

УДК 620.92

ЕНЕРГЕТИЧНІ ТА ЕКОНОМІЧНІ ПОКАЗНИКИ ТЕХНОЛОГІЇ ШВИДКОГО ПІРОЛІЗУ В АБЛЯЦІЙНОМУ РЕАКТОРІ ШНЕКОВОГО ТИПУ

Зубенко В.І., Епік О.В., Антоненко В.О., Олійник Є.М.

Інститут технічної теплофізики НАН України, вул. Желябова, 2а, Київ, 03680, Україна

<https://doi.org/10.31472/ihe.3.2018.10>

Стаття містить консолідовані результати розробки та оптимізації лабораторної піролізної установки з абляційним реактором шнекового типу продуктивністю 5 кг/год по сировині. Наведено дані серії експериментів (>60) з аналізом впливу низки вхідних параметрів на вихід пірорідини та якісні характеристики продуктів піролізу.

Стаття содержит консолидированные результаты разработки и оптимизации лабораторной пиролизной установки с абляционным реактором шнекового типа производительностью 5 кг/ч по сырью. Приведены данные серии экспериментов (>60) с анализом влияния ряда входных параметров на выход пиропродукты и качественные характеристики продуктов пиролиза.

The article contains the aggregated results of the development and optimization of laboratory installation for ablative fast pyrolysis performance with productivity 5 kg/hour on input products. The experimental data on the series of experiments (>60) with analysis of the influence of certain range of input parameters on the bio-oil yield and qualitative parameters of output products is presented.

Бібл. 8, табл. 4, рис. 6.

Ключові слова: швидкий піроліз, абляція, реактор шнекового типу, пірорідина, вуглиста речовина, піролізний газ, енергетична ефективність.

BTG – (biomass technology group) група технологій по біомасі;
 BTL – (biomass to liquid) біомаса в рідину;
 RCR – (rotating cone reactor) обертовий конічний реактор;
 CAPEX – (capital expenditure) капітальні витрати;
 IRR – (internal rate of return) внутрішня норма прибутку;
 NPV – (net present value) чиста приведена вартість;
 PBP – (payback period) простий строк окупності;
 PI – (profitability index) індекс прибутковості;

ЄС – європейський союз;
 ОЕСР – організація економічного співробітництва та розвитку;
 ПДВ – податок на додану вартість;
 ККД – коефіцієнт корисної дії;
 ТКЕ – теплокомуненерго;
 ЦКШ – циркулюючий киплячий шар;
 ЦТ – централізоване теплопостачання.

Стійка тенденція зростання цін на основні енергоносії та необхідність пошуку шляхів скорочення споживання імпортованих палив є актуальними проблемами в Україні та вимагають невідкладного вирішення шляхом диверсифікації джерел енергії з врахуванням принципів сталого розвитку, що є загальносвітовим трендом. При цьому біоенергетика, як один із видів відновлюваних джерел енергії, наразі займає провідне місце серед інших типів ВДЕ як в Україні, так і у світі. Енергетичне використання біопалив не обмежується спалюванням первинної твердої біомаси, все більшу роль починають відігравати технології її вторинного використання до яких, в тому числі, відносяться виробництво та утилізація рідкого піропаливата побічних продуктів піролізу біомаси – піролізного газу та вуглистої речовини.

Порівняння деяких технологій енергетичного використання біомаси

Остання енергетична політика країн ЄС-28 та країн ОЕСР спрямована на встановлення амбітних цілей щодо розвитку відновлюваної енергетики та біоенергетики. Що стосується України, ключовою особливістю енергозабезпечення є імпорт до половини енергоресурсів (головним чином природного газу, що використовується для індивідуального опалення населення, виробництва

тепла ТКЕ та в промисловості). Ціна на природний газ значно зросла за останні 5 років і, як очікується, зростатиме і в подальшому. Реальною та практичною альтернативою природному газу є використання місцевих відновлюваних джерел енергії, включаючи біомасу.

Існують різні технології утилізації необробленої біомаси, з яких найпоширенішою і наразі найбільш комерціалізованою та економічно доцільною є пряме спалювання первинної біомаси в котлах для виробництва теплової та електричної енергії. Незважаючи на порівняну простоту такого способу утилізації, в багатьох випадках пряме спалювання біомаси не може бути застосоване, наприклад, якщо технічно неможливо встановити новий котел на біомасі, у разі територіального рознесення об'єктів виробництва та споживання енергії, у секторі транспорту, тощо. У таких випадках технології газифікації та піролізу біомаси можуть мати сенс, оскільки основним вихідним продуктом є рідке біопаливо, що забезпечує більш високу щільність вихідної енергії на одиницю маси палива у порівнянні з твердою біомасою.

За даними Міжнародного енергетичного агентства, «піропаливо – це найдешевша рідина, яку сьогодні можна виготовити з біомаси» [1]. Незважаючи на деякі

переваги, хороші перспективи розвитку та існування пілотних установок, технологія швидкого піролізу ще не досягла статусу комерційної, існують певні невирішені наукові проблеми, пов'язані з технічною та технологічною організацією власне процесу піролізу [1, 2, 3], і ця робота спрямована на вирішення деяких з них.

