

УДК 662.76

Гелетуха Г.Г., Жовмір М.М., Желєзна Т.А., Зубенко В.І.

Институт технічної теплофізики НАН України

ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНЕ ДОСЛІДЖЕННЯ ШВИДКОГО ПІРОЛІЗУ БІОМАСИ В АБЛЯЦІЙНОМУ ШНЕКОВОМУ РЕАКТОРІ

Розглянуто результати експериментального дослідження процесу швидкого піролізу деревної біомаси в абляційному реакторі шнекового типу. Проведено порівняння характеристик отриманого піропалива (біонафти) та рідких продуктів інших відомих технологій швидкого піролізу біомаси. Визначено можливі заходи щодо вдосконалення технології.

Рассмотрены результаты экспериментального исследования процесса быстрого пиролиза древесной биомассы в абляционном реакторе шнекового типа. Проведено сравнение характеристик полученного пиротоплива (бионефти) и жидких продуктов других известных технологий быстрого пиролиза биомассы. Намечены возможные мероприятия по усовершенствованию технологии.

The paper presents results of experiments on fast pyrolysis of biomass in the ablative screw reactor. Properties of the obtained bio-oil are compared with those of liquid products from other known biomass fast pyrolysis technologies. Possible measures for the technology improvement are outlined.

Ключові слова: швидкий піроліз, біомаса, піропаливо, біонафта, шнековий реактор.

Технологія швидкого піролізу пропонує ефективний спосіб отримання рідкого палива з біомаси, який за оцінками Міжнародного енергетичного агентства є на сьогодні одним з найдешевших. Піроліз являє собою процес термічного розкладання органічних сполук без доступу кисню і відбувається при відносно низьких температурах (500...900 °С) у порівнянні з процесами горіння (900...2000 °С) і газифікації (800...1300 °С).

Основною особливістю швидкого піролізу в порівнянні із традиційним, або повільним, є дуже висока швидкість нагрівання часток сировини і швидке охолодження проміжних продуктів. Швидкий піроліз використовується для одержання максимальної кількості газу або рідини в залежності від встановленої температури процесу. Низькотемпературний швидкий піроліз (450...600 °С) дозволяє максимізувати частку рідкого продукту. При більш високих температурах процесу (650...900 °С) основним продуктом є газ.

Рідину, що утворюється в процесі піролізу, називають піропаливо або біонафта. Необроблене піропаливо є густою чорною смолянистою рідиною, вихід якої може досягати 70 % від маси сухої сировини. Вона близька за своїм елементним складом до біомаси, має трохи більшу теплоту згорання і являє собою складну суміш високоокислених вуглеводнів з істотним вмістом води.

Піропаливо має набагато більшу енергетичну щільність у порівнянні з вихідною сировиною, що дає йому перевагу при транспортуванні і зберіганні. Без попередньої обробки воно може використовуватись в якості замітника котельного палива, а після спеціальних заходів з підвищення якості – в газотурбінних і дизельних двигунах як моторне паливо.

Технології швидкого піролізу можна класифікувати наступним чином: абляційний піроліз, піроліз у киплячому шарі, у циркулюючому киплячому шарі, у двох реакторах киплячого шару та піроліз в потоці. Огляди дослідницьких, демонстраційних та комерційних установок швидкого піролізу біомаси, що існують в світі, наведено в роботах [1-3].

Мета даної роботи полягає в розробці та експериментальному дослідженні процесу низькотемпературного абляційного піролізу біомаси. На сьогоднішній день відомі чотири типи абляційних реакторів: пластинчатий, конусний, вихровий та шнековий. В першому основним елементом є обертові лопатки, що притискають біомасу до гарячої поверхні; в другому – конструкція з двох конусів – нерухомого та обертового; у вихровому реакторі частинки біомаси під дією відцентрової сили з великою швидкістю вдаряються об гарячу стінку. Четвертий тип реактору – з конічним шнеком – розроблено в

Інституті технічної теплофізики НАН України. Конструкція реактора захищена деклараційним патентом України [4].

