

УДК 621.314:662.76.034:536.72

С.В.Клюс (Інститут відновлюваної енергетики НАН України, Київ)

## Експериментальні дослідження процесів енерготехнологічного перетворення біомаси в реакторах щільного шару палива

*В статті наведено результати експериментальних досліджень процесів енерготехнологічного перетворення основних видів твердої біомаси в горючий газ і біовугілля в реакторах щільного шару палива з рухомою зоною газифікації. Визначено обмеження щодо параметрів газифікації біопалива та розраховано параметри процесу газифікації.*

**Ключові слова:** біомаса, експериментальна установка, рухома зона газифікації, параметри процесу.

*В статье приведены результаты экспериментальных исследований процессов энерготехнологического преобразования основных видов твердой биомассы в горючий газ и биоуголь в реакторах плотного слоя топлива с подвижной зоной газификации. Определены ограничения относительно параметров газификации биотоплива и рассчитаны параметры процесса газификации.*

**Ключевые слова:** биомасса, экспериментальная установка, подвижная зона газификации, параметры процесса.

**Вступ.** Перспективним напрямком підвищення ефективності перетворення біомаси в горючий газ і біовугілля є удосконалення технології енерготехнологічного перетворення дрібнодисперсного палива у реакторах щільного шару з рухомою зоною газифікації. Ця технологія має принципові відмінності від класичної шарової газифікації, яка полягає в тому, що шляхом зміни режимних параметрів є можливою реалізація як повної, так і часткової газифікації палива (окиснювальної карбонізації). Технологію газифікації з рухомою реакційною зоною вперше було реалізовано в 1996 р. під керівництвом С.Р.Ісламова на дослідно-промисловому рівні при переробці бурого вугілля [1]. Подальшого розвитку технологія газифікації з рухомою реакційною зоною набула в Національній металургійній академії України під керівництвом проф. М.В.Губинського та в Інституті газу НАН України під керівництвом академіка І.М.Карпа [2, 3].

**Мета роботи.** Завдання експериментальних досліджень полягає у встановленні основних закономірностей процесів енерготехнологічного перетворення твердої біомаси в реакторах з рухомою зоною газифікації в умовах, які відповідають реально можливим технологічним режимам її термічної конверсії.

**Визначення характеристик дослідженого**

**біопалива.** Реакції газогенераторного процесу переважно гетерогенні, тобто відбуваються на поверхні палива. При зменшенні розміру частинок палива перебіг процесу газифікації відбувається швидше внаслідок збільшення реакційної здатності частинок (поверхні контакту палива з газами).

Роль розмірів частинок палива можна простежити за критерієм  $Bi$ , який поряд із критерієм Фур'є визначає теплообмін у нестационарному тепловому потоці:

$$Bi = \frac{\alpha \cdot d}{\lambda} = \left( \frac{d}{\lambda} \right) / \left( \frac{1}{\alpha} \right),$$

де  $\alpha$  – сумарний коефіцієнт тепловіддачі від газів до палива;  $d$  – діаметр частинки палива;  $\lambda$  – коефіцієнт теплопровідності частинок палива.

Як відомо з теорії теплопередачі, чисельник являє собою "внутрішній" тепловий опір частинок палива, знаменник – "зовнішній" тепловий опір у просторі між частинками палива. Таким чином, критерій  $Bi$  – це відношення "внутрішнього" опору до "зовнішнього". Для малих частинок критерій  $Bi$  незначний, а зі збільшенням розміру частинок він збільшується. При значеннях  $Bi \leq 0,25$  тепловим опором частинок можна знехтувати. Оскільки коефіцієнт  $\lambda$  близький до сталого, а коефіцієнт  $\alpha$  незначно змінюється, то в критерії  $Bi$  визначальним чинником буде розмір частинок палива. Чим менший їх розмір, тим

інтенсивніше відбувається теплообмін. Позитивний вплив збільшення "зовнішньої" поверхні палива підтверджено дослідями низки вчених. Досліди М.В.Канторова [4] вказують на покращення складу газу зі зменшенням розмірів частинок палива, що відбувається внаслідок вторинних реакцій; при збільшенні зовнішньої поверхні швидше витрачається кисень, а кількість CO, що згоряє у міжчастковому просторі, зменшується, що приводить до збільшення CO в газі. При газифікації та згорянні частинка палива має бути якомога меншою, але зі зменшенням розміру частинок збільшується гідравлічний опір шару палива, зростає винос часток із димовими газами.

Експериментально встановлено, що різке збільшення гідравлічного опору дає шар палива, який складається з частинок діаметром менше 5 мм. Тому нижню межу розмірів частинок палива доцільно мати більшою, ніж 5 мм. Верхня межа розмірів частинок вибирається такою, щоб паливо за своїм ситовим складом було по можливості однорідним. Практично доцільною межею вважається подвоєний нижній розмір частинок палива.

