За даними, що залишилися, розраховували середнє арифметичне ( $y_{\text{сер}}$ ) та оцінку дисперсії ( $S^2$ ) [8, 9].

Для переходу від натуральних до нормалізованих позначень факторів використовувалися такі співвідношення:

$$\begin{aligned} x_1 &= (l - 30) / 20; \quad x_2 = (G - 65) / 25; \\ x_3 &= (q - 75) / 25. \end{aligned} \quad (1)$$

З метою зменшення системних похибок під час проведення дослідів використовували метод рандомізації, який полягає у встановленні випадкової послідовності проведення експериментів.

Кількість дослідів визначали за формулою

$$N = 2^m + 2m, \quad (2)$$

де  $m$  — кількість змінних факторів.

$$N = 2^3 + 2 \cdot 3 = 14. \quad (3)$$

Кількість дослідів приймали рівною 14.

Необхідну кількість спостережень у кожному досліді експерименту визначали за формулою

$$N = t^2 V^2 / p^2, \quad (4)$$

де  $t$  — табличне значення  $t$ -критерію Стьюдента;  $V$  — коефіцієнт варіації, %;  $p$  — показник точності, %.

Кількість спостережень у кожному досліді була 6.

Рівняння регресії, яке можна отримати в результаті реалізації планів другого порядку, тобто планів, за допомогою яких можна отримати математичний опис об'єктів у вигляді поліному другого порядку, має такий вигляд:

$$\begin{aligned} y &= b_0 + \sum_{i=1}^k b_i x_i + \sum_{i=1}^k b_{ii} x_i^2 + \\ &+ \sum_{i,j=1}^k b_{ij} x_i x_j, \end{aligned} \quad (5)$$

**Таблиця 1. Рівні та інтервали змінювання факторів**

Фактор	Позначення фактора		Рівні змінювання фактора			Інтервал змінювання фактора
	натуральне	нормалізоване	(-1)	(0)	(+1)	
Розміри частинок деревини, мм	$l$	$x_1$	10	30	50	20
Кількість повітря, $\text{м}^3/\text{год}$	$G$	$x_2$	40	65	90	25
Кількість палива в реакторі газогенератора, %	$q$	$x_3$	50	75	100	25

де  $b$  — коефіцієнти рівняння регресії;  $x$  — змінні фактори;  $k$  — кількість змінних факторів.

Точність, об'єктивність, надійність визначення дійсного значення вимірюваної характеристики та, відповідно, правильність усіх подальших висновків залежить від того, наскільки правильно будуть оброблені експериментальні результати.

Після обробки експериментальних даних та отримання рівняння регресії робили їх статистичний аналіз. При цьому вирішували два основних завдання: оцінювали значимість коефіцієнтів регресії та перевіряли адекватність математичної моделі.

Матриця планування у натуральних та нормалізованих значеннях факторів для соснової деревини наведена у табл. 2.

### Результати досліджень термічної переробки низькосортних палив на газоподібне паливо

Проведено розрахунок коефіцієнтів регресії  $b_{ij}$ , критерію Кохрена  $G_p$  та критерію Фішера  $F_p$  [8, 10] для соснової деревини. В результаті реалізації В<sub>3</sub>-плану отримано математичний опис об'єкту у вигляді поліному другого порядку, який має такий вигляд:

$$\begin{aligned} Q_{\text{сосна}} &= -1,5562 + 0,2726 l + 0,11256 G + \\ &+ 0,06772 q - 0,00375 l^2 - 0,000832 G^2 - \\ &- 0,000432 q^2 - 0,00004 l G - \\ &- 0,00002 l q + 0,000032 G q. \end{aligned} \quad (6)$$

Було виконано раціоналізацію отриманої залежності з метою визначення значень факторів, що забезпечують максимальне значення функції. Для розв'язання поставленої задачі використовували програму Microsoft Excel, далі сервіс «Пошук рішення», метод пошуку — метод Ньютона [8, 11].