При абляційному піролізі теплопередача відбувається у процесі прямого контакту твердих частинок біомаси із нагрітою поверхнею реактора. Тепло передається поперек тонкої плівки рідкого продукту. Абляційний піроліз у порівнянні з іншими видами швидкого піролізу має дві додаткові особливості: висока швидкість руху частинок біомаси відносно нагрітої поверхні реактора ($> 1,2$ м/с) і високий тиск, прикладений до частинок ($> 0,5$ МПа), що приводить до значних швидкостей абляції (> 1 мм/с) [5].

Практична реалізація процесу абляційного піролізу, як і інших видів швидкого піролізу, вимагає вирішення ряду технічних проблем, які добре відомі з літератури. Ці проблеми пов'язані з такими аспектами як попередня сушка та обробка сировини, розмір частинок біомаси, конструкція реактора та спосіб його нагріву, температура та спосіб теплопередачі в зоні реакції, час перебування продуктів піролізу в паровій фазі, вторинний крекінг первинних продуктів, очистка рідкого продукту від частинок вуглистої речовини, уловлювання та збір піропалива [6]. Зазначені питання були враховані фахівцями ІТТФ НАН України при конструюванні лабораторної установки.

В Інституті технічної теплофізики НАН України створено першу в Україні установку швидкого піролізу біомаси і вперше отримано зразки піропалива (біонафти). В основу установки покладено абляційний реактор оригінальної конструкції – з конічним шнеком.

Принципову схему експериментальної установки представлено на рис. 1. Її основними елементами є абляційний реактор шнекового типу 1, шнековий живильник біомаси з бункером 4, циклон 11 для очищення парогазоподібних продуктів піролізу від твердих частинок, скруббер 12 для конденсації біонафти, бак 13 для збору біонафти та свіча 22 для відводу піролізних газів до атмосфери.

Абляційний реактор має такі розміри: довжина корпусу 660 мм, зовнішній діаметр корпусу 51 мм, довжина шнека 713 мм, зовнішній діаметр шнека 25 мм. Шнек реактора виконано однозахідним, при цьому висота профілю на вході становить 0,2 діаметра шнека (5 мм), а на

виході – 3 мм. Внутрішня поверхня корпусу реактора має ребра вздовж осі в області завантаження біомаси. Це дозволяє матеріалу пересуватися по осі, а не обертатися разом зі шнеком. В зоні виходу з робочої ділянки внутрішня поверхня корпусу реактора є гладкою. Шнек відшліфований. Частота його обертання становить 200-600 хв⁻¹, що забезпечує колову швидкість до 1 м/сек і швидкість поздовжнього переміщення частинок біомаси – до 1 м/сек.

На зовнішній поверхні реактора розташований електричний нагрівач потужністю 2,2 кВт. Управління нагрівачем реактора здійснюється за сигналом термопари, що закарбована на зовнішній поверхні корпусу реактора, та мікропроцесорного регулятора температури. Максимальна температура реактора, яку може забезпечити нагрівач, становить 600 °С. Для запобігання втрат тепла в навколишнє середовище корпус реактора покрито теплоізоляційними матеріалами.

Шнек реактора приводиться в дію за допомогою електродвигуна змінного струму та редуктора. Живлення електродвигуна здійснюється струмом частотою від 10 до 57,5 Гц за допомогою силового перетворювача частоти, що дозволяє змінювати швидкість переміщення часток біомаси відносно корпусу реактора.

Вихід реактора з'єднано з циклоном перепускним трубопроводом. Циклон оснащений патрубком для видалення твердих фракцій вуглистою залишку. На зовнішній поверхні перехідного трубопроводу та циклона встановлено охоронні електричні нагрівачі, які дозволяють підтримувати температуру цих елементів установки на рівні 400 °С та запобігти передчасній конденсації піропалива. Управління охоронними нагрівачами здійснюється за сигналами термопар, які закарбовані у металеві стінки перехідного трубопроводу і циліндричної частини циклона, та мікропроцесорних регуляторів температури.