Переваги технології швидкого абляційного піролізу з реактором шнекового типу

Піролізні технології представлені різними підходами до технічної реалізації, а саме: абляційним піролізом, піролізом в киплячому шарі, піролізом в циркулюючому киплячому шарі, піролізом у потоці, піролізом в конусному реакторі, що обертається, тощо. Кожен з них має свої переваги та недоліки і характерні показники енергетичного ККД. У таблиці 1 наведено порівняння різних технологій піролізу для лабораторних, експериментальних, демонстраційних та комерційних установок швидкого піролізу біомаси, які в даний час існують у світі.

Одним з найбільш помітних прикладів успішної реалізації великомасштабної піролізної установки є установка BTG-BTL з модифікованим реактором RCR, яка працює на принципі швидкого піролізу з комбінацією абляційного та обертового конусних реакторів. Власником даної установки є Biomass Technology Group BV (Нідерланди) [4]. Основними перевагами технології BTG-BTL у порівнянні з іншими технологіями піролізу є високий вихід піропалива, висока теплотворна здатність піролізного газу, принципова можливість виробництва електроенергії, а також низька концентрація твердих часток у піропаліві (до 0,01% мас.).

Конструкція та первинний дизайн абляційної лабораторної установки швидкого піролізу були представлені у [8]. Експерименти показали, що лабораторна установка стабільно працювала протягом 180 хвилин. Завдяки визначенню на підставі попередніх запусків та випробувань та підтримці певних задалегідь заданих умов експлуатації лабораторної установки, середній показник щодо виходу піроїдини склав 50% за вагою.

Результати експериментів та визначення ефективності роботи установки

Умови проведених експериментів наведені на рисунку 1. Серія експериментів проводилася з такими діапазонами параметрів [5, 8]:

- споживання біомаси: 0,5-4,5 кг/год;
- температура зовнішньої поверхні реактора: 525-650 °С;
- швидкість частки біомаси в реакторі: 0,8-1,2 м/с;
- час перебування частки біомаси в реакторі: 0,6-0,75 с.

Вплив температури реактора

Для першої серії експериментів, які мали на меті «прощупування» можливостей установки, проведених при температурі зовнішньої поверхні реактора до 550 °С в продуктах піролізу містилося понад 60% вуглецевої речовини, 30% піролізного газу та 10% рідкого піропалива. Ці показники свідчать про те, що процес більше схожий на торефікацію, а не на піроліз біомаси, що неприйнятно для цілей роботи. При підвищенні температури реактора понад 650 °С спостерігалось різке збільшення виходу піролізного газу (до 60%) – процес зміщується в бік газифікації. Отже, пошук оптимальної температури корпусу реактора був проведений в серії

Табл. 1. Порівняння різних технологій піролізу.

Тип/технологія швидкого піролізу	Статус технології	Макс. вихід піроїдини	Складність конструкції	Фракція сировини	Витрата інертного газу	Масштаб	Можливість масштабування
В потоці	Демонстраційний		Велика	Малий	Велика	Великий	Складна
В реакторі з киплячим шаром	Комерційний, Демонстраційний	75%	Середня	Малий	Велика	Середній	Легко
В реакторі з ЦКШ	Комерційний	75%	Велика	Середній	Велика	Великий	Легко
В реакторі з конусом, що обертається	Комерційний, Демонстраційний	65%	Велика	Малий	Мала	Малий	Складна
Вакуумний	Демонстраційний	60%	Велика	Великий	Мала	Малий	Складна
Вихровий	Лабораторний	60%	Велика	Середній	Велика	Великий	Середня
Абляційний	Лабораторний, дослідно-промисловий	75%	Велика	Великий	Мала	Малий	Легко

