

НАЦІОНАЛЬНА АКАДЕМІЯ НАУК УКРАЇНИ
ІНСТИТУТ ТЕХНІЧНОЇ ТЕПЛОФІЗИКИ

СКЛЯРЕНКО ЄВГЕН ВАЛЕНТИНОВИЧ

УДК 662. 63: 66.091

**СТВОРЕННЯ ПРОЛІЗНОЇ ТЕХНОЛОГІЇ ТА УСТАНОВКИ ДЛЯ
ТЕРМОХІМІЧНОЇ КОНВЕРСІЇ РОСЛИННОЇ БІОМАСИ**

05.14.06 – Технічна теплофізика та промислова теплоенергетика

АВТОРЕФЕРАТ

дисертації на здобуття наукового ступеня кандидата технічних наук

Київ – 2017

Дисертацією є рукопис

Роботу виконано в Інституті технічної теплофізики Національної академії наук України, м. Київ

Науковий керівник: доктор технічних наук, старший науковий співробітник
Білека Борис Дмитрович,
Інститут технічної теплофізики НАН України,
провідний науковий співробітник відділу
нестационарного тепломасопереносу в процесах сушіння;

Офіційні опоненти: доктор технічних наук, професор
Сорока Борис Семенович,
Інститут газу НАН України, завідувач відділу
високотемпературного тепломасообміну;

кандидат технічних наук, старший науковий співробітник
Жовмір Микола Михайлович,
Інститут відновлюваної енергетики НАН України,
старший науковий співробітник відділу
відновлюваних органічних енергоносіїв.

Захист відбудеться «22» березня 2017 р. о 10⁰⁰ годині на засіданні спеціалізованої вченої ради Д 26.224.01 при Інституті технічної теплофізики Національної академії наук України за адресою: 03057, м. Київ, вул. Желябова, 2а.

З дисертацією можна ознайомитися в бібліотеці Інституту технічної теплофізики НАН України за адресою: 03164, м. Київ, вул. Булаховського, 2.

Автореферат розісланий «17» лютого 2017р.

Учений секретар
спеціалізованої вченої ради Д 26. 224. 01
доктор технічних наук

Ж.О. Петрова

ЗАГАЛЬНА ХАРАКТЕРИСТИКА РОБОТИ

Актуальність роботи. Раціональне і ефективне використання всіх видів енергоресурсів є однією з найважливіших загальнодержавних задач в Україні, що викликано дефіцитом викопних палив, постійним їх подорожчанням, низькою ефективністю використання енергетичних ресурсів і високою енергоємністю валового продукту. Крім того, оскільки потреби в паливно-енергетичних ресурсах, за рахунок власного видобутку, задовольняються приблизно на 53%, а решта імпортується, це породжує залежність економіки України від країн-експортерів і є прямою загрозою для її енергетичної та національної безпеки.

В той же час, збільшення споживання викопних палив призводить до погіршення екологічної безпеки, що підвищує актуальність робіт, які направлені на вирішення даної проблеми.

Один з дієвих шляхів вирішення цих проблем полягає в комплексному енерготехнологічному використанні палив і у впровадженні нових технологій використання відновлюваних джерел енергії, зокрема, енергії біомаси рослинного походження, якій притаманна доступність, відновлюваність, екологічність і універсальність. В той же час, основним фактором, який перешкоджає і створює проблему для її широкого використання, є низькі теплотехнічні характеристики. Переважно це дрібно фракційна біомаса з високою вологістю, низькою насипною і енергетичною щільністю та високою собівартістю її конверсії в енергетичні продукти.

Існуючі технології конверсії рослинної біомаси мають ряд недоліків, серед яких необхідно відзначити невисоку калорійність горючих газів, низький ступінь і високу собівартість переробки вихідної сировини. Тому розробка сучасних технологій конверсії біомаси, які дозволяють ефективно використовувати значні сировинні ресурси є доволі актуальною задачею.

Серед них перспективними бачаться технології і процеси енерготехнологічного спрямування, коли поряд з енергетичними продуктами одержують високоліквідні супутні продукти.

Ефективність цих процесів, у значній мірі, залежить від виду вихідної сировини, технологічних і енергетичних параметрів процесу, цільових кінцевих продуктів, їх якості і собівартості та від конструктивних особливостей обладнання для його реалізації. У зв'язку з цим, пошук оптимальних рішень по реалізації таких процесів є актуальним та вимагає додаткових досліджень, що і є змістом даної роботи.

Зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами. У матеріалах дисертації узагальнено наукові результати, які отримані автором у рамках виконання науково-дослідних робіт відповідно до тематик НДР Інституту технічної теплофізики НАН України: «Підвищення ефективності паливовикористання при двоступеневому спалюванні твердого палива та

оптимізація конструкцій паливних пристроїв» (№ДР 0103U003752, 2005 р.); «Підвищення ефективності спалювання низькосортних твердих палив шляхом термохімічної переробки» (№ ДР 0106U005113, 2008р.); в рамках проекту Copernicus II ENVIMAN, за підтримки Європейської Комісії (контракт № ICA2-CT-2000-10010); цільова комплексна програма «Біологічні ресурси і новітні технології біоенергоконверсії» на 2013-2017 рр. (Розпорядження Президії НАН України № 189, від 20. 03. 2013 р.)

Мета і задачі дослідження. Мета роботи – підвищення ефективності використання енергетичного потенціалу рослинної біомаси шляхом створення нової піролізної технології та установки для її термохімічної конверсії в піролізний газ і біовуглець.

Досягнення цієї мети потребує вирішення наступних завдань:

- аналіз піролізних технологій та вибір шляхів вирішення поставленої мети;
- розроблення піролізного процесу конверсії біомаси в піролізний газ і біовуглець в шнековому реакторі з комбінованим підведенням теплоти через його стінку і при фільтрації газового теплоносія через затиснутий рухомий шар біомаси;
- дослідження і експериментальне визначення робочих характеристик теплоносія та гідромеханічних характеристик затиснутого шару біомаси;
- розроблення і верифікація математичної моделі та програми розрахунку процесу;
- створення лабораторних установок для експериментального дослідження процесу і визначення основних технологічних та конструктивних параметрів;
- розроблення рекомендацій для проектування шнекових піролізних установок;
- розроблення дослідної установки продуктивністю до 200 кг/год біомаси;
- проведення техніко-економічного і екологічного обґрунтування впровадження цієї технології.