Система конденсації виконана одноступеневою і включає бак піропалива, з'єднаний зі скруббером, патрубок для відведення піропалива, насос, регулювальні вентилі. Піропаливо збиралось в бак, звідки частина його зливалась через трубопровід, оснащений вентилем, а інша частина поверталась до скрубера за допомогою насо-

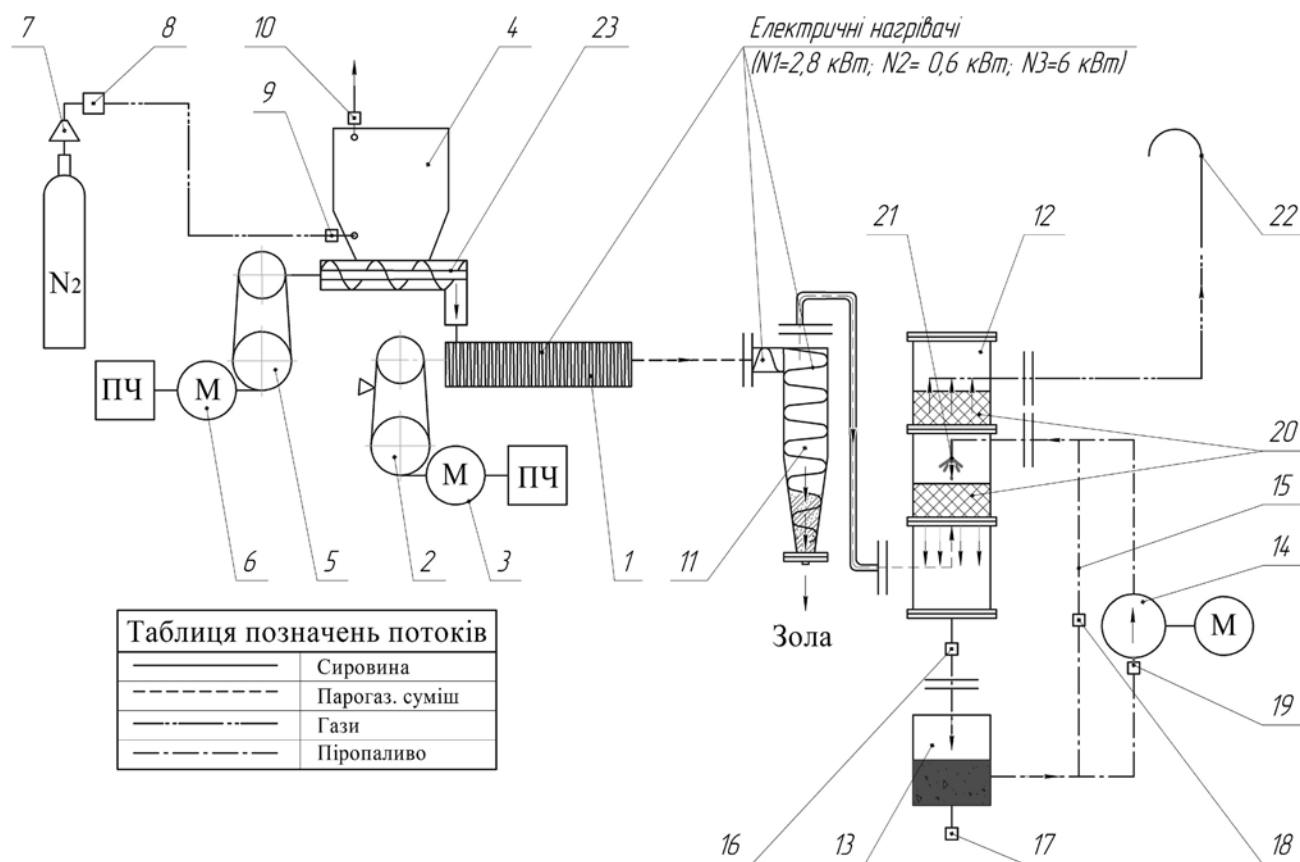


Рис. 1. Технологічна схема лабораторної установки швидкого піролізу біомаси:

1 – абляційний реактор з конічним шнеком; 2, 5 – клиноремінні передачі приводів шнеків, відповідно, абляційного реактора та живильника; 3 – електродвигун; 4 – шнековий живильник біомаси з бункером; 6 – мотор-редуктор; 7 – газовий редуктор; 8 – регулятор витрати азоту; 9, 10 – крани; 11 – циклон; 12 – скруббер; 13 – бак для збору біонафти; 14 – насос; 15 – байпас; 16-19 – вентилі запірні; 20 – кільця Рашига; 21 – форсунка; 22 – свіча.