Для переходу від нормалізованих до натуральних позначень факторів використовувалися такі співвідношення:

Таблиця 2. Результати розрахунку В<sub>3</sub>-плану для соснової деревини

№.№ з/п	Матриця планування експеримента						Результати реалізації експеримента		
	$x_1$	$x_2$	$x_3$	розмір частинок деревини, мм	кількість повітря, нм <sup>3</sup> /год	кількість палива в реакторі газо- генератора, %	$y_{сер}$	S <sup>2</sup>	$y^P$
1	-1	-1	-1	10	40	50	6,375	0,026832	6,32424
2	1	-1	-1	50	40	50	8,124	0,026218	8,11390
3	-1	1	-1	10	90	50	6,597	0,029938	6,61218
4	1	1	-1	50	90	50	8,315	0,020869	8,31174
5	-1	-1	1	10	40	100	6,490	0,023851	6,50244
6	1	-1	1	50	40	100	8,271	0,036050	8,26520
7	-1	1	1	10	90	100	6,865	0,032795	6,88428
8	1	1	1	50	90	100	8,497	0,019663	8,55694
9	-1	0	0	10	65	75	7,343	0,032659	7,36774
10	1	0	0	50	65	75	9,119	0,022941	9,09890
11	0	-1	0	30	40	75	8,995	0,024494	9,06990
12	0	1	0	30	90	75	9,430	0,029495	9,35974
13	0	0	-1	30	65	50	9,289	0,021773	9,35872
14	0	0	1	30	65	100	9,636	0,032773	9,57042

$$l = 20 x_1 + 30; G = 25 x_2 + 65;$$

$$q = 25 x_3 + 75, \quad (7)$$

де  $x_i$  – натуральне значення фактора.

Аналогічний розрахунок коефіцієнтів регресії  $b_{ij}$ , критерію Кохрена  $G_p$  та критерію Фішера  $F_p$  проведено для березової деревини. Реалізувавши трирівневий В<sub>3</sub>-план, отримали математичний опис об'єкту у вигляді поліному другого порядку:

$$Q_{береза} = -1,1256 + 0,2721 l + 0,10928 G +$$

$$+ 0,06428 q - 0,00375 l^2 - 0,000816 G^2 -$$

$$- 0,000416 q^2 - 0,00004 l G - 0,00002 l q +$$

$$+ 0,000048 G q. \quad (8)$$

Також проведено розрахунок коефіцієнтів регресії  $b_{ij}$ , критерію Кохрена  $G_p$  та критерію Фішера  $F_p$  для вербової деревини. У результаті реалізації В<sub>3</sub>-плану отримано математичний опис об'єкту у вигляді поліному другого порядку:

$$Q_{верба} = -1,279 + 0,2712 l + 0,1116 G +$$

$$+ 0,05796 q - 0,00375 l^2 - 0,0008 G^2 -$$

$$- 0,000368 q^2 - 0,00008 l G + 0,00002 l q +$$

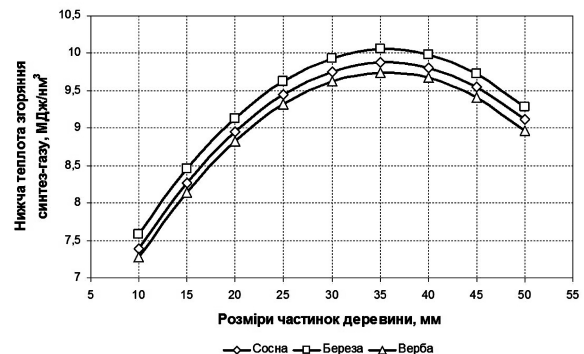
$$+ 0,000016 G q. \quad (9)$$

На основі одержаних рівнянь регресії побудовані залежності нижчої теплоти згоряння синтез-газу від розмірів подрібненої деревини, визначеної за рівняннями регресії, із заданими значеннями кількості повітря  $G = 70$  нм<sup>3</sup>/год

та кількості деревини в реакторі газогенератора  $q = 80$  % для деревини сосни, верби, берези.

Процес газифікації деревини відбувається практично однаково для досліджуваних порід деревини. Вплив цих порід деревини на теплоту згоряння синтез-газу під час газифікації є незначним та коливається у межах 0,6 МДж/нм<sup>3</sup> (рисунок). Отже немає доцільності газифікувати деревину певної породи окремо.