Об'єкт дослідження – технологія термохімічної конверсії дрібно фракційної рослинної біомаси на основі піролізного процесу.

Предмет дослідження – технологічні, режимні та конструктивні параметри піролізного процесу конверсії дрібно фракційної рослинної біомаси в піролізний газ і біовуглець, в шнековому реакторі з комбінованим підведенням теплоти через його стінку і при фільтрації газового теплоносія через затиснутий рухомий шар біомаси.

Методи досліджень – розрахункові та експериментальні дослідження на базі математичного моделювання та дослідних установках.

Наукова новизна отриманих результатів полягає в наступному:

1. Удосконалено технологію термохімічної конверсії рослинної біомаси в піролізний газ і біовуглець на базі піролізного процесу, що реалізується в шнековому реакторі з комбінованим підведенням теплоти через його стінку і при фільтрації газового теплоносія через затиснутий рухомий шар біомаси.

2. Вперше досліджено і випробувано використання продуктів неповного згоряння вуглеводневих газів як газового теплоносія в піролізному процесі, що дозволило підвищити стабільність процесу і характеристик піролізного газу та дає можливість створювати, в перспективі, нові вуглемісткі матеріали.
3. Вперше експериментально отримано газовий теплоносій при змішаній конверсії природного газу в продуктах неповного згоряння з загальним надлишком повітря 0,5, що дозволило підвищити його теплотехнічні характеристики.
4. Експериментально досліджені і визначені основні гідромеханічні характеристики полідисперсного шару тріски нерегулярної форми, що дозволило визначити граничні параметри шару (товщину, фракційний розмір і дійсну швидкість фільтрації) та уточнити закономірності гідравлічного опору шару.
5. Розроблено і верифіковано математичну модель та програму розрахунку запропонованого процесу термохімічної конверсії на основі стехіометричної схеми ендотермічних реакцій і розрахунку констант швидкостей реакцій в ареніусівському наближенні, що дозволило удосконалити і спростити розрахунки піролізного процесу.

Практичне значення отриманих результатів.

1. Запропонована математична модель та програма розрахунку можуть бути використані для розробки установок термохімічної конверсії різних видів твердих вуглеводневих палив і при фільтрації різного газового теплоносія через затиснутий рухомий шар біомаси.

2. На основі виконаних розрахункових і експериментальних досліджень визначено основні технологічні параметри запропонованого піролізного процесу і розроблено рекомендації по конструюванню і вибору обладнання при проектуванні енерготехнологічних установок, та технологічні схеми їх використання.

3. Матеріали дисертації застосовані для розробки технічного завдання ДП «Укргіпроцукор» при створенні установки продуктивністю 200 кг/год, для КП «Київзеленбуд», а також при створенні дослідної установки ЕТУ-200 з використанням піролізного газу як газового теплоносія і в навчальному процесі НАУ (акт впровадження). Очікуваний економічний ефект від впровадження тільки однієї установки продуктивність 200 кг/год тріски складається з вартості заміщеного природного газу (біля 300 тис. нм³) і вартості біовуглецю (250–280 т/рік).

Особистий внесок здобувача полягає в проведенні аналізу літературних джерел, участі в розробці нової технології термохімічної конверсії рослинної біомаси, математичної моделі і програми розрахунку процесу, створенні лабораторних установок, розробці методичних положень проведення наукових експериментів, участі в дослідно-промислових випробуваннях, обробці та аналізі отриманих даних. Виконано аналіз

наукових результатів дисертаційного дослідження та порівняння з результатами інших авторів. Представлені в роботі висновки й рекомендації виконані безпосередньо здобувачем.

Апробація результатів роботи. Основні положення дисертації доповідалися і отримали позитивні відгуки на: 10-й Міжнародній конференції по моделюванню двофазних систем (Merseburg, April 9-12, 2002), II Українському Біопаливному Форумі (міжнародна конференція) (м.Київ, 2010р.), Міжнародній конференції «Проблеми промислової теплотехніки» (м. Київ, 2011, 2013, 2015 рр).

Публікації. Основні наукові та прикладні результати дисертаційної роботи повністю відображено в 14 наукових працях, з яких 6 статей у наукових фахових виданнях України, 1 стаття у виданні, що індексується наукометричними базами, в 2 тезах міжнародних науково-технічних конференціях, 5 патентах України.

Структура і об'єм дисертації. Дисертація складається з вступу, чотирьох розділів, висновків, списку використаних літературних джерел -105 найменувань і 8 додатків. Робота викладена на 134 сторінках основного тексту, містить 51 рисунок і 35 таблиць.

ОСНОВНИЙ ЗМІСТ РОБОТИ

У вступі визначена тематика роботи, її цілі і актуальність досліджень, показано зв'язок роботи з науковими програмами і темами, сформульовано мету та завдання досліджень, наукову новизну і практичне значення одержаних результатів, наведено особистий внесок здобувача, відомості про апробацію результатів дисертації та основні публікації.

У першому розділі зроблено огляд літературних даних, що стосуються теми дисертації. Приведені загальні дані про рослинну біомасу, її теплотехнічні характеристики та ресурсну базу. Розглянуті існуючі і перспективні технології термохімічної конверсії рослинної біомаси, особливості і тенденції їх розвитку. Основна увага приділена піролізним процесам термохімічної конверсії дрібно фракційної рослинної біомаси.

Для реалізації таких технологій широкого поширення набули шнекові реактори. Наведено короткі відомості про принцип їх роботи, направленість та основні характеристики і шляхи підвищення ефективності процесу. Розглянуто вплив сировинних і режимних факторів на вихід і якість цільових продуктів.