су. При пусках установки для зрошення скрубера використовувалась допоміжна пускова рідина – дизельне паливо. В процесі роботи установки піропаливо поступово накопичується в нижній частині бака і починає циркулювати через скруббер.

Газовий тракт установки включає систему подачі азоту та систему трубопроводів, що поєднують скруббер зі свічею, через яку піролізні газу відводяться до атмосфери.

Експерименти з швидкого піролізу проводилися на деревній тирсі з фракцією 0,5...0,7 мм та 0,7...1,0 мм. Попередні дослідження показали, що робота системи подачі палива на цих фракціях була найбільш стабільною, а при використанні більших фракцій (1,0...1,6 мм) спостерігалось зависання тирси в бункері.

Порядок проведення експериментів наступ-

ний. Мілко подрібнену біомасу зважували (наважка 2 кг) і завантажували в бункер, який герметично закривали з метою уникнення витoku піролізних газів у зворотному напрямку та запобігання загазованості лабораторного приміщення. В нижній патрубку бункеру протягом 20...25 хвилин подавали азот з витратою 0,15 м³/год для продувки бункера та тракту від реактора до скрубера системи конденсації піропалива. Повітря з бункера витісняли азотом та виводили через верхній патрубок та свічу у навколишнє середовище. Після цього відміряли дизельне паливо (3 л) та заливали в накопичувальний бак.

Після завантаження палива в бункер, герметизації установки та продувки її азотом вмикали електричні нагрівачі реактора, перепускного трубопроводу між реактором та циклоном та

нагрівач циклона і розігрівали елементи установки до робочих температур, необхідних у даному експерименті. Регулювання температури реактора здійснювали по сигналах термопари, вмонтованої у зовнішню стінку реактора, і при цьому враховували перепади температур між зовнішньою та внутрішньою стінками залежно від розрахункової продуктивності установки. Значення уставки на регуляторі температури дорівнювали необхідній сумі температури реактора та розрахункового перепаду температур по товщині стінки реактора. В експериментах температуру зовнішньої стінки реактора підтримували на рівні 500 °С, температуру перепускного трубопроводу – 400 °С, циклона – 375 °С. Одночасно вмикали систему вимірювання та реєстрації температур, яка включає багатоканальний вимірювальний прилад та ПК.

Циркуляційний насос вмикали після виходу установки на необхідний температурний режим для подачі дизельного пального на зрошення скрубера.

У щиті управління на перетворювачах частот, що живлять електричні двигуни приводу шнека реактора та шнека подачі палива, встановлювали частоти струму, при яких досягались необхідні окружні швидкості відповідних шнеків, і потім вмикали їх приводи. Після вмикання привідного двигуна мотор-редуктора системи подачі палива спостерігали за пересипанням палива у реактор через оглядові віконця на паливному бункері.

Протягом експерименту біомаса шнековим живильником завантажується з бункера до розігрітого реактора і під дією конічного шнека реактора рухається в повздовжньому напрямі. Канали між валом шнеку та корпусом реактора поступово звужуються. В процесі просування через реактор частинки біомаси нагріваються і одночасно зазнають абляційного впливу (зносу) внаслідок притискання і тертя об корпус реактора. Ці два чинники, нагрів і абляційний знос, забезпечують реалізацію швидкого піролізу біомаси з утворенням газів/парів рідкого піропалива та часток вуглецевого залишку.