Газопроникність шару палива в газогенераторі визначається початковим розподіленням газових потоків при вході в реакційну зону шару палива. Деякий вплив на розподілення дуття по перерізу шахти спричиняють також стінки газогенератора внаслідок підвищення порозності та

зниження температури палива біля стінок. Підвищена порозність пристінкових шарів веде до збільшення швидкостей газів на цих ділянках. При врахуванні впливу цього фактора велике значення має відношення діаметра газогенератора до розміру частинок палива, яке, за деякими даними, рекомендується більшим, ніж 20 разів [4]. Виходячи з цього положення, для газогенератора діаметром 123 мм розмір частинок палива має бути таким:

$$\text{Ø } 123 \text{ мм} / 20 \leq 6,15 \text{ мм.}$$

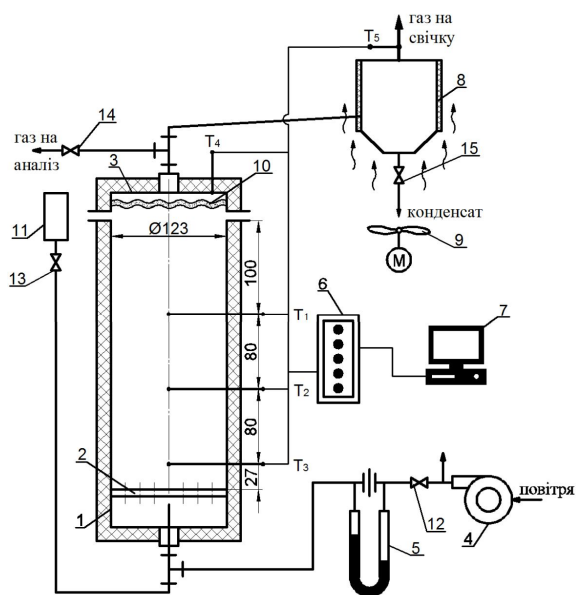
Тому при підборі видів біомаси і подрібненні її на частинки переважно дотримувалися зазначеної рекомендації. З урахуванням того, що паливо являє собою неоднорідну масу, визначалися середньозважені технічні характеристики. Вологість палива визначалася згідно з ГОСТ 27314, зольність – згідно з ГОСТ 11022, насипна щільність – згідно з ГОСТ 32987. В таблиці 1 наведено перелік видів дослідженого біопалива.

**Розроблення експериментальної установки з реактором із титану.** Для проведення досліджень енерготехнологічного перетворення біомаси було створено експериментальну установку, схему якої наведено на рис. 1.

Установка складається з вертикального реактора шахтного типу, виготовленого із товстостінної титанової труби. Реактор теплоізолюваний двома шарами базальтового утеплювача та базальтовою тканиною БТ-13.

Таблиця 1. Види та характеристики дослідженого біопалива

№ п/п	Вид біопалива, розміри		Вологість, $W^r$ , %	Зольність, $A^d$ , %	Насипна щільність палива, $\rho$ , кг/м <sup>3</sup>
1.	Деревина	Кубики соснові, $\square 8$ мм	6,8	0,33	262
2.		Пелети деревинні, $\text{Ø}8$ мм	14,2	1,33	587
3.		Кубики березові, $\square 8$ мм	45,0	0,4	505
4.		Кубики березові, $\square 8$ мм	7,7	0,4	290
5.		Стружка, $0,2 \times 7 \times 12$ мм	9,3	0,37	105
6.	Енергетичні рослини	Зрізки верби кущової, $\text{Ø}6$ мм, $l = 8$ мм	9,6	3,51	274
7.		Тріска верби кущової, $2 \times 5 \times 12$ мм	47,5	1,42	520
8.	Рослинні відходи	Стебла кукурудзи, $0,6 \times 4 \times 7$ мм	8,3	2,50	48
9.		Стебла соняшника, $1 \times 6 \times 10$ мм	9,3	2,05	112
10.		Лушпиння гречки, $\text{Ø}5$ мм, $\delta = 0,5$ мм	8,70	0,32	262



**Рис. 1.** Схема експериментальної установки: 1 – реактор; 2 – колосникова решітка; 3 – кришка реактора; 4 – повітродувка; 5 – дифманометр; 6 – вимірювач температури; 7 – комп’ютер; 8 – холодильник-конденсатор; 9 – вентилятор; 10 – фільтр високотемпературний; 11 – бак для води; 12 – засувка повітряна; 13 – засувка водяна; 14 – засувка для відбору газу; 15 – кран дренажний;  $T_1$ - $T_3$  – термомари ХА.