Завершує розділ постановка задач дисертаційного дослідження, що впливають з аналізу сучасного стану проблеми, приведеного в даному розділі.

Другий розділ присвячено розробленню нової технології термохімічної конверсії рослинної біомаси, визначенню вихідних параметрів процесу і факторів, які впливають на його ефективність. Розроблена

технологія (патент України на винахід № 102789) базується на новому способі енерготехнологічної переробки біомаси (патент України на винахід № 43070) і реалізується в шнековому реакторі, з комбінованим підведенням теплоти через його стінку і при фільтрації газового теплоносія, у вигляді продуктів неповного згоряння вуглеводневого газу, через затиснутий рухомий шар біомаси. Принципова технологічна схема процесу представлена на рис.1.

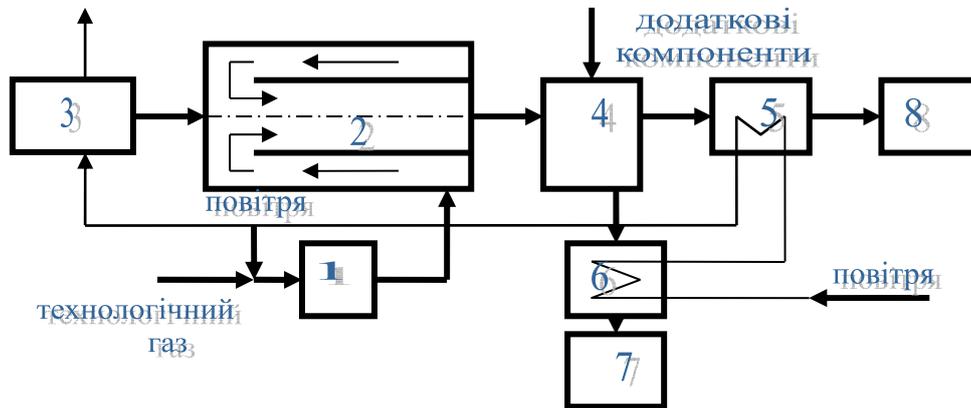


Рис.1 Технологічна схема процесу термохімічної конверсії рослинної біомаси в горючий газ і біовуглець: 1-технологічна топка; 2-камера піролізу; 3-витратний бункер біомаси; 4-шахта; 5,6-теплообмінник; 7-бункер біовуглецю; 8-споживач горючого газу

Дана технологія передбачає послідовність наступних процесів:

- завантаження дрібно фракційної біомаси у витратний бункер (3), де здійснюється її попередня підсушка та подача шнековим живильником в камеру піролізу (2);
- генерація теплоносія, шляхом неповного згоряння вуглеводневого газу в технологічній топці (1) і подача його в камеру піролізу (2);
- піроліз біомаси шляхом її нагрівання до температури розкладу, через стінку і безпосередньо при фільтрації теплоносія через затиснутий рухомий шар біомаси;
- конверсія продуктів піролізу, шляхом їх змішування в шахті (4) з додатковими компонентами;
- охолодження продуктів конверсії в теплообмінниках (5, 6) повітрям, яке в подальшому використовується для отримання теплоносія і для підсушки вихідної біомаси;
- подача продуктів конверсії до споживача (7, 8).

Основна ідея процесу полягає в проведенні піролізу біомаси в режимі «теплового удару» високопотенційним газовим теплоносієм, що дозволяє за короткий час перевести її значну частину в газову фазу, зменшити вихід смол та закінчити процес на стадії відгонки летких речовин і біовуглецю.

Особливості процесу дозволяють отримати і додаткові переваги:

- газовий теплоносіє, у вигляді продуктів неповного згоряння вуглеводневого газу забезпечує високу стабільність процесу та характеристик піролізного газу та дає можливість покращувати механічні характеристики біовуглецю чи створювати, в перспективі, нові вуглемісткі матеріали.

- затиснутий шар: запобігає механічному виносу частинок біомаси і дозволяє форсувати швидкість фільтрації теплоносія та інтенсифікувати тепломасообмінні процеси в реакційній зоні, а також збільшує коефіцієнт заповнення реактора, що підвищує продуктивність установки і зменшує її масогабаритні характеристики;

- шнек забезпечує шуровку і рівномірне переміщення біомаси по довжині реактора, що дозволяє покращити тепломасообмінні процеси і отримати біовуглець однорідної якості, без обгоряння і спікань.

Енергетичний баланс процесу приведено на рис. 2 і його економічна ефективність на рис.3.

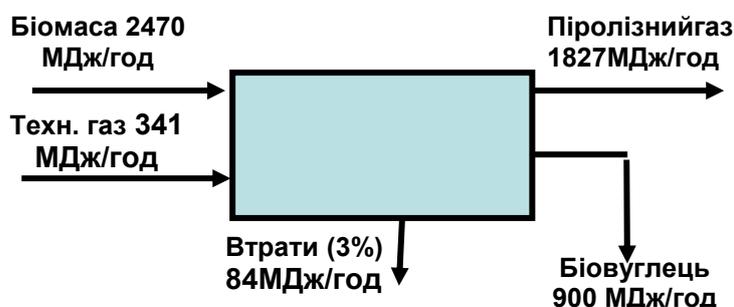
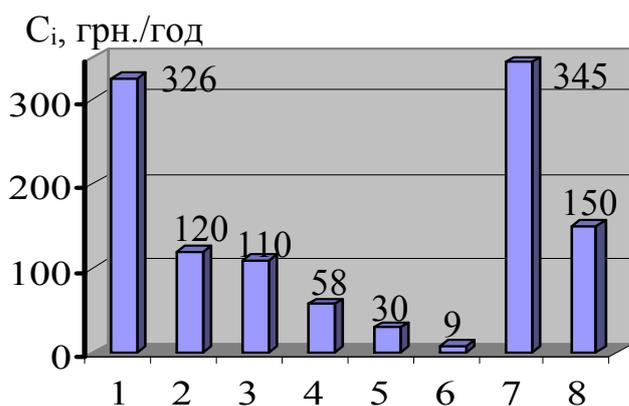