Парогазова суміш по перехідному трубопроводу надходить до циклону, де відбувається відділення твердих частинок вуглецю. Очищений газ поступає у скрубєр, де він зрошується

піролізною рідиною, охолоджуючись до температури 36...38 °С. При цьому відбувається конденсація піропалива з газу і його уловлення плівкою охолоджувальної рідини.

Ознакою закінчення певного експерименту було завершення висипання тирси із паливного бункера. Після цього виключали привідні двигуни системи подачі палива та реактора, нагрівачі реактора, перепускного трубопроводу та циклона і охолоджували установку. Циркуляційний насос скрубєра вимикали після зниження температури реактора до 100 °С.

Для збору та зважування залишку палива із паливного бункера розбирали з'єднання паливного бункера з реактором. Для збору та зважування вуглистою залишку відкривали лючок в нижній частині циклона і пересипали в сталеву ємність залишок із циклона. Отримане піропаливо зливали у мірний стакан із накопичувального бака через зливний кран і визначали його масу та об'єм.

За існуючих умов (періодичне блокування реактору злипою сировиною) на лабораторній установці було відпрацьовано процес швидкого піролізу деревної біомаси з отриманням зразків біонафти. Умови проведення деяких експериментів та отримані результати представлені в таблиці 1.

Отримана в результаті абляційного піролізу біонафта має жовто-коричневий колір в тонкій плівці на стінках колби, і від темно-коричневого до чорного – в об'ємі. Ця рідина не змішується з пусковим дизельним паливом, що є підтвердженням того, що це продукт саме швидкого піролізу. Зразок біонафти був направлений до спеціалізованої сертифікованої лабораторії для визначення її теплоти згорання за стандартною методикою для рідких палив. Встановлено що вища теплота згорання отриманого зразка біонафти складає 12,85 МДж/кг.

Порівняння основних характеристик біонафти, отриманої на установці ІТТФ НАН України з піропаливом, виробленим за іншими технологіями швидкого піролізу, представлено в таблиці 2. З даних таблиці видно, що густина піропалива установки Інституту технічної теплофізики повністю відповідає густині біонафти інших відомих технологій. Щодо теплоти згорання піропалива, то її значення є помітно

Табл. 1. Умови та результати вибраних експериментальних досліджень абляційного піролізу біомаси на лабораторній установці

Параметри	Розмірність	Номер експерименту	
		№1	№2
Умови:			
Температура зовнішньої поверхні реактора	ОС	500	500
Температура перепускного трубопроводу	ОС	400	400
Температура циклона	ОС	375	375
Витрата азоту для продувки	м ³ /год	0,15	0,10
Швидкість обертання шнеку	м/с	0,846	0,846
Розмір частинок сировини	мм	0,7...1	0,7...1
Час перебування частинок біомаси в реакторі	с	0,8	0,8
Вологість сировини	%	8,4	8,4
Час експерименту	хв.	25	35
Температура охолоджувальної рідини	ОС	32	36
Витрата охолоджувальної рідини	м ³ /год	0,18	0,18
Результати:			
Маса переробленої біомаси	кг	0,474	0,562
Маса вуглистої речовини	кг	0,072	0,0747
Вихід вуглистої речовини	% мас.	15,2	13,3
Маса біонафти	кг	0,127	0,060
Вихід біонафти	% мас.	26,8	10,7
Густина біонафти	кг/м ³	1156	1132,4
Вища теплота згорання біонафти	МДж/кг	12,85	не визначалося
Вихід газів та втрати (по балансу)	% мас.	58,0	76,0
Продуктивність установки по переробці біомаси	кг/год	1,138	0,963

нижчим. В якості робочої гіпотези можна припустити, що час перебування первинних продуктів піролізу в реакторі був надто довгий. Як наслідок, вони зазнавали вторинного піролізу з утворенням вуглецевої речовини, водяної пари та газоподібних речовин. В результаті цього отримане піропаливо містить велику кількість води, що зменшує його теплотворну здатність.

Вихід рідкого продукту при низькотемпературному швидкому піролізу біомаси зазвичай становить 55...70 % від маси сухої сировини. На установці ІТТФ НАНУ цей показник значно нижчий – максимум 27 %. Видається, що це можна пояснити тим фактом, що в процесі роботи шнекового реактора деякі частинки біомаси в ньому повністю не роздавлувалися.