В корпусі реактора радіально до його осі встановлені три термомари  $T_1$ - $T_3$  типу ХА. Для контролю температури газу у верхній частині реактора і після його охолодження в холодильнику-конденсаторі нижче точки роси водяної пари встановлено термомари  $T_4$  і  $T_5$ . Термомари підключалися до пристрою контролю і регулювання температури ПКРТ-0103 на 8 каналів вимірювання. Запис показників температури здійснювався на комп’ютері. В якості повітродувки використовувався пилосос типу "Буран", необхідну кількість повітря плавно регулювали засувкою Ду 15, а надлишок викидався в атмосферу. Витрати повітря визначали за допомогою дифманометра, який попередньо був протарований на повіреному газовому лічильнику.

Холодильник-конденсатор являє собою пластикову прозору ємність об’ємом 20 л, у якій відбувається охолодження горючого газу нижче точки роси водяної пари і випадіння конденсату. Холодильник-конденсатор розміщувався на відкритому повітрі. Надійне охолодження газу в зимовий період забезпечувалося низькою температурою навколишнього повітря. В літній час на

холодильник-конденсатор намотувалася бавовняна тканина, яка під час експериментів зволожувалася і обдувалася потоком повітря від вентилятора. Конденсат зливався через дренажний кран, а його маса визначалася на електронних вагах з точністю до 1 г. Під кришкою реактора розміщувався високотемпературний фільтр зі скловолкна для очищення горючого газу від легкого вуглецю та смол.

**Методика проведення експериментів.** На першому етапі експериментів необхідно було відпрацювати технологію розпалювання палива в реакторі, який розміщувався у приміщенні лабораторії. Як показали результати попередніх досліджень [2, 5, 6], форма фронту теплової хвилі визначається рівномірністю розпалювання палива. В роботах [1, 7] буре вугілля розпалювали дровами та електротермічним нагрівом. Біомасу в роботах [2, 3] розпалювали смолоскипами і електротермічним нагрівом.

Наші спроби розпалити біопаливо смолоскипом призвели до задимленості лабораторії і тому були відхилені. Електротермічне нагрівання в реакторі малого діаметра надто складно здійснити. Тому було запропоновано розпалювати паливо за допомогою розпеченого деревного вугілля. Для цього порція вугілля 30-60 г нагрівалася до 500-600°C у муфельній печі.

**Послідовність запуску установки.** На колосникову решітку реактора насипався шар  $\approx 2,0$  см шамотної крихти для рівномірного розподілу повітря дуття. Попередньо зважене паливо завантажувалося в реактор. На паливо рівномірним шаром висотою 1-2 см висипалося розпечене деревне вугілля. Включалася подача повітря в реактор на задану величину під колосникову решітку. Реактор закривався кришкою, в якій попередньо був встановлений високотемпературний фільтр. Кришка і реактор ущільнювалися зволоженим азбестовим шнуром. Внаслідок нагрівання палива розпеченим деревним вугіллям виділялися легкі гази, частина яких згоряла, утворюючи фронт горіння, а інша частина у вигляді парогазової суміші поступала на охолодження в холодильнику-конденсатор, а потім – на свічку. Після закінчення процесу газифікації палива та охолодження реактора відбувалося зважування вугілля,

конденсату і фільтра. Виконувався технічний аналіз проб вугілля.

В кожному експерименті вимірювалися такі параметри:

- маса завантаженого палива;
- маса деревного вугілля для розпалювання;
- маса отриманого вугілля;
- маса конденсату;
- маса леткого вуглецю на фільтрі;
- питомі витрати повітря дуття;
- температури в реакторі і температура отриманого газу.

**Визначення обмежень щодо параметрів газифікації біопалива.** На першому етапі експериментальних досліджень визначали можливість газифікації свіжозрубаної деревини, неоднорідного палива низької насипної щільності та граничні питомі витрати повітря дуття.

*Визначення граничної вологості палива для газифікації.* Для газифікації деревинного і рослинного палива високої вологості кількість водяної пари має вирішальне значення, аж до неможливості газифікувати це паливо. Кількість хімічної води, яка утворюється під час термічного розкладу біопалива, достатня для перебігу реакцій водяного газу. Таким чином, вся гігроскопічна волога, яка входить до складу робочого палива, є баластом. Вона поглинає теплоту під час нагрівання та випаровування і таким чином порушує процес газифікації.

В класичних газогенераторах щільного шару для стійкого перебігу процесу газифікації рекомендується така вологість палива [8–10]:

- газогенератори оберненого процесу:  $W^r \leq 20\%$ ;
- газогенератори прямого процесу:  $W^r \leq 35\%$ .