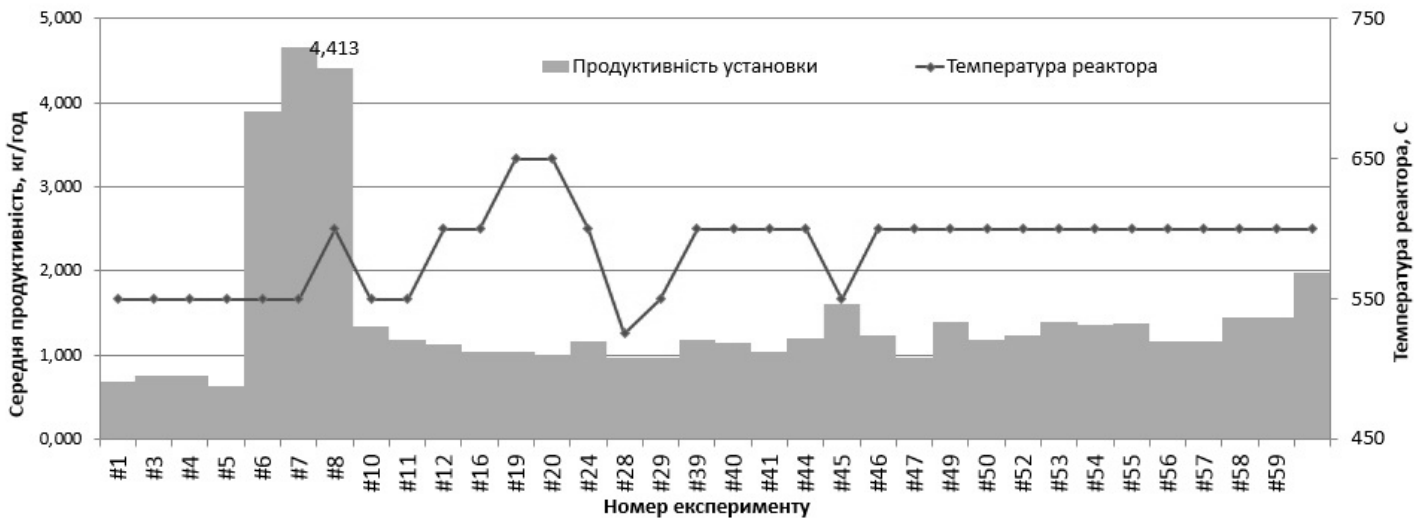


Рис. 1. Сукупні дані для 60 експериментів – показані витрата сировини, температура реактора та відповідний вихід пірорідини.

експериментів в діапазоні температур 550-650 °C та визначено, що при температурі 600 °C, вихід рідкого піропалива був найвищим серед інших продуктів піролізу.

Вплив швидкості руху частки біомаси

При швидкості руху частки менше 0,8 м/с та відповідно часу перебування частки в реакторі понад 0,75 с спостерігалось різке збільшення частки вуглистої речовини в продуктах піролізу. При швидкості руху частки більше 1,2 м/с не спостерігалось будь-яких змін в розподілі між продуктами піролізу. Відповідно пошук оптимальної швидкості частки біомаси в АРШТ був проведений в діапазоні 0,8...1,2 м/с. Визначено, що

швидкість частки біомаси у 1,2 м/с відповідає максимальному виходу пірорідини за умов стабільного підтримання інших параметрів.

Максимальний вихід піропалива за всі серії експериментів склав 51% та був досягнутий при температурі зовнішнього корпусу реактора 600 °C, витраті сировини 1,2 кг/год, швидкості руху частки в реакторі – 1,2 м/с. При цьому, середній вихід пірорідини у вибраних експериментах, за винятком відбракованих, становить 44% (рис. 2).

Енергетичний та масовий баланс установки

Для оцінки ефективності роботи лабораторної установки було складено енергетичний та масовий баланс.

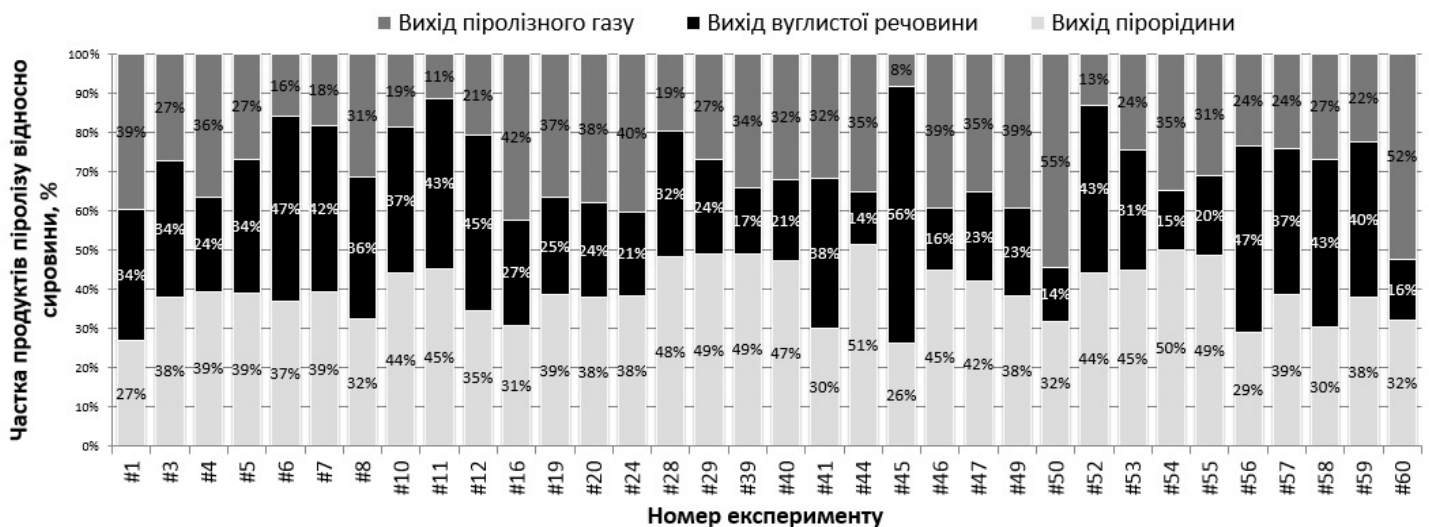


Рис. 2. Баланс вихідних продуктів піролізу для вибраної серії експериментів.