Після експериментів у циклоні було знайдено обвуглені деревні частинки з розміром, близьким до розміру вихідних часток біомаси. Крім того, при розбиранні реактора виявлено відкладення смол на шнеку, що можна пояснити недостатньо ефективним видаленням паро- та газоподібних продуктів піролізу з реакційної зони. При роботі установки спостерігалось вибивання частини парогазової суміші через ущільнення на завантажувальному краю реактора, що свідчить про необхідність ретельного ущільнення реактора та, можливо, більшої подачі азоту.

Результати проведених експериментів було проаналізовано і намічено шляхи вдосконалення конструкції елементів установки для покращення показників її роботи.

Таблиця 2. Порівняльна характеристика піропалив різних технологій [1, 7, 8]

Тип установки	Густина піропалива, кг/м ³	Теплота згорання піропалива, МДж/кг
РТР-технологія (Канада) Два реактора з киплячим шаром	1160...1220	22,1...24,3*
Установка VTT (Фінляндія) Реактор з киплячим шаром	1240	17,2**
Установка Waterloo (Канада) Реактор з киплячим шаром	1190	16,3*
Установка GIT (США) Піроліз в потоці	1260	18,3*
Установка BTG-BTL (Нідерланди) Абляційний конусний реактор	1050...1250	16...19*
Установка NREL (США) Абляційний вихоровий реактор	1200	17,4**
ІТТФ НАНУ (Україна) Абляційний шнековий реактор	1130...1160	12,85*

* Вища теплота згорання. ** Нижча теплота згорання.

Висновки

1. Результати експериментів, проведених на установці швидкого піролізу ІТТФ НАН України, доводять принципову можливість отримання піропалива із застосуванням абляційного реактора з конічним шнеком.

2. Отримана біонафта має властивості, які підтверджують, що це продукт саме швидкого піролізу.

3. Для підвищення якості біонафти та збільшення обсягу її виходу елементи установки потребують подальшого вдосконалення. Перш за все, це стосується конструкції самих реактора та шнека. Можливий також пошук більш оптимальних температурних умов для реалізації процесу швидкого піролізу.

ЛІТЕРАТУРА

1. *Bridgwater A.V., Peacocke G.V.C.* Fast pyrolysis for biomass // *Renewable and Sustainable Energy Reviews.* – 2000, N 4, p. 1-73.

2. *Venderbosch R.H., Prins W.* Fast pyrolysis technology development // *Biofuels, Bioproducts and Biorefining.* – 2010, N 4, p.178-208.

3. *Железная Т.А., Гелетуха Г.Г.* Современные технологии получения жидкого топлива из биомассы быстрым пиролизом. Обзор. Часть 1. // *Промышленная теплотехника.* – 2005, Т. 27, № 4, С. 91-100.

4. *Деклараційний патент на винахід.* Гелетуха Георгій Георгійович, Варганов Іван Степанович. Установка абляційного піролізу. 15.12.2000, Бюл. № 7, 2000 р.

5. *Peacocke G.V.C., Bridgwater A.V.* Production of Liquids in High Yields by Ablative Fast Pyrolysis. Proc. of the 8th European Bioenergy Conference. Vienna, Austria, 3-5 October 1994, vol. 3, p.1749-1756.

6. *Bridgwater A.V.* Biomass Pyrolysis System Design. Proc. of the 8th European Bioenergy Conference. Vienna, Austria, 3-5 October 1994, vol. 2, p. 1591-1602.

7. *Oasmaa A., Czernik S.* Fuel oil quality of biomass pyrolysis oils – state of the art for the end users // *Energy & Fuels*, 13, 1999, p. 914-921.

8. *Bridgwater A.V.* Biomass Pyrolysis Technologies. Proc. of the 5th European Bioenergy Conference. Lisbon, Portugal, 9-13 October 1989, vol. 2, p. 489-496.

Получено 24.12.2012 г.