В той час вологість свіжозрубаної деревини становить [11]:

- хвойні породи:  $W^r = 54-61\%$ ;
- м'які листяні породи:  $W^r = 45-53\%$ ;
- тверді листяні породи:  $W^r = 35-41\%$ .

Для визначення можливості газифікації вологої свіжозрубаної деревини в реакторах з рухомою зоною газифікації були заготовлені тріски з верби кущової в період інтенсивного весняного сокоруху з вологістю  $W^r=47,5\%$ , а також кубики

берези в період формування листяної крони,  $W^r=45,0\%$ .

Розглянемо процес газифікації трісок верби. Вологі тріски завантажувались у реактор. Зважаючи на максимальну вологість палива, спочатку було прийнято високу питому витрату повітря дуття  $q=107,3 \text{ м}^3/(\text{м}^2 \cdot \text{год})$ . Проте паливо загорілося, утворилася рухома зона газифікації і температурний фронт у реакторі встановився на рівні  $740-1000^\circ\text{C}$ . Причому для обмеження росту температури понад  $1000^\circ\text{C}$  наприкінці процесу довелося зменшувати подачу повітря дуття. В наступних експериментах питома витрата повітря дуття поступово зменшувалася до  $38,3 \text{ м}^3/(\text{м}^2 \cdot \text{год})$ , проте процес газифікації відбувався стабільно, і температура в реакторі не опускалась нижче  $520^\circ\text{C}$ . Таким чином було встановлено можливість газифікації біопалива з максимальною природною вологістю.

*Визначення можливості газифікації неоднорідного палива низької насипної щільності.* Після встановлення можливості газифікації свіжозрубаної деревини необхідно було визначити можливість газифікації неоднорідного за розмірами палива низької насипної щільності. Для цього бралися два види палива: стружка деревини листяних порід і подрібнені стебла кукурудзи з листям (табл. 1).

Спочатку було проведено три серії дослідів зі стружкою при  $q=32,5-63,3 \text{ м}^3/(\text{м}^2 \cdot \text{год})$ . Стружка в реактор засипалась вільно, ущільнювалась вібраційними коливаннями і утрамбовувалась, внаслідок чого завантажувана маса збільшувалася на  $60\%$ .

У всіх дослідах процес відбувався нестабільно. На початку процесу стрімко піднялась температура газу у верхній частині реактора  $T_4$ , потім стрімко піднялась температура  $T_3$  біля колосникової решітки, випередивши при цьому температури  $T_1$  і  $T_2$  у верхньому і середньому шарах палива.

Після завершення процесу газифікації і зняття кришки в паливі біля стінки реактора було виявлено глибокий канал до колосникової решітки. Утворення каналу свідчить про наявність у шарі палива зони з низьким гідравлічним опором, по якій рухалася зона газифікації, тобто в каналі відбулася повна газифікація палива, а в решті об'єму палива – часткова газифікація.

Результати проведених дослідів засвідчили, що в неоднорідному біопаливі низької насипної щільності зона газифікації нестабільна внаслідок високої порозності та утворення в реакторі зон палива з різним гідравлічним опором. Для вирівнювання гідравлічного опору шару палива зазначені види палив рекомендується подрібнювати до фракції 3-5 мм або гранулювати.

*Визначення граничних питомих витрат повітря дуття.* Управління процесами газифікації в газогенераторах щільного шару здійснюється шляхом регулювання кількості окиснювача, що надходить у газогенератор. У більшості випадків як окиснювач використовують атмосферне повітря із вмістом кисню приблизно 21%. Для вибраних нами палив необхідно було визначити робочий діапазон витрат повітря дуття, в межах якого відбувався стійкий рух зони газифікації, а температура в реакторі не перевищувала 1000°C. Обмеження щодо температури пов'язані з термостійкістю матеріалів реактора і термопар, а також із розм'якшенням і плавкістю золи палива. Розм'якшення і плавкість порушують роботу колосникових решіток, які розраховані на просипання золи у твердому вигляді.

В роботі [7] зазначається, що при низьких витратах потік повітря не гарантує необхідного тепловиділення, а при високих – зриває полум'я і виносить все тепло, тому процес затухає. В роботі [1] при переробці бурого вугілля рекомендується реалізація таких економічно доцільних режимів дуття:

- 72-180 м<sup>3</sup>/(м<sup>2</sup>·год) – для виробництва коксу;
- 360-468 м<sup>3</sup>/(м<sup>2</sup>·год) – для виробництва горючого газу.

В роботі [2] встановлено, що стабільний процес піролізу дрібнодисперсної біомаси (лущиння соняшнику і шкаралупи волоського горіха) забезпечувався питомими витратами повітря кількістю 25-55 м<sup>3</sup>/(м<sup>2</sup>·год).