Вхідна енергія представлена енергією в сировині на основі нижчої теплотворної здатності (Q_1) та додаткової енергії, що надходить від системи нагріву реактора (Q_2) (рис. 3 (а)). Вихідна енергія складається з енергії у продуктах піролізу на основі нижчої теплотворної здатності кожного продукту (Q_3) та втрат тепла (Q_4). Теплові втрати виникають в різних зонах установки через систему конденсації, ізоляцію реактора, вертикальний патрубок від зони системи подачі сировини до зони реактора.

Рисунок 3 (б) демонструє масовий баланс для реального експерименту з максимальним виходом піропалива. Зі схеми видно, що з 0,9 кг вхідної сировини виходить 0,46 кг рідкого піропалива, 0,316 кг піролізного газу та 0,122 кг вуглистої речовини. Масовий баланс підтверджує, що кількість вхідних і вихідних про-

дуктів рівні. Інертний газ N_2 , який використовується для запобігання потрапляння кисню в тракт установки, постійно циркулює в системі без впливу на масовий баланс.

На рисунку 4 показані значення енергетичної ефективності (енергетичного ККД) установки для вибраної серії експериментів, розрахованого за методом енергетичного балансу $Q_3/(Q_1 + Q_2)$. Можна побачити, що максимальний енергетичний ККД установки становить 94% (для експериментів № 6-8). Така висока ефективність спостерігається при роботі установки на номінальній проектній потужності з відповідним високим споживанням вхідної сировини – більше 4 кг/год. Найменша енергетична ефективність установки становить 50% (експеримент № 1-4), оскільки перші експеримен-

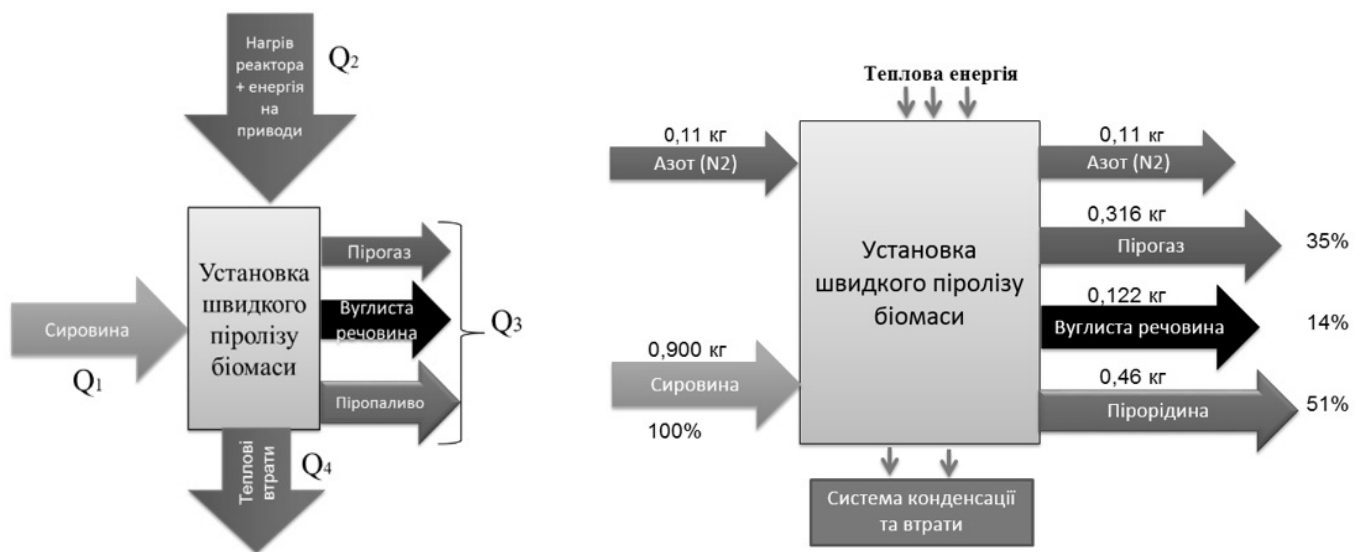


Рис. 3. Енергетичний та масовий баланс лабораторної установки.