Рис.2 Енергетичний баланс термохімічної конверсії 200кг/год рослинної біомаси в піролізний газ і біовуглець



1-Загальні експлуатаційні витрати, в тому числі:
 2-вартість тріски;
 3-вартість техн.газу;
 4-заробітна плата;
 5-додаткові витрати;
 6-амортизаційні витрати;
 7-вартість заміщеного природного газу;
 8-вартість біовуглецю

Рис.3 Економічний баланс термохімічної конверсії 200 кг/год рослинної біомаси в піролізний газ і біовуглець

Для визначення геометричних, теплофізичних та режимних параметрів процесу був проведений комплекс відповідних аналітичних і експериментальних досліджень. Було створено експериментальну установку, принципова схема якої приведена на рис 4, для дослідження в стаціонарному режимі: гідромеханічних характеристик затиснутого шару; робочих

характеристик теплоносія; впливу температури, часу перебування біомаси в реакційній зоні та вологості вихідної біомаси на перебіг процесу.

Приведено опис експериментальних установок, контрольно-вимірювальної та газоаналізуючої апаратури з оцінкою похибки вимірювань, методики проведення досліджень та обчислення експериментальних даних. Для досліджень використана деревна тріска з розмірами до 5x30x40 мм.

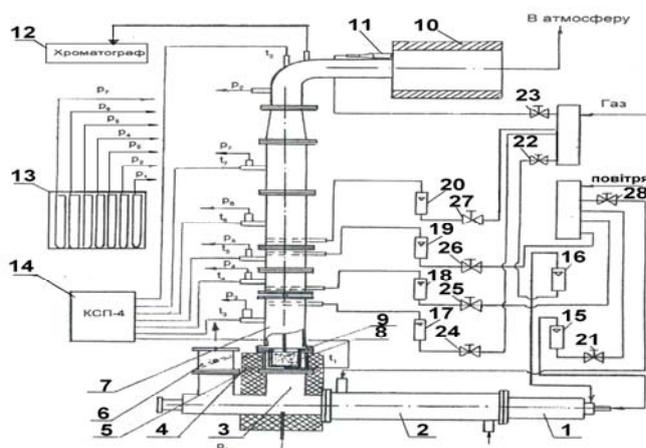


Рис.4 Принципова схема лабораторної установки для дослідження процесу термохімічної конверсії рослинної біомаси 1-камера згоряння, 2-реакційна зона, 3,6-заслінка, 4-теплоізоляція, 5-байпас, 7-робоча дільниця, 8-реактор, 9-дослідна біомаса, 10-камера допалювання, 11-запальник, 12-газовий хроматограф, 13-манометри, 14-реєстратор температури, 15-20-ротаметри, 21-28-регулююча арматура

Визначення залежності гідромеханічних характеристик затиснутого шару від його товщини, фракційного складу біомаси, дійсної швидкості фільтрації теплоносія обумовлено гідравлічним опором шару, при якому забезпечується стабільна і безпечна робота пальника та іншого обладнання.

Експерименти проводилися у стаціонарному режимі шляхом продувки визначеного шару біомаси спочатку холодним повітрям, а потім гарячим газовим теплоносієм у вигляді продуктів неповного згоряння природного газу. Моделювання затиснутого шару, тобто підтискуючої спроможності шнеку, здійснювалося шляхом зміни його товщини (висоти) і відповідно порозності шару біомаси. Затиснутий шар розглядався як нерухома пориста стінка.

Тому для дослідження і обчислення його гідромеханічних характеристик була використана відома методика, яка широко використовується при дослідженні течії рідини та газів в різних пористих системах і в якій рівняння течії в пористому середовищі має вигляд:

$$\frac{P_n^2 - P_k^2}{h} = \alpha(2RT)\mu j + \beta(2RT)j^2, \quad (1)$$

де P_n та P_k - тиск відповідно на вході та виході з шару, Па; h - товщина шару, м; j - питомі витрати газу, $\text{кг}/\text{м}^2 \text{ с}$; R - газова стала, $\text{Дж}/\text{кг К}$; T - абсолютна температура газу, К; μ - динамічна в'язкість, Па с; α - в'язкісний коефіцієнт опору, м^{-2} ; β - інерційний коефіцієнт опору, м^{-1} .

Значення в'язкісного (α) та інерційного (β) коефіцієнтів опору пористого шару визначалися експериментально за витратними характеристиками, залежності перепаду тиску від питомих витрат повітря, що фільтрується через шар тріски різної товщини (рис.5).

Для двох крайніх значень питомих витрат повітря, взятих з витратної характеристики пористого шару (рис.5), для рівняння (1), розраховуємо значення комплексу (А)

$$A = \frac{P_n^2 - P_k^2}{2jhRT} \quad (2)$$

В координатах А-*j*, будуюмо графік (рис.6) рівняння якого є: $A = B_1j + B_0$ де B_1 і B_0 константи даної лінійної залежності.

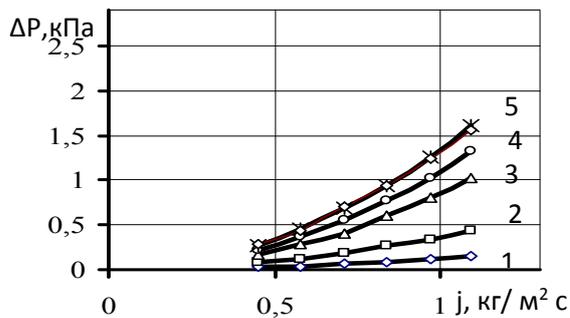


Рис.5 Зміна перепаду тиску по товщині шару тріски (h, м: 1-0,03; 2-0,09; 3-0,21; 4-0,27; 5-0,33;) з порозністю $\epsilon=0,41$, в залежності від питомих витрат повітря (*j*), що фільтрується через шар