Дані щодо витрат дуття для вибраних нами палив відсутні. Тому було досліджено діапазон питомих витрат дуття від 27,5 до 179 м<sup>3</sup>/(м<sup>2</sup>·год). В дослідженому діапазоні дуття процес газифікації здійснювався стабільно як для сухих, так і для вологих палив. На рис. 2 наведено типову картину динаміки профілів температури в реакторі для кубиків із сосни.

Таким чином, за результатами попередніх дослідів визначено такі параметри та обмеження для проведення основних дослідів:

- розмір фракції палива має не перевищувати 6 мм;
- допускається газифікація біопалива з природною вологістю до 47,5%;
- питомі витрати повітря дуття – в межах від 27,5 до 179 м<sup>3</sup>/(м<sup>2</sup>·год);
- паливо має бути однорідним за розмірами та гідравлічним опором;
- для розпалювання палива слід використовувати розпечене біовугілля;
- для високотемпературного очищення газу від смоли в кришці реактора необхідно встановити фільтр із волокнистої скловати.

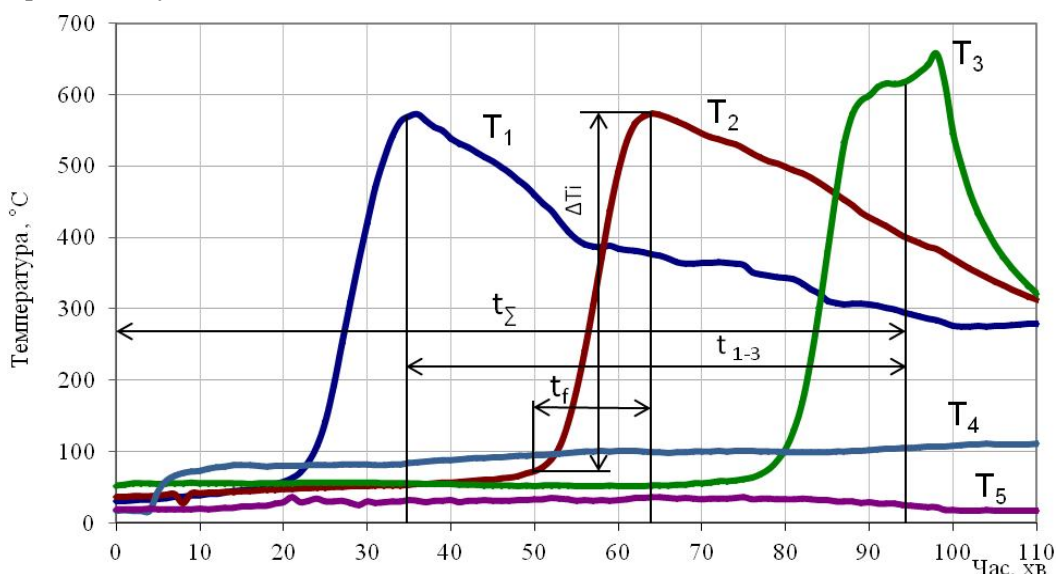


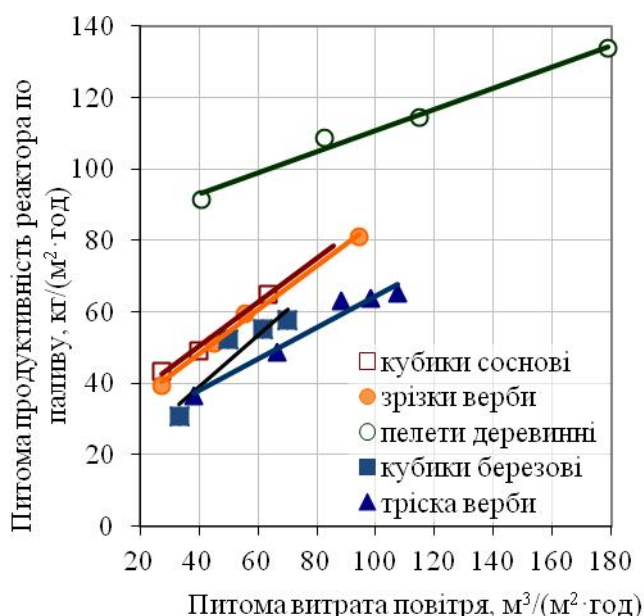
Рис. 2. Типова картина динаміки профілів температури в реакторі (кубики соснові,  $W^r=6,8\%$ ,  $q=27,5$  м<sup>3</sup>/(м<sup>2</sup>·год)).

