

УДК 662.76

Желізна Т.А., Гелетуха Г.Г., Зубенко В.І., Дроздова О.І.

Інститут технічної теплофізики НАН України

АНАЛІЗ РЕЖИМНИХ УМОВ НИЗЬКОТЕМПЕРАТУРНОГО
АБЛЯЦІЙНОГО ПІРОЛІЗУ БІОМАСИ

Розглянуто режимні умови, необхідні для реалізації низькотемпературного абляційного піролізу біомаси. Проаналізовано вплив основних режимних параметрів на вихід рідкого продукту швидкого піролізу. Показано комплексну залежність виходу піропалива від умов процесу.

Рассмотрены режимные условия, необходимые для реализации низкотемпературного абляционного пиролиза биомассы. Проанализировано влияние основных режимных параметров на выход жидкого продукта быстрого пиролиза. Показано комплексную зависимость выхода пироотплива от условий процесса.

The paper considers conditions, which are required for the realization of low temperature ablative pyrolysis of biomass. Influence of the main parameters on yield of the liquid product is analysed. Complex dependence of the bio-oil yield on the process conditions is shown.

e – товщина шару абляції;
 g – прискорення вільного падіння;
 k – коефіцієнт теплопередачі;

P – тиск;
 T – температура;
 V – швидкість абляції.

Швидкий піроліз біомаси є технологією термохімічної конверсії, яка дає можливість максимізувати вихід рідкого або газоподібного продукту в залежності від температури процесу. При низьких температурах (450...600 °C) основним продуктом є рідина, яку називають піропаливо або біонафта. Її обсяг може становити до 70 % маси сухої сировини. Високотемпературний швидкий піроліз (650...900 °C) дає максимальний вихід газу також до 70 % маси сухої сировини. Огляд сучасних технологій швидкого піролізу біомаси представлено в [1].

Абляційний піроліз є одним з видів швидкого піролізу біомаси. На сьогодні відомі такі види абляційних реакторів: пластинчатий, конусний, вихровий та шнековий. Опис деяких з них наведено в роботі [2].

При конструюванні реактору абляційного піролізу та розробці технологічної схеми установки необхідно, по-перше, забезпечити режимні параметри протікання процесу як такого і, по-друге, створити умови для високого виходу рідкого продукту.

Розглянемо типову схему абляційного піролізу біомаси (рис. 1), реалізовану на експериментальній установці авторами [3]. Деревні стержні діаметром 2...10 мм, вирізані вздовж

волокон, вертикально з силою притискаються до гарячого диску з нержавіючої сталі діаметром 7,5 см. Диск обертається зі швидкістю до

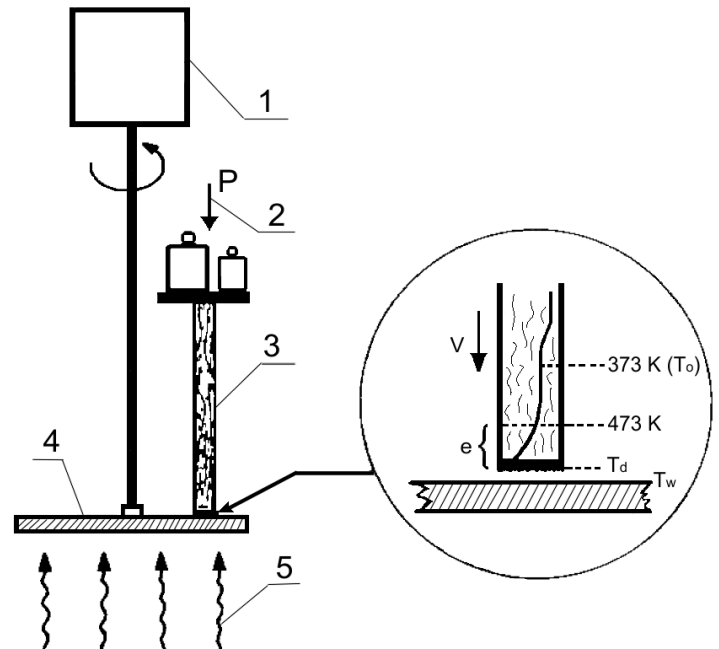


Рис. 1. Схема абляційного піролізу біомаси в пластинчатому реакторі [3]:
1 – електромотор; 2 – напрямок тиску на деревний стержень; 3 – деревний стержень; 4 – диск, що обертається; 5 – нагрів диску газовими пальниками.