Використання газогенераторів запропонованої конструкції, як показали дослідження, дає змогу підвищити ефективність роботи збільшенням швидкості та інтенсивності процесу газифікації подрібненої деревини. Це досягається завдяки тому, що гази, які утворилися під час газифікації, повторно проходять через шар розжареного палива у зоні окислення та відновлення, де при високих температурах йде ге-



Залежності теплоти згоряння синтез-газу від розмірів подрібненої деревини, визначеної за рівняннями регресії, із заданими значеннями кількості повітря ( $G = 70$  нм<sup>3</sup>/год) та кількості деревини у реакторі газогенератора ( $q = 80$  %) для досліджуваних порід деревини.

терогенна реакція відновлення діоксиду вуглецю, тобто  $C + CO_2 \rightarrow 2 CO$ , та утворюється горючий складник синтез-газу — оксид вуглецю. Якщо у зоні відновлення є водяна пара, то при високій температурі йде реакція її конверсії, тобто  $C + H_2O \rightarrow CO + H_2$  та  $CO + H_2O \rightarrow CO_2 + H_2$ . У даному випадку утворюється другий горючий складник синтез-газу — водень [12]. Таким чином, за рахунок значного вмісту оксиду вуглецю та водню у синтез-газі нижча теплота згорання є відносно високою.

### Висновки

Визначено вплив розмірів частинок подрібненої деревини ( $l$ ), кількості повітря ( $G$ ) та кількості палива ( $q$ ), яке подається в камеру газифікації, на нижчу теплоту згорання синтез-газу ( $Q$ ) для досліджуваних порід деревини. У результаті реалізації В3-плану отримано математичний опис об'єкту у вигляді поліному другого порядку для кожної з порід деревини.

Одержані рівняння регресії можуть бути основою для проведення досліджуваного процесу та раціонального керування ним. Маючи рівняння залежності вхідних факторів від вихідного параметра, можна прогнозувати всі можливі значення параметра оцінки досліджуваного процесу при будь-яких значеннях факторів, що знаходяться між верхнім та нижнім рівнями.

Виконавши раціоналізацію рівняння регресії для досліджуваних порід деревини, отримали значення вхідних параметрів, при яких нижча теплота згорання ( $Q$ ) досягає максимуму коли  $l = 36$  мм,  $G = 69$  нм<sup>3</sup>/год,  $q = 80$  %:  $Q_{\text{сосна}} = 9,9$  МДж/нм<sup>3</sup>,  $Q_{\text{береза}} = 10$  МДж/нм<sup>3</sup>,  $Q_{\text{верба}} = 9,7$  МДж/нм<sup>3</sup>.

### Список літератури

1. Лис С.С. Обзор технологий газификации древесины // Научный вестник НЛТУ Украины : зб. наук.-техн. пр. — Львів : РВВ НЛТУ України, 2009. — Вип. 19.12. — С. 101–105.
2. Железная Т.А., Гелетуха Г.Г. Обзор современных технологий газификации биомассы // Промышленная теплотехника. — 2006. — № 2. — С. 61–74.
3. Гелетуха Г.Г., Железная Т.А. Обзор современных технологий сжигания древесины для выработки тепла и электроэнергии // Оборудование и инструмент для профессионалов. — 2005. — № 3. — С. 64–68.
4. Brown Robert C. Thermochemical processing of biomass : conversion into fuels, chemicals and power (wiley series in renewable resource). — John Wiley & Sons Ltd., UK, 2011. — 348 p.
5. Basu Prabir. Biomass gasification and pyrolysis : Practical design. — Academic Press is an imprint of Elsevier, USA, 2010. — 376 p.
6. De Souza-Santos Marcio L. Solid fuels combustion and gasification : modeling, simulation, and equipment operations (Second edition) / Marcio L. de Souza-Santos // CRC Press Taylor & Francis Group, USA. — 2010. — 508 p.
7. Пат. України на корис. модель 38952, МКП С 10 J 3/00. Газогенератор / С.С.Лис, Й.С.Бадера, Я.М.Гнатишин. — Опубл. 26.01.2009, Бюл. № 2.
8. Пилипчук М.І., Григор'єв А.С., Шостак В.В. Основи наукових досліджень. — Львів : Знання, 2007. — 234 с.
9. Лис С.С., Мисак Й.С. Термічна переробка деревини методом суцільного шару в газоподібне паливо // Східно-Європейський журнал передових технологій. — 2012. — № 3/8 (57). — С. 47–49.
10. Лис С.С. Аналіз експериментальних досліджень газогенератора з суцільним шаром // Науковий вісник НЛТУ України : зб. наук.-техн. пр. — Львів : РВВ НЛТУ України, 2010. — Вип. 20.7. — С. 64–68.
11. Лис С.С., Мисак Й.С. Фізико-хімічна модель процесу газифікації деревини // Вісник інженерної академії України. — 2012. — Вип. 2. — С. 301–304.
12. Лис С.С., Мисак Й.С. Вплив вологості деревини на процес газифікації деревини методом суцільного шару // Східно-Європейський журнал передових технологій. — 2012. — № 4/8 (58). — С. 4–6.