**Розрахунок технологічних параметрів процесу.** *Питома продуктивність реактора по паливу.* Питома продуктивність реактора – одна з головних характеристик технологічного процесу. Цей параметр є характерним упродовж всього часу проведення експерименту, починаючи від розпалювання шару палива до зупинки дуття. Питома продуктивність визначається за формулою:

$$P_i = \frac{m_{\text{пал}}}{A \cdot t_{\Sigma}}, \frac{\text{КГ}}{\text{М}^2 \cdot \text{ГОД}}, \quad (1)$$

де  $m_{\text{пал}}$  – маса палива, завантаженого в реактор, кг;  $A$  – площа перерізу реактора,  $\text{м}^2$ ;  $t_{\Sigma}$  – тривалість процесу газифікації, год (рис. 3).

На рис. 3 відображена продуктивність реактора по паливу.



**Рис. 3.** Залежність продуктивності реактора по паливу від витрат повітря.

Як видно з рис. 3, питома продуктивність реактора по паливу прямо пропорційно залежить від питомих витрат повітря дуття для всіх досліджених видів палива. Експериментальні дані для подрібнених палив (кубики соснові, кубики березові, зрізки верби), які близькі за розміром, але відрізняються вологістю, практично лягають на одну пряму лінію. Продуктивність процесу на вологих трісках верби суттєво менша, ніж на сухих вербових зрізках, що пояснюється більшою тривалістю часу, необхідного для випаровування

вологи. Продуктивність реактора на деревинних пелетах більша, ніж на подрібненій деревині. Цей факт пояснюється більшою насипною щільністю пелет і тим, що пелети складаються з дрібної тирси, а зі зменшенням розміру частинок палива збільшується його реакційна активність, що приводить до прискорення процесу. Таким чином, для досліджених палив визначено питому продуктивність реактора по паливу, яка коливалась у межах 36,5-133,6 кг/(м²·год).

*Швидкість руху зони газифікації.* Питома продуктивність реактора залежить від насипної щільності палива, а також швидкості руху зони газифікації. Чим більша швидкість руху зони газифікації, тим більша і продуктивність реактора. У цій роботі швидкість руху зони газифікації розраховувалась за експериментальними даними за формулою:

$$U_f = \frac{60 \cdot X_{1-3}}{t_{1-3}}, \frac{\text{СМ}}{\text{ГОД}}, \quad (2)$$

де  $X_{1-3}$  = 16 см – відстань між крайніми термопарами  $T_1$  і  $T_3$  (рис. 1);  $t_{1-3}$  – час проходження тепловою хвилею відстані між термопарами  $T_1$  і  $T_3$ , хв.

Так, наприклад, при  $t_{1-3} = 62$  хв (рис. 2)  $U_f = 15,5$  см/год.

Швидкість руху зони газифікації залежить від багатьох чинників: вологості та розміру фракції палива, зольності, питомих витрат повітря дуття, температури в реакторі. В цій роботі швидкість руху зони газифікації визначали після встановлення в реакторі сталого температурного режиму.

Вважаємо, що на ділянці від верхнього шару палива до термопар  $T_1$  ( $\approx 10$  см) утворювався сталий температурний фронт. За даними інших дослідників [2, 7] сталий температурний фронт утворювався на ділянці палива висотою 10-15 см, але для інших способів розпалювання та інших палив. Цей фронт горіння легких речовин проходив послідовно термопару  $T_2$  і завершувався на колосниковій решітці, біля якої розміщена термопара  $T_3$ . Час проходження тепловою хвилею  $t_{1-3}$  відстані між крайніми термопарами визначався за піками температур на графіках (рис. 2).

На рис. 4 наведено графіки залежності швидкості руху зони газифікації від витрат повітря, з яких видно, що найменша швидкість зони газифікації (9,2-16,6 см/год) відзначалась для вологих трісок верби, а найбільша швидкість зони газифікації (15,5-34,2 см/год) – для соснових кубиків.

Зменшення вологості у зрізках верби до 9,6% приводить до збільшення швидкості руху зони газифікації майже вдвічі у порівнянні з трісками вологістю 47,5%. У паливах, які близькі між собою за розмірами частинок, вологістю та насипною щільністю (кубики соснові та зрізки верби), відзначається різна швидкість руху зони газифікації, особливо при збільшенні витрат повітря дуття. Більшу швидкість руху зони газифікації у кубиках соснових можна пояснити різним складом речовин палива, а також наявністю кори на зрізках верби. Менша швидкість руху зони газифікації в пелетах деревинних у порівнянні з кубиками сосновими пояснюється високою насипною щільністю пелет, яка удвічі більша, ніж соснових кубиків. Відповідно для карбонізації більшої кількості палива потрібно більше часу. Необхідно зазначити, що експериментальні дані щодо швидкості руху зони газифікації для деревинних пелет близькі за значенням до даних щодо швидкості руху зони газифікації для шкаралупи волоського горіха, отриманих у роботі [2].