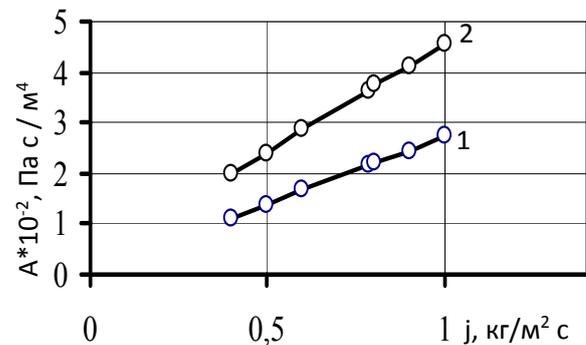


Рис.6 Графік функції $A=f(j)$ для шару тріски товщиною: 1-0,09 м, 2-0,33 м

По графіку функції $A=f(j)$ (рис.6) знаходимо коефіцієнти B_0 і B_1 , за якими визначаються коефіцієнти $\alpha=B_0/\mu$ і $\beta=B_1$, що дозволяє визначити модифіковане число Рейнольдса

$$Re = \frac{\beta j}{\alpha \mu}; \quad (3)$$

і розрахувати коефіцієнт гідравлічного опору шару біомаси по залежності Р.С. Бернштейна, В.В. Померанцева і С.Л. Шагалової

$$\chi = \frac{8K}{Re} + \frac{7,2}{Re^{0,5}} + 0,645, \quad (4)$$

де за експериментальними даними константа Козені-Кармана ($K=6,5$), визначена для полідисперсного шару тріски нерегулярної форми, що приводиться до сферичної форми

$$\sigma = S_p \delta / v, \quad (5)$$

де S_p -площа поверхні частинки; δ -діаметр кулі, об'єм якої дорівнює об'єму частинки матеріалу; v -об'єм частинки.

Залежність коефіцієнту гідравлічного опору шару тріски від модифікованого числа Рейнольдса в порівнянні з даними інших авторів підтверджує правомірність приведення частинок тріски до сферичної форми.

Результати досліджень встановили, що для забезпечення гідравлічного опору шару не більше 3 кПа (обумовлено характеристиками роботи газового пальника низького тиску, вентилятора та іншого обладнання) його товщина повинна бути до 0,35 м при розмірі фракції 0,03-0,04 м.

При цьому, умови затиснутого шару дозволили досягти рекомендованої З.Ф. Чухановим і Н.В.Лавровим дійсної швидкості фільтрації

повітря в 2,2 м/с при холодному дутті, яка згідно гіпотези Б.І.Китаєва про механізм виносу горючих компонентів з зони реакцій та дифузії CO_2 до поверхні біовуглецю є визначальним фактором для регулювання інтенсивності процесу.

При визначенні впливу температури на процес піролізу, задачею експериментальних досліджень є вибір температурного діапазону процесу, при якому досягається необхідна якість продуктів піролізу при мінімальних енергетичних витратах.

На рис.8 за даними В.Н.Козлова та інших авторів показано перерозподіл теплової енергії деревини в продукти піролізу в залежності від температури процесу. Визначено температурний діапазон процесу (350-500°C), в якому біовуглець зберігає до 65% енергетичного потенціалу абсолютно сухої вихідної біомаси. Решта енергії переходить в парогaзи, де основна частина енергії міститься в рідких продуктах, що є аргументом до спалювання такої суміші без конденсації.

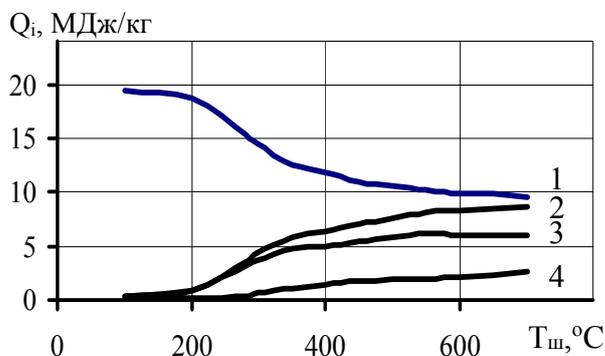


Рис.8 Залежність розподілення теплової енергії деревини в продуктах піролізу від температури процесу: 1-біовуглець; 2-парогaзи; 3-рідкі продукти; 4-гази.

Визначено кількість додаткової теплоти необхідної для проведення піролізу деревної біомаси з різною вологістю, в залежності від температури процесу (рис.9).

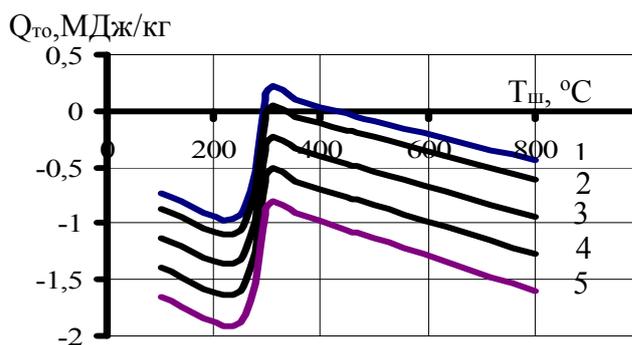


Рис.9 Необхідна додаткова кількість теплоти для піролізу деревної біомаси різної вологості (W^p), в залежності від температури процесу, де W^p , %: 1-25, 2-30, 3-40, 4-50, 5-60

Видно, що у вибраному температурному діапазоні витрати додаткової теплоти зменшуються з початком екзотермічних реакцій (270-280°C). І при вологості біомаси менше 25% спостерігається встановлення автотермічного процесу.

Додаткова теплота забезпечується за рахунок високотемпературного газового теплоносія, отриманого при неповному згорянні вуглеводневого газу (в експериментах природний газ). Задачею експериментальних

досліджень є визначення параметрів газового теплоносія (витрат, температури, калорійності), необхідних для досягнення заданої температури процесу піролізу.