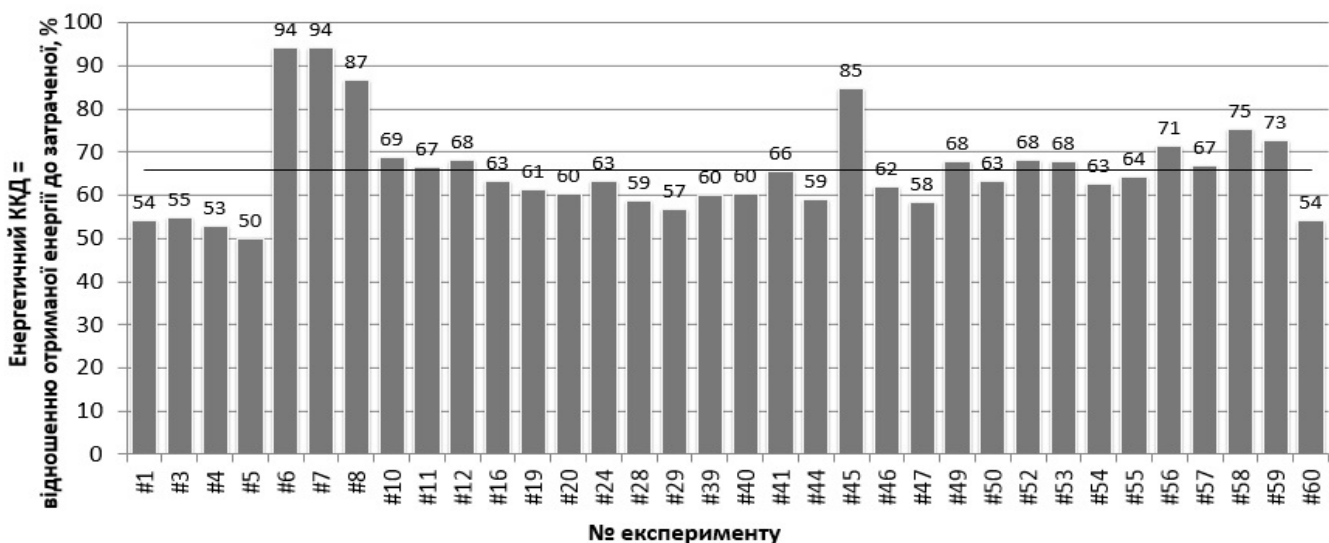


Рис. 4. Енергетичний ККД установки.

ти проводилися для налаштування режимів експлуатації і не можуть повністю відображати реальний показник енергетичного ККД.

Середній енергетичний ККД установки для вибраної серії експериментів становить 65%. Він може бути підвищений шляхом повернення частини втрат тепла від вертикального патрубку між зоною подачі сировини та зоною реактора до осаджувальної камери між зоною реактора та зоною конденсації. Згідно з розрахунками, така модифікація може забезпечити підвищення середнього енергетичного ККД на 10% (рис. 5).

Іншим способом підвищення енергетичного ККД є використання піролізного газу для зменшення споживання електроенергії на власні енергетичні потреби установки. Це може бути досягнуто завдяки його утилізації в окремому пальнику із подальшим нагріванням реактора продуктами згорання (що мають температуру 800...1000 °С). Відповідно до попередніх розрахунків енергетичного балансу утилізації піролізного газу, кількість тепла від його спалювання достатня для забезпечення 40...100% (в середньому 60%) власних потреб установки на нагрів реактора (рис. 6).