Надійшла до редакції 18.11.17

**Мысак И.С.**, докт. техн. наук, проф., **Лыс С.С.**, канд. техн. наук  
**Национальный университет «Львовская политехника», Львов**  
ул. С. Бандеры, 12, 79013 Львов, Украина, e-mail: lysss@ukr.net

## Исследование процесса газификации древесной биомассы в сплошном слое

Технология газификации древесной биомассы является актуальной задачей, решение которой позволит создать экологически чистый источник энергии, являющийся альтернативой сжиганию ископаемых топлив и газификации угля. Она позволяет решить проблемы экологической утилизации промышленных и бытовых отходов древесины, получения дешевой энергии и улучшения экологического состояния окружающей среды. На основе анализа теоретических положений и экспериментальных исследований доказана возможность переделывания древесины во время газификации в газогенераторе со сплошным слоем в газообразное топливо с низшей теплотворной способностью в 1,5 раза больше, чем у газообразного топлива, полученного другими известными газогенераторами такого типа. По результатам экспериментальных исследований получены регрессионные зависимости теплоты сгорания синтез-газа во время газификации низкосортных топлив от фракционного состава топлива, количества воздуха, высоты слоя топлива. Полученные уравнения регрессии могут быть основой для проведения исследуемого процесса и рационального управления им. Имея уравнение зависимости входных факторов от исходного параметра, можно прогнозировать все возможные значения параметра оценки исследуемого процесса при любых значениях факторов, которые находятся между верхним и нижним уровнями. *Библ. 12, рис. 1, табл. 2.*

**Ключевые слова:** древесная биомасса, низшая теплота сгорания, синтез-газ, газификация, регрессионные зависимости.

**Mysak Yo.S.**, Doctor of Technical Sciences, Professor,  
**Lys S.S.**, Candidate of Technical Sciences  
**Lviv Polytechnic National University, Lviv**  
12, Stepan Bandera Str., 79013 Lviv, Ukraine, e-mail: Lysss@ukr.net

## Research of the Gasification Process of Wood Biomass in a Continuous Layer

The gasification technology of wood biomass is an essential problem whose solution will create clean energy as an alternative combustion of fossil fuels and coal gasification. It also can solve the problems of the ecological utilization of industrial and household waste as well as of obtaining cheap energy and improving industrial effects for the environment. The analysis of the theoretical provisions and experimental tests has proved the possibility of processing wood during its gasification in a gas generator with a continuous layer; it is processed into gaseous fuel with the lower calorific value being 1.5 times higher in comparison with the calorific value of the gaseous fuel that is produced by other known gas generators of this type. The experimental results have specified the regression dependence of heat that is produced by burning the synthesis gas during the gasification of low-grade fuel on the fractional composition of the fuel, the amount of air, and the fuel layer height. The resulting regression equations can be the basis for implementing the studied process and its rational management. The equations of the input factors' dependence on the original setting make it possible to determine every possible parameter of assessing the process under study at any value of the factors between the upper and lower levels. *Bibl. 12, Fig. 1, Tab. 2.*