Визначено вихідні характеристики газового теплоносія: температура 1000-1100°C, фізична та хімічна теплота не менше 2 і 6 МДж/м³ відповідно, відсутність вільного кисню і мінімальна кількість баласту.

Розрахунками, за методом В.Ф.Копитова, визначено, що найкращі параметри теплоносія забезпечуються при неповному згорянні вуглеводневого газу при $\alpha=0,5$ (рис.10)

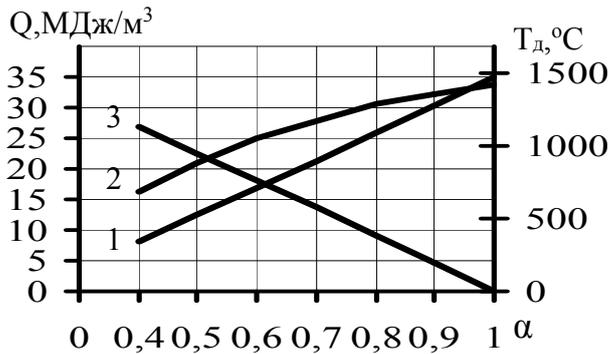
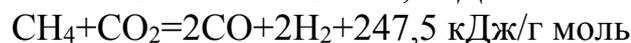
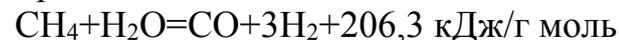


Рис.10 Зміна параметрів теплоносія від коефіцієнту надлишку повітря (α) в топці: 1-фізична теплота; 2-дійсна температура згоряння; 3-хімічна теплота.

Проте для стабільної і безпечної роботи пальника визначений режим його роботи з $\alpha=0,7-0,75$. Для корегування характеристик теплоносія до оптимальних в продукти неповного згоряння вводився вторинний газ для реалізації високотемпературної змішаної конверсії (на прикладі природного газу), по приведеним реакціям:



Визначено, що при кількості вторинного газу 0,4-0,5 м³/м³ і ступеню конверсії (метан, який прореагував) всього 10-15%, температура теплоносія знижується до 1000-1060°C (рис.11) і майже на 30% зменшується кількість баласту при відповідному збільшенні хімічної теплоти (див.табл.1)

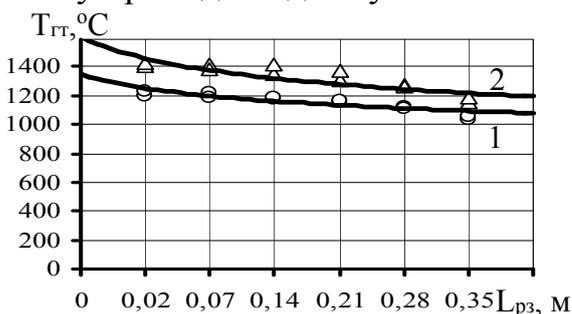


Рис.11 Зміна температури теплоносія по довжині реакційної зони при різних витратах вторинного газу, м³/м³: 1-0,5; 2-0,4.

Таблиця 1

Параметри теплоносія при змішаній конверсії 0,4 м³/м³ природного газу

| Коефіцієнт надлишку повітря, α_3 | Параметри | | | | | | | |
|---|------------------------|-----------|-----------------------|------------|---------------------|-------------------------------------|-------------------------------------|----------------------|
| | CH ₄ , %об. | CO, % об. | H ₂ , %об. | Σбаласт, % | T _г , °C | Фізична теплота, МДж/м ³ | Хімічна теплота, МДж/м ³ | Ступінь конверсії, % |
| 0,7 | - | 6,88 | 7,24 | 85,88 | 1250 | 19,8 | 13,7 | - |
| 0,5 | 3,44 | 8,86 | 10,5 | 74,4 | 1060 | 13,36 | 20,14 | 12 |

При визначених гідромеханічних характеристиках шару і вибраній температурі газового теплоносія 1020-1040°C, експериментально досліджено вплив часу конверсії на середню температуру прогрівання біомаси, при різних розмірах тріски (рис.12) і різній товщині шару (рис.13), а також на втрату ваги шаром тріски товщиною 0,21 м. (рис.14). Показано, що зменшення характерного розміру біомаси менше 0,03 м знижує ефективність прогрівання шару біомаси в силу зменшення порозності і збільшення гідравлічного опору, а для шару товщиною 0,3-0,4 м, вихід летких з біомаси 30% вологістю закінчується за 25-30 хвилин.

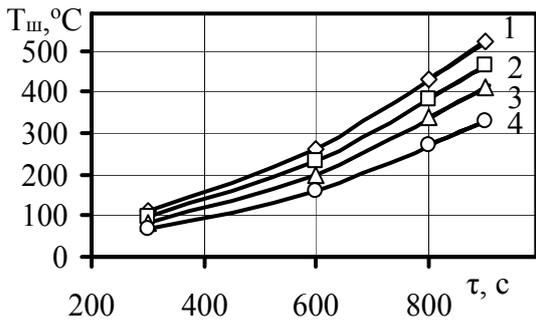


Рис.12 Залежність середньої температури прогрівання шару тріски товщиною 0,21 м, теплоносієм з температурою 1020-1040°C від часу конверсії і характерного розміру тріски, $d_{ек}$, м: 1-0,04, 2-0,03, 3-0,02, 4-0,01.

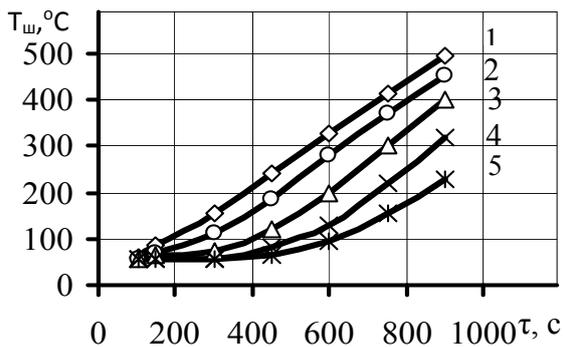


Рис.13 Залежність середньої температури прогрівання шару тріски теплоносієм з температурою 1020-1040°C від часу конверсії і різної товщини шару, h , м: 1-0,03, 2-0,09, 3-0,21, 4-0,27, 5-0,35.