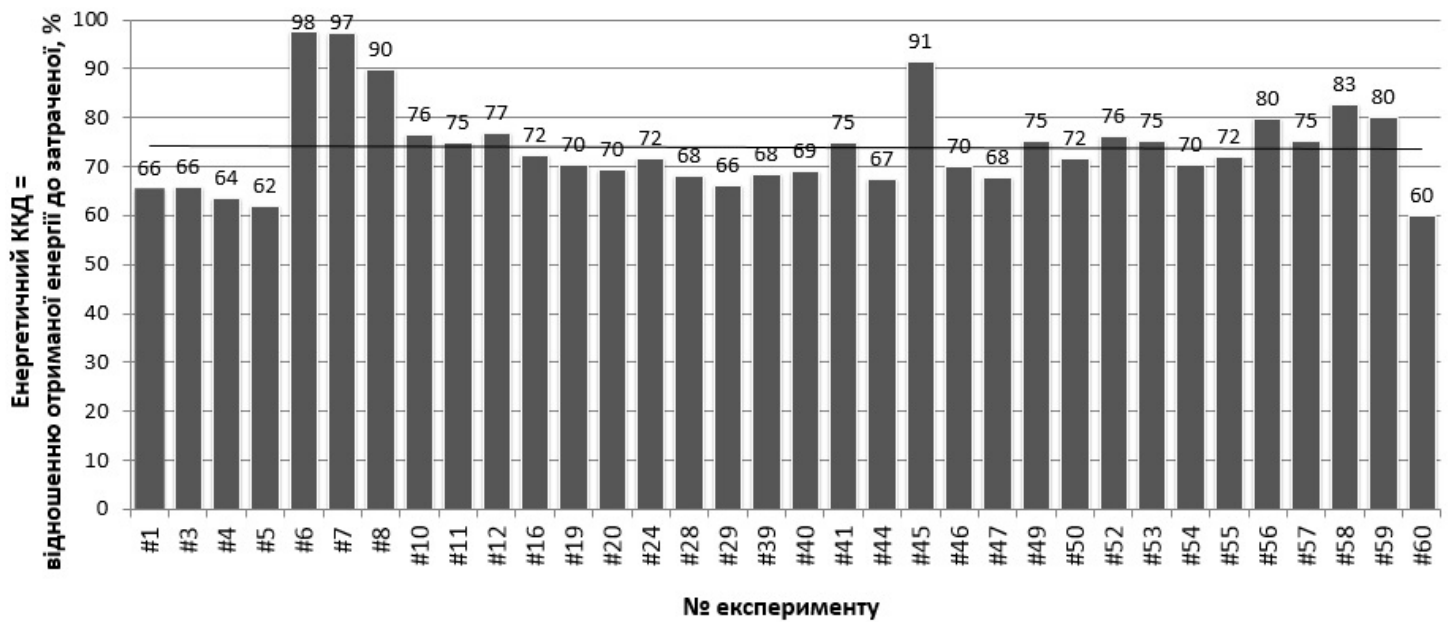


Рис. 5. Енергетичний ККД установки з утилізацією частини втрат тепла.



Рис. 6. Можливість покриття потреб енергії на нагрів реактора за рахунок утилізації піролізного газу.

Оцінка економічних показників роботи комерційної установки з виробництва рідкого піропалива та вуглистої речовини

В рамках техніко-економічного обґрунтування розглядається комерційна мобільна піролізна установка потужністю 500 кг/год по вхідній сировині. Оскільки в якості основної переваги технології швидкого піролізу в реакторі шнекового типу є простота масштабування, така велика установка може бути масштабована з розглянутої лабораторної установки без суттєвих технічних модифікацій, що доведено для реально існуючої конструкції комерційної установки швидкого піролізу потужністю до 50 кг/год по сировині. Ключовими особливостями комерційної установки, потужністю 500 кг/год, що розглядається, є:

- Енергетична ефективність, масовий та енергетичний баланс, вихід та якісні показники продуктів піролізу, режимні параметри є такими самими, шой для представленої лабораторної установки;
- Піролізний газ використовується як первинне джерело енергії для нагріву реактору, що складає 60% теплової енергії, необхідної для нагрівання реактора, відповідно до даних енергетичного балансу лабораторної установки;
- Експлуатація установки відбувається поруч із джерелом вхідної сировини, а отримані рідке піропаливо та вуглиста речовина реалізуються на місці як паливо для використання в котельнях, когенераційних установках або для подальшої переробки та очистки.

Загальні капітальні витрати (CAPEX), необхідні для виготовлення піролізної установки з урахуванням всього необхідного основного та допоміжного обладнання, складають 1,25 млн. Євро відповідно до комерційних пропозицій місцевих виробників на компоненти установки та власної оцінки авторів на базі комплектації існуючої лабораторної установки (5 кг/год) і демонстраційної мобільної установки (50 кг/год). Зведені дані щодо основних технічних характеристик та експлуатаційні витрати установки показані нижче в Таблиці 3.

Загальна собівартість рідкого піропалива з біомаси оцінюється на рівні 38,9 Євро/т без ПДВ із відповідною вартістю вхідної продукції 13 Євро/т. Загальна собівартість виробництва вуглистої речовини складе 46,3 €/т без ПДВ. Структура загальної собівартості виробництва рідкого піропалива з біомаси протягом всього строку життя проекту (20 років) включає, серед іншого, оподаткування та фінансові витрати. Основними складовими операційних витрат є придбання вхідної сировини (28%) та оплата праці (24%).

Для порівняння вартості отриманих продуктів із наявними на ринку енергетичними ресурсами, прораховано вартість 1 МДж енергії, яка міститься в продуктах піролізу (табл. 3). Розрахунок виконується відповідно до заздалегідь визначеної «ціни продажу» рідкого піропалива та вуглистої речовини (табл. 2). Ця «ціна продажу» дещо вище собівартості, оскільки мета роботи

Табл. 2. Технічні характеристики та операційні витрати установки потужністю 500 кг/год (у Євро).

Параметр	Значення	Розмірність
Кількість переробленої сировини	4200	т/рік
Вартість сировини	13	€/т
Паливна сировина	51	тис. €/рік
Вартість електроенергії з мережі	0,055	€/кВт×год
Вартість спожитої електроенергії за рік	16,2	тис. €/рік
Технічне обслуговування, ремонт за рік	3,6	тис. €/рік
Річна заробітна плата	43,5	тис. €/рік
Амортизація за рік	11,5	тис. €/рік
Загальні витрати	33,5	тис. €/рік
Кількість виробленого рідкого піропалива	2100	т/рік
Ціна для продажу рідкого піропалива	45,5	€/т
Повна вартість рідкого піропалива	26,5	€/т
Кількість виробленої вуглистої речовини	1470	т/рік
Ціна для продажу вуглистої речовини	75,8	€/т
Повна вартість вуглистої речовини	46,3	€/т

¹Відходи біомаси від лісових рубок догляду, відходів рубок та деревообробки.

Табл. 3. Порівняння вартості продуктів піролізу з іншими паливами.