**Key words:** wood biomass, lower calorific value, synthesis gas (syngas), gasification, regression dependence.

## References

1. Lys S.S. (2009). Ohliad tekhnolohii hazyfikatsii derevyny. Naukovyi visnyk NLTU Ukrainy : zb. nauk.-tekhn. prats. Lviv : RVV NLTU Ukrainy, Iss. 19.12, pp. 101–105. (Ukr.)
2. Zheleznaya T.A., Geletuha G.G. (2006) Obzor sovremennyih tekhnologiy gazifikatsii biomassyi, *Promyshlennaya teplotekhnika*, No. 2, pp. 61–74. (Rus.)
3. Geletuha G.G., Zheleznaya T.A. (2005). Obzor sovremennyih tekhnologiy szhiganiya drevesinyi dlya vyirabotki tepla i elektroenergii, *Oborudovanie i instrument dlya professionalov*, No. 3, pp. 64–68. (Rus.)
4. Brown Robert C. (2011). Thermochemical processing of biomass : conversion into fuels, chemicals and power (wiley series in renewable resource)/ John Wiley & Sons Ltd., UK, 348.
5. Basu Prabir. (2010). Biomass gasification and pyrolysis : practical design. Press is an imprint of Elsevier, USA, 376 p.
6. De Souza-Santos Marcio L. (2010). Solid fuels combustion and gasification : modeling, simulation, and equipment operations (Second edition). CRC Press Taylor & Francis Group, USA, 508 p.
7. Lys S.S., Badera Y.S., Hnatyshyn Ya.M. (2009). Hazohenerator, Patent Ukrayiny na korysnu model 38952, MKP C 10 J 3/00, Vlasnyk : NLTU Ukrayiny, Bull. 2. (Ukr.)
8. Pylypchuk M.I., Hryhoryev A.S., Shostak V.V. Osnovy naukovykh doslidzhen', Lviv : Znannya, 2007, 234 p. (Ukr.)
9. Lys S.S., Mysak Y.S.. Termichna pererobka derevyny metodom sutsil'noho sharu v hazopodibne palyvo. Skhidno-Yevropeys'kyi zhurnal peredovykh tekhnolohiy. 2012, (3/8), pp. 47–49. (Ukr.)
10. Lys S.S. (2010). Analiz eksperymentalnykh doslidzhen hazohenerатора z sutsilnym sharom. Naukovyi visnyk NLTU Ukrainy : zb. nauk.-tekhn. prats. Lviv : RVV NLTU Ukrainy, Iss. 20.7, pp. 64–68. (Ukr.)
11. Lys S.S., Mysak Y.S. (2012). Fyzyko-khimichna model protsesu hazyfikatsii derevyny, *Visnyk inzhenernoi akademii Ukrainy*, Iss. 2, pp. 301–304. (Ukr.)
12. Lys S.S., Mysak Y.S. (2012). Vplyv volohosti derevyny na protses hazyfikatsii derevyny metodom sutsilnoho sharu. Skhidno-levropeyskyi zhurnal peredovykh tekhnolohii, 4/8 (58), 4–6. (Ukr.)

Received November 18, 2017

УДК 621.182.4

**Мисак Й.С.<sup>1</sup>**, докт. техн. наук, проф., **Федоришин В.С.<sup>2</sup>**,  
**Мисак С.Й.<sup>2</sup>**, **Коваленко Т.П.<sup>1</sup>**, канд. хім. наук, **Ханас О.О.<sup>2</sup>**

<sup>1</sup> Національний університет «Львівська політехніка», Львів

вул. С. Бандери, 12, 79013, Львів, Україна, e-mail: kovalenkotaniy@gmail.com

<sup>2</sup> ПрАТ «ЛьвівОРГРЕС», Львів

вул. Тютюнників, 55, 79011, Львів, Україна, e-mail: s.mysak750@gmail.com

## Дослідження експлуатаційного парохімічного очищення котла ТГМП-344А Мінської ТЕЦ-4

Розроблено інженерами ПрАТ «ЛьвівОРГРЕС» та реалізовано на виробництві парохімічний метод очищення внутрішніх поверхонь екранних труб котла ТГМП-344А Мінської ТЕЦ-4. Представлено методики та етапи його проведення. Наведено принципову схему експлуатаційного парохімічного очищення котла ТГМП-344А та її опис. Подано перелік приладів для контролю параметрів циркуляції та парової продувки. Зведено у таблицю хімічні речовини, використані для проведення парохімічного очищення. Наведено порівняльні результати забруднень поверхонь нагріву котла до та після проведення парохімічного очищення. Показано, що застосування парохімічного очищення котла забезпечує значне зниження утворення нових відкладень на внутрішніх поверхнях екранних труб котла. Після застосування даної технології очищення з пароводяного тракту котла видалено 94 % відкладень порівняно з початковою забрудненістю та 3464 кг заліза у перерахунку на Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>. *Бібл. 6, рис. 1, табл. 2.*

**Ключові слова:** парохімічне очищення, екранні труби, поверхні нагріву, котел, теплоелектроцентрально.