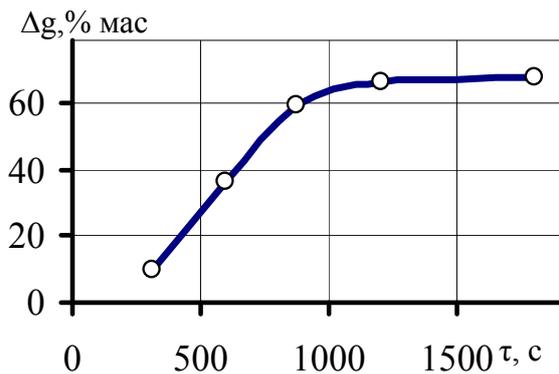


Рис.14 Втрата ваги (Δg) шаром тріски товщиною 0,21 м в залежності від часу конверсії при температурі теплоносія 1020-1040°C.

На рис.15 представлено залежності середньої температури шару від його товщини і середньої швидкості прогрівання. Показано, що швидкість прогрівання 0,97°C/c є достатньою щоб шар біомаси товщиною до 0,35 м і вологістю 30% нагріти до температури початку проходження екзотермічних реакцій. При підвищенні швидкості прогрівання, наприклад, до 8-10 °C/c, вихід біовуглецю падає на 10-12%, а неконденсованих продуктів утворюється більше на 50%, в зрівнянні з повільним піролізом. Зміна товщини шару чи

вологості біомаси потребують відповідного корегування часу конверсії чи характеристик теплоносія (рис.16).

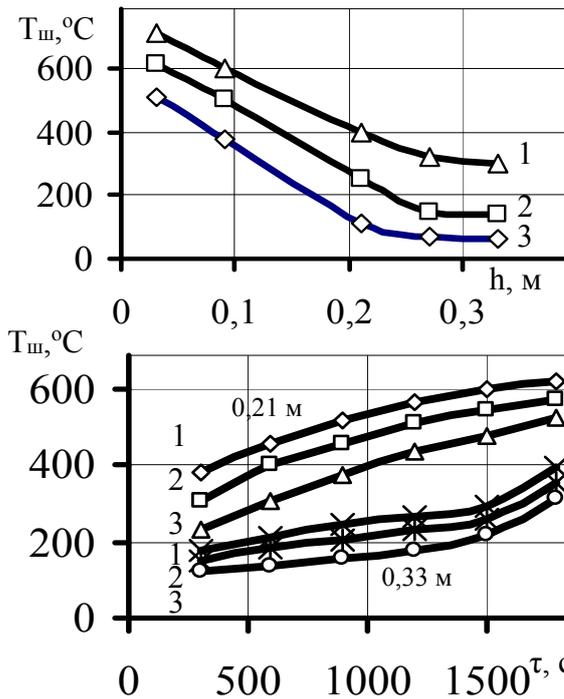


Рис.15 Залежність середньої температури прогрівання шару тріски теплоносієм з температурою 1020-1040 $^\circ\text{C}$ від товщини шару (h) і середньої швидкості прогрівання $t_r, ^\circ\text{C}/\text{с}$: 1-0,97, 2-0,58, 3-0,51.

Рис.16 Залежність середньої температури прогрівання шару тріски товщиною 0,21 м і 0,33 м від часу конверсії ($\tau, \text{с}$) і температури теплоносія, $T_{го}, ^\circ\text{C}$: 1-1110-1160, 2-1020-1040, 3-910-935.

Швидкість прогрівання впливає і на склад піролізного газу. Вже на початковій стадії процесу, в період швидкого підвищення температури, зафіксовано деяке збільшення концентрації метану (на 15-20 %) та зменшення (на 2-3%) концентрації водню і окису вуглецю (рис.17), що можна віднести на рахунок достатньо інтенсивного проходження реакцій утворення метану при даній температурі.

Середній склад газової фази, при температурі теплоносія $T_{го}-910-935^\circ\text{C}$, отриманий хроматографічним аналізом, приведений в табл. 2.

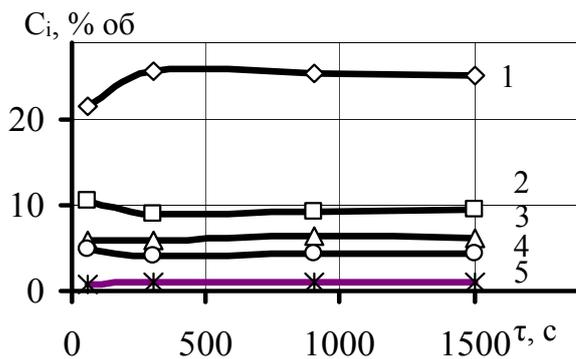


Рис.17 Залежність складу газової фази продуктів піролізу деревної тріски, від часу конверсії (τ) теплоносієм з температурою $T_{го}-910-935^\circ\text{C}$, 1-CH₄, 2-H₂, 3-CO₂, 4-CO, 5-C₂H₆.

Таблиця 2
Середній склад газової фази при температурі теплоносія 910-935 $^\circ\text{C}$

| Компоненти, об.% | | | | | | | | | | |
|------------------|------|-----------------|-------------------------------|-------------------------------|--------------------------------|-----------------|----------------|----------------|-------|--|
| H ₂ | CO | CH ₄ | C ₂ H ₆ | C ₃ H ₈ | C ₄ H ₁₀ | CO ₂ | O ₂ | N ₂ | Аргон | Q _{н^р} , МДж/нм ³ |
| 9,56 | 4,52 | 24,46 | 0,9 | 0,12 | 0,09 | 6,1 | 0,24 | 53,37 | 0,63 | 10,9 |

Проведені експериментальні дослідження окреслили межі технологічних та конструктивних параметрів процесу і отримані результати лягли в основу створення математичної моделі процесу та програми його розрахунку.