Параметр	Калорійність		Вартість без ПДВ		Вартість одиниці енергії
	МДж/кг	МДж/м ³	€/т	€/тис. м ³	€/МДж
Природний газ (для промисловості)	-	34,1	-	239	7
Мазут	38,3	-	272	-	7,1
Вугілля	21,8	-	76	-	3,5
Тріска ($W = 40\%$)	10,2	-	30	-	3
Піропаливо ($W = 40\%$)	14,7	-	45	-	3,1
Вуглиста речовина	25,1	-	76	-	3

комерційної установки – отримання певного прибутку від продажу продуктів піролізу і забезпечення окупності установки.

Як видно з таблиці 3 рідке піропаливо і вуглиста речовина є конкурентними на ринку України у порівнянні з викопними паливами. Вартість 1 МДж енергії, що міститься в продуктах піролізу вдвічі менша у порівнянні з аналогічним показником для мазуту та природного газу для промисловості, на 15% нижче за ціну енергії з вугілля, та майже ідентична для тріски з вологістю 40%. При цьому піропаливо має суттєву перевагу у порівнянні з тріскою – його щільність втричі вища, тому транспортувальне плече для піропалива може бути майже втричі довшим.

Слід також відмітити, що у випадку продажу лише одного продукту піролізу вартість енергії буде відповідно зростати, оскільки всі витрати будуть відноситися лише до одного корисного продукту. Наприклад, для режиму "лише рідке піропаливо" вартість енергії в ньому збільшиться до 6,1 Євро/МДж, що все ще є конкурентним у порівнянні з природним газом, але не з іншими видами палива. Тому надзвичайно важливо виробляти та мати збут як рідкого піропалива, так і вуглистої речовини.

У режимі виробництва двох продуктів проект може бути економічно здійсненним за умов, визначених у Таблиці 3. За допомогою методу аналізу грошового потоку було визначено основні економічні показ-

ники, характерні для заданих вхідних умов: простий стрококупності (без дисконтування) – 3,5 роки; дисконтований строк окупності – 3,9 року; внутрішня норма прибутку (IRR) – 39%; чиста приведена вартість (NPV) – 0,25 млн. євро; індекс рентабельності становить 2,8 (табл. 4).

Отримані економічні показники характерні для біоенергетичних проектів в Україні. Для їх поліпшення рекомендується збільшити розмір установки та використовувати більш дешеву вхідну сировину. Проте, існує верхня межа до збільшення потужності установки через особливості застосування технології швидкого піролізу з реактором шнекового типу, після якої інші технології піролізу можуть бути більш конкурентоспроможними.

Висновки

Розглянута модифікована лабораторна установка швидкого абляційного піролізу з реактором шнекового типу демонструє високий вихід рідкого піропалива з максимумом 51% та забезпечує додаткові енергомісткі побічні продукти (піролізний газ та вуглиста речовина, кожен з яких може досягати 60% для деяких експериментів) і має ряд переваг серед інших піролізних технологій, таких як відносна простота конструкції, легкість масштабування, низькі капітальні витрати на одиницю встановленої потужності та високий енергетичний ККД.

Максимальний енергетичний ККД розглянутої технології досягає 94%, а в середньому складає 65% (для

Табл. 4. Основні економічні показники, характерні для піролізної установки з виробництвом двох продуктів – пірорідини та вуглистої речовини.

Показник	Значення	Розмірність
Простий строк окупності РВР	3,5	роки
Дисконтований строк окупності ДРВР	3,9	роки
Внутрішня норма рентабельності IRR	39	%
Чиста приведена вартість NPV	0,25	млн. €
Індекс прибутковості PI	2,8	-

60 експериментів), основними параметрами, що впливають на його рівень є споживання вхідної сировини (продуктивність установки) та коефіцієнт використання встановленої потужності установки (чим він вище, тим вищий ККД); використання виробленого піролізного газу для нагріву реактора може забезпечити в середньому 60% споживання теплової енергії реактором, що також дає змогу підвищити середній енергетичний ККД до 75%.

Оцінка економічних показників для промислової мобільної установки швидкого піролізу потужністю 500 кг/год показує, що це комерційно здійсненний проект у випадку продажу двох продуктів – рідкого піропалива і вуглистої речовини, а також використання піролізного газу для нагріву реактора; крім того, утилізація піролізного газу на власні потреби установки дає можливість автономної роботи установки без додаткового потужного джерела електроенергії.

ЛІТЕРАТУРА

1. *Bridgwater A.V.* The Status of Fast Pyrolysis of Biomass in Europe // Proc. of the 10th Europ. Bioenergy Conference, Wurzburg, Germany, 8-11 June, 1998, CARMEN, – 1998. – P. 268-271.

2. *Lédé J.* Biomass fast pyrolysis reactors: a review of a few scientific challenges and of recommended research topics // Oil Gas Sci. Technol.–Rev. IFP Energies Nov. 68 (5). – 2013, P. 801-814.

3. *Lédé J., Diebold J.P., Peacocke G.V.C., Piskorz J.* The nature and properties of intermediate and unvaporized biomass pyrolysis materials, in: A.V. Bridgwater, et al. (Eds.) // Fast Pyrolysis of Biomass: A Handbook, CPL Press, Newbury (UK) 1999.