3 м/с і нагрівається чотирма газовими паливниками. Температура робочої поверхні диску в експериментах коливалась в діапазоні 750...1200 К. Тиск, з яким біомаса притискалась до диску, змінювався від 0,15 МПа до 3 МПа.

Результати дослідження [3] показали, що реакція абляційного піролізу відбувається в дуже тонкому шарі матеріалу e (кілька мікрометрів) при постійній швидкості абляції V , що становить порядку кількох міліметрів в секунду (максимальне значення, зафіксоване в досліді – 30 мм/с). З ростом швидкості абляції товщина шару зменшується, при цьому добуток $V \cdot e$ залишається постійною величиною, рівною близько $0,8 \cdot 10^{-7}$ м/с.

При швидкості обертання диску нижче 1,5 м/с швидкість абляції значно більша для деревних стержнів малого діаметру (2...4 мм). При швидкості диску вище 1,5 м/с ця різниця різко зменшується і нею можна нехтувати.

Швидкість абляції збільшується з ростом тиску P по залежності, близькій до лінійної:

$$V = a \cdot P^\beta, \quad (1)$$

де a – коефіцієнт, який залежить від температури, β – коефіцієнт, значення якого є близьким до одиниці (табл. 1).

Якщо розглянути графік, на якому прямою апроксимовано експериментальні дані по залежності V/P від температури (рис. 2), то видно, що пряма перетинає вісь абсцис у точці $T_w = 739$ К. Це так звана температура «розкладання» деревини, при досягненні якої починається процес абляційного піролізу деревного стержня. Таким чином, в абляційному реакторі необхідно забезпечити температуру нагріву біомаси більше 739 К (466 °С).

Теплопередача між гарячою поверхнею диска та біомасою відбувається за рахунок

комбінації двох процесів: теплообміну при їх безпосередньому контакті та теплопередачі через тонку плівку рідкого продукту реакції (смоли). Реакція швидкого піролізу протікає у три етапи: нагрів деревини, розкладання з утворенням смол та випаровування смол з утворенням парогазової суміші.

Для практичної реалізації абляційного піролізу необхідно забезпечити високу щільність теплового потоку в зоні реакції – порядку 5 МВт/м². Оскільки плівка смол уповільнює процес нагріву біомаси від гарячої поверхні реактора, її треба ефективно видаляти з зони абляції.

Коефіцієнт теплопередачі k можна розрахувати по залежності від тиску:

$$k = 0,017 \cdot P. \quad (2)$$

В досліді [3] коефіцієнт теплопередачі коливався в діапазоні 2000...80000 Вт/(м²·К).

При низькотемпературному абляційному піролізі біомаси вихід піропалива становить 50...70% маси сухої сировини [3-8]. Оскільки низькотемпературний швидкий піроліз використовується саме для отримання максимального обсягу рідкого продукту (у порівнянні з газоподібними та твердими продуктами), необхідно розуміти, які режимні параметри і яким чином впливають на його вихід в такому процесі.

Вихід піропалива залежить від ряду факторів, таких як температура процесу, час існування парогазової суміші до початку її охолодження та температура цієї суміші. При цьому немає жорсткої залежності тільки від одного параметру – впливають всі параметри в комплексі, тобто їх співвідношення. Крім того, у різних температурних діапазонах вплив того чи іншого параметру може посилюватися або

Табл. 1. Значення показників a та β із залежності (1) [3]

Показник	Температура робочої поверхні диску T_w , К			
	873	973	1073	1173
β	0,993	0,997	1,010	0,982
$a, 10^{-9}$ м/(с·Па)	3,64	4,67	6,10	12,9