На рис. 5 наведені результати вимірів температури у фронті зони газифікації в залежності від витрат повітря для двох видів палив: зрізок верби і кубиків березових. Як видно з графіків для сухих палив, при збільшенні витрат повітря середня температура у фронті зони газифікації збільшується внаслідок виділення і згоряння більшої кількості летких речовин. Для вологих палив при збільшенні витрат повітря також збільшується мінімальна температура у фронті зони газифікації, а максимальна температура, яка встановлюється в кінці процесу, практично була стабільною і становила для кубиків березових приблизно 800°C, а для трісок верби – 1000°C.

*Висота фронту руху зони газифікації.* Висоту фронту визначаємо за формулою:

$$\delta_f = \frac{U_f}{60} \cdot t_f, \text{ см}, \quad (3)$$

де  $t_f$  – час прогрівання шару палива від початкової температури до максимальної, хв (рис. 2).

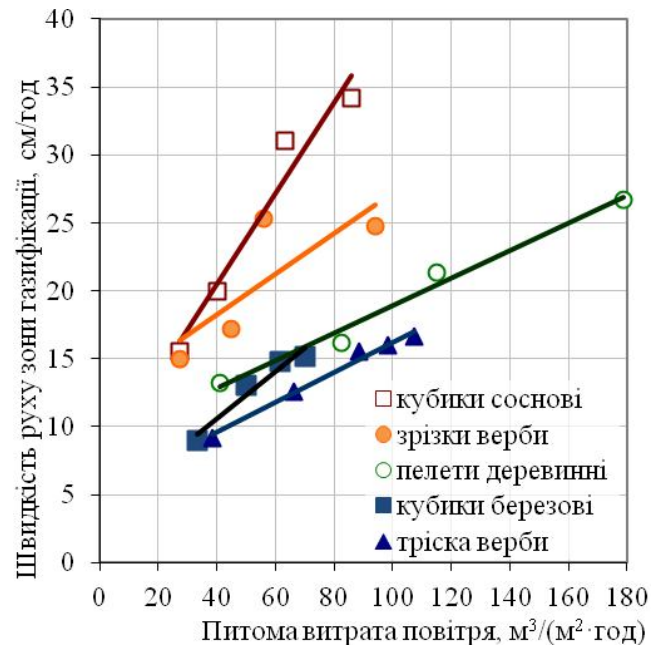


Рис. 4. Залежність швидкості руху зони газифікації від витрат повітря.

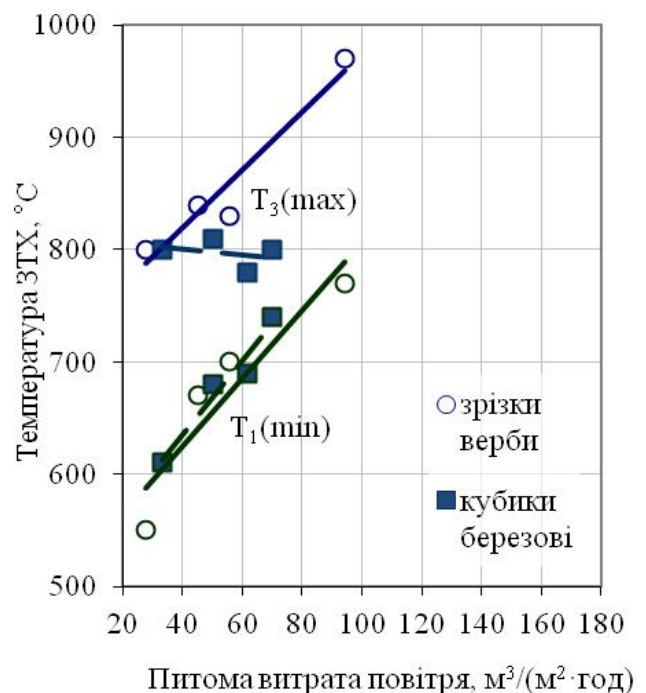


Рис. 5. Залежність температури зони газифікації від витрат повітря.

Так, наприклад, із рис. 3 знаходимо:  $t_f \approx 14$  хв. Тоді при значенні  $U_f = 15,5$  см/год

$$\delta_f = \frac{15,5}{60} \cdot 14 = 3,6 \text{ см}.$$

Поділимо висоту фронту  $\delta_f = 36$  мм на розмір частинок палива 8 мм і отримаємо, що висота фронту охоплює приблизно 4,5 розмірів фракції палива.