4. *BTG-BTL technology:* <https://www.btg-btl.com/en/technology>.

5. *Клименко В.М., Зубенко В.І., Баштовий А.І. Антошчук Т.О.* Дослідження швидкого піролізу біомаси в абляційному шнековому реакторі // Промислова теплотехніка. – 2016, т. 38, № 2. – С. 20-27.

6. *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.

7. *Chiaramonti D., Oasmaa A., Solantausta Y.* “Power generation using fast pyrolysis liquids from biomass” // Renewable and Sustainable Energy Reviews (<http://www.sciencedirect.com>) 2005.

8. *Zubenko V.I., Bashtovyi A.I., Antoshchuk T.O.*, Investigation of biomass fast pyrolysis in the ablative screw reactor // Proceedings of the 5th International conference on Thermal Equipment, Renewable Energy and Rural Development, June 2-4, Golden Sands, Bulgaria (ISSN 2457-3302, ISSN-L 2457-3302). P. 21-26.

ENERGY AND ECONOMIC INDICATORS OF FAST ABLATIVE PYROLYSIS TECHNOLOGY WITH CONE SCREW REACTOR

Zubenko V.I., Epik O.V., Antonenko V.O., Oliynyk E.M.

Institute of Engineering Thermophysics of the National Academy of Sciences of Ukraine, vul. Zhelyabova, 2a, Kyiv, 03680, Ukraine

<https://doi.org/10.31472/ihe.3.2018.10>

The article contains the aggregated results of the development and optimization of laboratory installation for ablative fast pyrolysis performance with productivity 1-4 kg/hour on final products. The experimental data on the series of experiments (>60) with analysis of the influence of certain range of input parameters on the bio-oil yield and qualitative parameters of output products is presented. The optimization of installation regimes and input parameters for bio-oil yield maximization for different biomass types is performed. It was found that the ratio of three output products is not always optimal maximizing bio-oil yield with respect to energy yield in the products. The maximum achieved bio-oil yield is 51% by mass rated to the input products. It is revealed, that the essential parameters which influence on the final bio-oil yield are temperature in the reactor, time of biomass particles existence in the reactor, fraction of biomass particles. The mass distribution for pyrolysis by-products (pyrogas and biochar) is dependent on the initial moisture content of biomass and organization of condensation process of bio-oil. The energy balance of installation demonstrates the average efficiency of the pyrolysis process on the level of 65% (with maximum 98%) and could be increased to 75% average with simple reconstruction of installation. On the basis of obtained laboratory data the scaling of the installation was performed with development of commercial prototype with productivity of 50 kg/hour. On the basis of obtained technical data, the assessment of economic indicators of bio-oil and biochar production with large sized mobile installation has been performed demonstrating the good commercial feasibility of the installation performance.

References 8, tables 4, figures 6.

Key words: fast ablative pyrolysis, screw reactor, bio-oil, biochar, pyrogas, pyrolysis energy efficiency.

1. *Bridgwater A.V.* The Status of Fast Pyrolysis of Biomass in Europe // Proc. of the 10th Europ. Bioenergy Conference, Wurzburg, Germany, 8-11 June, 1998, CARMEN, 1998. P. 268–271.

2. *Lédé J.* Biomass fast pyrolysis reactors: a review of a few scientific challenges and of recommended research topics // Oil Gas Sci. Technol.–Rev. IFP Energies Nov. 68 (5). 2013, P. 801–814.

3. *Lédé J., Diebold J.P., Peacocke G.V.C., Piskorz J.* The nature and properties of intermediate and unvaporized biomass pyrolysis materials, in: A.V. Bridgwater, et al. (Eds.) // *Fast Pyrolysis of Biomass: A Handbook*, CPL Press, Newbury (UK) 1999.

4. *BTG-BTL technology:* <https://www.btg-btl.com/en/technology>.

5. *Klimenko V.M., Bashtovyi A.I., Zubenko V.I., Antoshchuk T.O.*, Doslidzhennia shvydkoho pirolizu biomasy v abliatsiinomu shnekovomu reaktori. [Investigation of biomass fast pyrolysis in the ablative screw reactor], *Promyshlennaya teplotekhnika* [Industrial Heat Engineering],. 2016, v.37, N 2, P. 20–27.

6. *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.

7. *Chiaramonti D., Oasmaa A., Solantausta Y.* “Power generation using fast pyrolysis liquids from biomass” // *Renewable and Sustainable Energy Reviews* (<http://www.sciencedirect.com>) 2005.

8. *Zubenko V.I., Bashtovyi A.I., Antoshchuk T.O.*, Investigation of biomass fast pyrolysis in the ablative screw reactor // Proceedings of the 5th International conference on Thermal Equipment, Renewable Energy and Rural Development, June 2-4, Golden Sands, Bulgaria (ISSN 2457-3302, ISSN-L 2457-3302). P. 21–26.

Отримано 24.05.2018

Received 24.05.2018