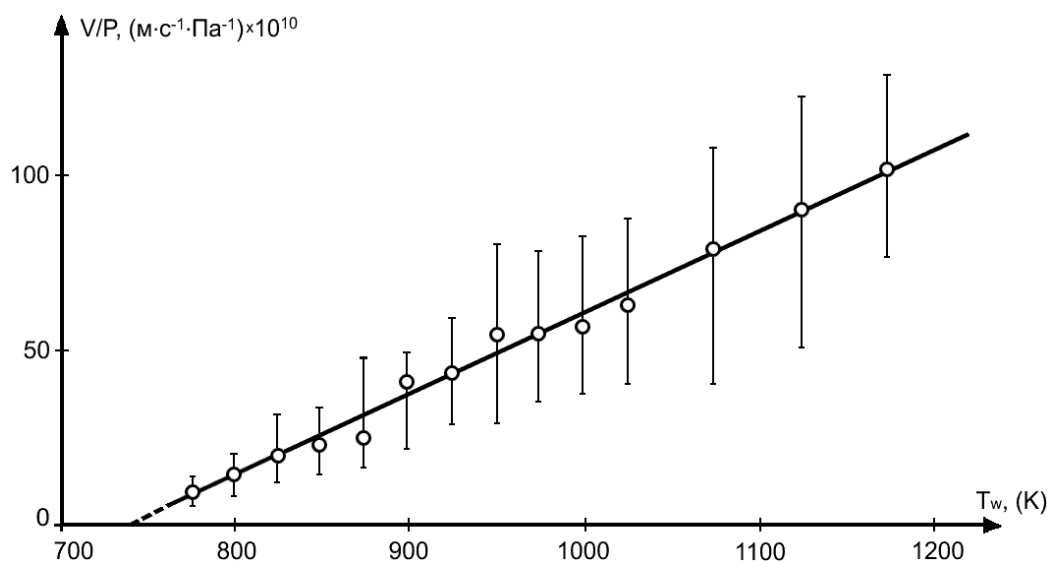


Рис. 2. Залежність відношення швидкості абляції/тиск від температури робочої поверхні реактору [3].

послаблюватися.

Розглянемо результати дослідження процесу абляційного піролізу біомаси у пластинчатому реакторі конструкції Астонського університету [4, 5]. Абляційний ефект досягається за допомогою чотирьох асиметрично розташованих лопаток, що обертаються зі швидкістю до 200 об/хв. Лопатки притискають частинки біомаси (деревини) до плоскої металеві поверхні, нагрітої до температури 500...600 °С (рис. 3). Використання обертових лопаток є ефективним способом швидкої абляції відносно великих часток біомаси (до 6 мм).

Для отримання максимальної кількості рідкого продукту час існування парогазової суміші має становити близько 2 секунд, але не більше 6 секунд. У разі часу існування > 6 секунд можливий вторинний крекінг продуктів піролізу, що призводить до помітного зниження обсягу піропалива.

Температура парогазової суміші, що утворюється в зоні реакції, має складати близько 400 °С. При збільшенні її температури посилюється тенденція до вторинного крекінгу продуктів піролізу, при зниженні – можлива вторинна конденсація, що викликає збільшення обсягу води в продуктах піролізу. Велика

кількість води є небажаною, оскільки погіршує якість отриманого піропалива.

Результати дослідження роботи установки наведено в табл. 2. Найбільший досягнутий вихід піропалива (без урахування води) становить 66,1 % (дослід CR10). Він відповідає такій комбінації режимних параметрів: температура робочої поверхні реактора – 602 °С, час існування парогазової суміші – 1,71 сек., температура парогазової суміші – 368 °С. Найменший вихід рідкого продукту (51,8%) відповідає часу існування парогазової суміші > 6 секунд (дослід CR06).

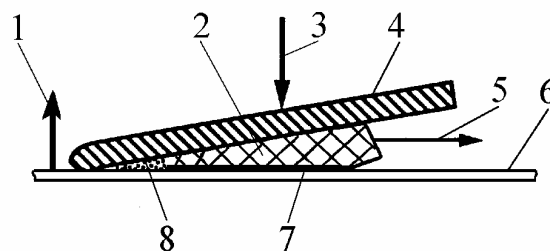


Рис. 3. Схема абляції частинки біомаси у пластинчатому реакторі [4]: 1 – парогазова суміш; 2 – частинка біомаси; 3 – напрям тиску; 4 – обертова лопатка; 5 – напрям переміщення частинки біомаси (відносна швидкість > 1,2 м/с); 6 – гаряча поверхня реактора; 7 – плівка смол; 8 – деревне вугілля.