*Швидкість нагрівання шару палива.* Швидкість нагрівання шару палива визначаємо за формулою:

$$U_m = \frac{\Delta T_i}{t_f}, \frac{^\circ\text{C}}{\text{хв}}, \quad (4)$$

де  $\Delta T_i$  – різниця температур нагрівання шару палива від початкової до максимальної, визначається біля кожної термопари. Так, наприклад, із рис. 3 знаходимо:  $\Delta T_i \approx 500^\circ\text{C}$ .

$$\text{Тоді } U_m = \frac{500^\circ\text{C}}{14\text{хв}} = 35,7 \frac{\text{град}}{\text{хв}}.$$

Як видно з рис. 2, із просуванням теплової хвилі швидкість нагрівання шару палива збільшується внаслідок прогрівання палива.

Необхідно зазначити, що параметри  $\delta_f$  і  $U_T$  мають оціночний характер та є похідними величинами від керованих параметрів процесу, таких як питома витрата повітря, вид, розмір і вологість фракції палива.

**Висновки.** Проведено експериментальні дослідження енерготехнологічної переробки деревини, енергетичних рослин та рослинних відходів у горючий газ і біовугілля, що дало змогу отримати нові дані щодо параметрів процесу конверсії біомаси. Так, вперше визначено можливість газифікації деревини з вологістю до 47,5% у щільному шарі палива з рухомою зоною газифікації, а також розширено діапазон питомих витрат повітря дуття ( $27,5\text{--}179 \text{ м}^3/(\text{м}^2 \cdot \text{год})$ ), у межах якого відбувається стабільний процес газифікації біомаси. Для досліджених видів палива питома продуктивність реактора по паливу становила  $36,5\text{--}133,6 \text{ кг}/(\text{м}^2 \cdot \text{год})$ , а швидкість руху зони газифікації –  $9,2\text{--}50,5 \text{ см}/\text{год}$ . Планується наступний етап досліджень для визначення кількісного виходу і якісного складу горючого

газу, біовугілля та напрямків їх використання.

1. *Исламов С.Р.* Энергоэффективное использование бурых углей на основе концепции "Термокок": автореф. дисс. Энергоэффективное использование бурых углей на основе концепции "Термокок", докт. техн. наук 05.14.04:Исламов С. Р.: Сибирский федеральный университет. Красноярск. 2010 – 32 с.

2. *Кремнева К.В.* Підвищення ефективності двостадійного процесу газифікації дрібнодисперсної біомаси для когенераційних установок малої потужності: автореф. дис. Підвищення ефективності двостадійного процесу газифікації дрібнодисперсної біомаси для когенераційних установок малої потужності, канд. техн. наук 05.14.06:Кремнева К. В.: Національна металургійна академія України, Дніпропетровськ, 2015. – 21 с.

3. *Карп И.Н.* Исследование и внедрение процессов газификации углей и биомассы с целью замещения природного газа/ И. Н. Карп, Е.П. Марцевой, К.Е. Пьяных, Т.А. Антошук, К.К. Пьяных // Энерготехнологии и ресурсосбережение – 2014. – №4 – С. 3–11.

4. *Канторов М.В.* Газогенераторы и газогенераторные станции в металлургической промышленности – Свердловск. Металургиздат, 1958 – 467 с.

5. *Губинский М.В.* Исследование процесса термоокислительного пиролиза биомассы в плотном слое/ М.В. Губинский, Е.В. Кремнева, Ю.В. Шишко, Г.Л. Шевченко, А.Ю. Усенко// Сб. научн. тр. НМет АУ. – Днепропетровск: "ПП Грек О.С.", 2007. – С. 130–136.

6. *Шевченко Г.Л.* Візуалізація процесу фільтраційного горіння у щільному шарі біомаси/ Г.Л. Шевченко, Ю.В. Шишко, С.М. Губинський та ін. // Інтегровані технології та енергозбереження. – 2009. – №2. – С. 127–129.

7. *Гроо А.А.* Интенсификация процессов тепло- и массообмена при слоевой газификации угля с использованием обратного дутья: автореф. дис. Интенсификация процессов тепло- и массообмена при слоевой газификации угля с использованием обратного дутья, канд. техн. наук 05.14.14: Гроо А. А.: Институт теплофизики им. С.С. Кутателадзе СО РАН. Новосибирск. 2007 – 20 с.

8. *Лямин В.А.* Газификация древесины / Лямин В.А. – М.: Лесная промышленность, 1967. – 262 с.

9. *Токарев Г.Г.* Газогенераторные автомобили / Токарев Г.Г. – М.: Машгиз, 1958. – 206 с.

10. *Мезин И.С.* Транспортные газогенераторы/ Мезин И.С. – М.: Сельхозгиз, 1948 – 341 с.

11. *Юдушкин Н.Г., Атрамонов М.Д.* Газогенераторные тракторы. Теория, конструкция и расчет. – М.: Машгиз, 1955 – 243 с.