Табл. 2. Результати дослідження роботи абляційного пластинчастого реактора [4, 5]

Параметри	Номер досліджу						
	CR13	CR25	CR07	CR11	CR06	CR10	CR27
Температура робочої поверхні реактора, °C	500	502	550	550	600	602	604
Температура парогазової суміші, °C	278	343	389	294	415	368	383
Час існування парогазової суміші, с	2,73	1,11	2,83	1,97	6,92	1,71	0,8
Вихід піропалива (без води), мас. %	56,6	62,1	58,1	55,7	51,8	66,1	56,8
Вихід води, мас. %	24,5	12,3	22,7	18,3	28,2	11,5	11,4
Вихід деревного вугілля, мас. %	12,2	13,0	14,3	13,8	14,8	15,7	16,9
Вихід газу, мас. %	12,9	11,2	9,0	8,2	10,4	6,2	11,4

Великий вихід води, 24,5 %, має місце при дуже низькій температурі парогазової суміші – 278 °C (дослід CR13). При цьому найбільша кількість води утворилася в досліді CR06, хоча температура парів/газів в ньому була найвищою – 415 °C. Це підтверджує тезу про відсутність жорсткої залежності виходу продуктів піролізу від якогось одного фактора, й існування залежності від комплексного співвідношення ключових режимних параметрів. Задача дослідника – знайти оптимальне співвідношення цих параметрів для роботи власної установки.

Вихід продуктів абляційного піролізу в залежності від умов процесу досліджувався також в роботі [6] на експериментальній установці з реактором вихрового типу. Подрібнена біомаса (солома, деревина) тангенціально завантажується до реактора (2) (рис. 4). Всередині реактора зі швидкістю 10000...20000 об/хв. обертається ротор з трьома по-вздовжніми ребрами, створюючи відцентрову силу у 4900...17000g. Під дією цієї сили частинки біомаси, рухаючись з великою швидкістю, вдаряються об гарячу стінку реактора.

Утворена парогазова суміш проходить через уловлювач вуглистої речовини (10), циклон (13) і потрапляє до охолоджувача (11), де її температура знижується до 55...65 °C при проходженні через шар біонафти, отриманої раніше. Близько 40 % рідкого продукту збирається з охолоджувача. Після цього піролізні пари додатково очищуються у тка-

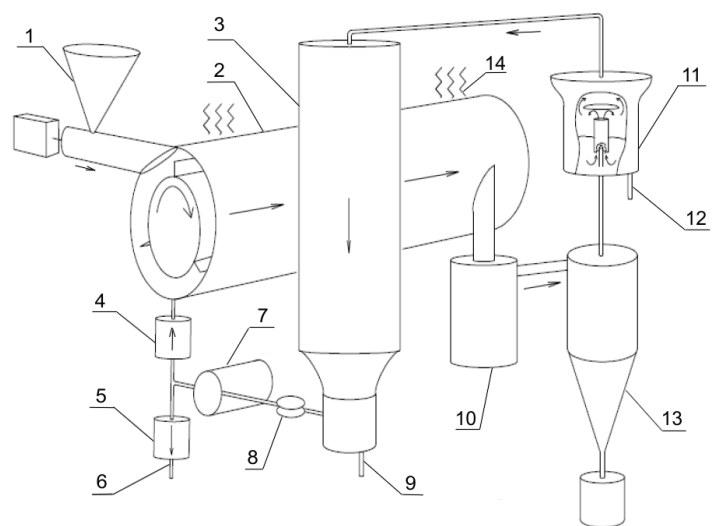


Рис. 4. Експериментальна установка з вихровим абляційним реактором [6]:
1 – завантажувальний бункер; 2 – реактор;
3 – тканинний фільтр; 4 – пристрій для підігріву піролізного газу; 5 – осушувач газу;
6 – вихід піролізного газу; 7 – газовий насос;
8 – вентиль; 9, 12 – вихід біонафти;
10 – уловлювач вуглистої речовини;
11 – охолоджувач парогазової суміші;
13 – циклон; 14 – нагрів реактора електричним нагрівачем.

нинному фільтрі (3), з нижньої частини якого збирають решту піропалива. Частина піролізного газу підігрівається до 400 °C і знову подається до реактору. Рециркуляція газу здійснюється для контролю часу існування парогазової суміші до моменту її охолодження.

Досліди проводилися за таких умов: температура робочої поверхні реактора – 480...620 °С, час існування парогазової суміші – 2...2,2 сек., температура парогазової суміші – близько 400 °С. Отримано, що вихід піропалива становить близько 51 % при піролізі соломи, та 60,5 % – при піролізі деревини. Спостерігалася слабка залежність виходу рідкого продукту від температури процесу – ріст на 0,8 % та 0,7 %, відповідно, для соломи та деревини при збільшенні температури на 100 °С. Це може пояснюватися тим, що в дослідах суттєво змінювався лише один параметр – температура процесу, тоді як температура парогазової суміші та час її існування залишаються майже постійними.

Прикладом успішного практичного розвитку технології абляційного піролізу є компанія Pytec (Німеччина). На пілотній установці з пластинчатим реактором продуктивністю 250 кг/год по сировині (деревна тріска) було досягнуто вихід піропалива 60 % маси сухої сировини. Температура процесу становить близько 650 °С, швидкість абляції – 3 мм/с. Наразі споруджується демонстраційна установка продуктивністю 2 т/год по сировині, яка буде працювати на відходах лісового господарства [8].

Висновки

Абляційний піроліз біомаси протікає в дуже тонкому шарі сировини при постійній швидкості абляції. Для реалізації процесу необхідно забезпечити високу щільність теплового потоку та тиск в зоні реакції. Низькотемпературний абляційний піроліз дає можливість отримати високий вихід рідкого продукту – до 70 % маси сухої сировини. Вихід піропалива залежить від комплексу режимних умов, вплив яких є складним і потребує подальших досліджень. На сьогодні технології абляційного піролізу мають добрі передумови для виходу на демонстраційний рівень розвитку.

ЛІТЕРАТУРА

1. Железная Т.А., Гелетуа Г.Г. Современные технологии получения жидкого топлива из биомассы быстрым пиролизом. Обзор. Ч. 1. // Пром. теплотехника. – 2005, Т. 27, № 4, С. 91-100.
2. Железна Т.А., Гелетуа Г.Г., Дроздова О.І. Дослідження технологій абляційного піролізу біомаси // Пром. теплотехника – 2011, Т. 33, № 3, С. 51-57.
3. Lede J., Panagopoulos J., Li H.Z. and Villermaux J. Fast pyrolysis of wood: direct measurement and study of ablation rate. – Fuel, 1985, – Vol. 64, Issue 11. – P. 1514-1520.
4. 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.
5. Peacocke G.V.C., Dick C.M., Hague R.A., Cooke L.A. and Bridgwater A.V. Comparison of ablative and fluid bed fast pyrolysis production: yields and analyses. In the book Developments in thermochemical biomass conversion. Edited by Bridgwater A.V., – 1997. – P. 191-205.
6. Bech N., Jensen P.A., Dam-Johansen K. Ablative flash pyrolysis of straw and wood: bench-scale results. Proc. Of 15th European Biomass Conference and Exhibition, – 2007, Berlin.
7. Bridgwater A.V., Peacocke G.V.C. Fast pyrolysis for biomass // Renewable and sustainable energy reviews. – 2000, N 4, – P. 1-73.
8. Meier D., Scholl S., Klaubert H., Markgraf J. Practical results from Pytec's biomass-to-oil (BTO) process with ablative pyrolyser and diesel CHP plant. In the book Success & Visions for Bioenergy. Edited by Bridgwater A.V., – 2007.

Получено 13.12.2011 г.