Третій розділ присвячено аналітичним дослідженням процесу з створенням математичної моделі процесу і програми його розрахунку та їх експериментальній верифікації.

Фізична модель реактора, в якому реалізується піролізний процес термохімічної конверсії рослинної біомаси, в загальному вигляді являє собою горизонтальну циліндричну камеру піролізу з шнеком, який забезпечує ущільнення і переміщення біомаси вздовж реактора.

Реактор має оболонку, куди з технологічної топки подається газовий теплоносій у вигляді продуктів неповного згоряння вуглеводневого газу. Вони віддають певну кількість теплоти біомасі через стінку реактора, а потім надходять у реактор і фільтруються через затиснутий рухомий шар біомаси. В результаті біомаса нагрівається до температури розкладу з виділенням летких речовин і біовуглецю.

Задача математичного моделювання полягає в знаходженні закономірностей розподілення температур твердої фази і газових компонентів та їх виходу по довжині реактора.

Допущення:

1. Для частинок біомаси довільної форми і розміру вводиться коефіцієнт, який враховує відмінність частинок від сферичної форми

$$\sigma = S_p \delta / v, \quad (5)$$

де S_p -площа поверхні частинки; δ -діаметр кулі, об'єм якої дорівнює об'єму частинки матеріалу; v -об'єм частинки.

2. Біомаса складається з баласту (волога, зола) і органічної частини, елементами якої є водень Н, вуглець С і кисень О. Їх вміст позначаємо через

$$\psi_i, i = 1 \dots 5, \sum_{i=1}^5 \psi_i = 1 \quad (6)$$

3. Склад продуктів піролізу органіки біомаси:

- вуглець у вигляді сажі, який може реагувати з газовими компонентами;
- газові компоненти : H_2 , CH_4 , CO_2 , CO ;
- вуглець біовуглецю, може реагувати з газовими компонентами.

Частки цих складових позначаємо через φ_{k0} , $k=1-6$ і визначаємо у відповідності з (6).

$$\sum_{k=1}^6 \varphi_{k0} = \varphi_{10} + \varphi_{20} + \varphi_{30} + \varphi_{40} + \varphi_{50} + \varphi_{60}, \quad (7)$$

$$\varphi_{10} = A\gamma\psi_3; \varphi_{20} = \gamma\psi_3; \varphi_{30} = 4(1-\gamma)\psi_3; \varphi_{40} = (11/3)(z-y); \varphi_{50} = (7/3)y; \varphi_{60} = 1-V$$

$$z = \psi_4 - \varphi_{10} - 3(1-\gamma)\psi_3 - \varphi_{60}; y = (1/4)(8z - 3\psi_5)$$

V - загальний вихід летких на робочу масу вихідної біомаси;

z - частка вуглецю, яка розподіляється між CO і CO_2 ;

y - частка кисню, яка розподіляється між CO і CO_2 .

4. Склад піролізного газу: CO_2 , CO , N_2 , H_2 , H_2O і CH_4 , які позначаються індексами 1-6.

5. В формулах (7) частина вихідного водню (γ) виділяється у вигляді H_2 , а решта-переходить у метан (CH_4).

6. Частка вуглецю у біовуглеці складає (φ_{60}), а решта C і O розподіляється між CO і CO_2 , так щоб задовольнити співвідношення матеріального балансу.

При визначенні виходу газових компонентів по довжині реактора приймаємо до уваги ендотермічні реакції:



Константи швидкості реакцій (8) для частинок вихідного матеріалу k_1 і k_2 розраховуються в ареніусівському наближенні по температурі твердої фази T_s ,

$$k_i = k_{i0} \exp\left[-\frac{E_i}{R(T_s + 273)}\right], \quad (9)$$

E_i -енергія активації, кДж/кмоль;

R -газова стала, Дж/(кг К);

k_1^* і k_2^* для частинок сажі в газі-по температурі газу T_g (розміри частинок сажі малі і дуже швидко нагріваються до температури газу)

$$k_i^* = k_{i0} \exp\left[-\frac{E_i}{R(T_g + 273)}\right], \quad i = 1, 2 \quad (10)$$

Загальний вихід летких на робочу масу вихідної біомаси визначається за рівнянням В.В.Померанцева

$$V = V_0 \sum_{i=1}^n C_{oi} (1 - e^{-k_i \tau}), \quad (11)$$

де V_0 -максимальна кількість летких, яка може видалитися при повному термічному розкладі органічної маси даного палива; n -число груп реакцій, які враховуються в процесі піролізу; C_{oi} -кількісна характеристика визначеної групи реакцій; τ -час піролізу; k_i -константа швидкості реакції.

Для якісної оцінки процесу піролізу рядом вчених (З.Ф. Чуханов, М.Ф. Струнников, В.В.Померанцев і ін.) рекомендується однокомпонентна схема розрахунку в рівнянні (11) де $n=1$; $C_{oi}=1$.

Динаміка виходу газової фази задається в залежності від локальної температури твердої фази T_s при допомозі функції ξ і визначається рівнянням

$$\Delta \varphi_k = \varphi_{k0} [\xi(T_s(x + \Delta x)) - \xi(T_s(x))], \quad (k = 1 \div 5); \quad (12)$$

Зміна виходу газових компонентів (G_j ($j=1-6$)) за рахунок реакцій (8) визначається за рівняннями в наступному вигляді:

$$\text{CO}_2 - \frac{dG_1}{dx} = \frac{\Delta \varphi_4 G_{s0}}{\Delta x} - \frac{G_2}{u_g} [Hk_i + C^* k_i^*]; \quad H = \frac{\sigma(1-P)}{\delta P}; \quad C^* = \frac{6G_{st} \rho_g}{G_g \rho_{st} \delta_{st}}; \quad (13)$$

де u_g -швидкість газу, P -порозність шару, δ -приведений діаметр частинки.

$$\text{CO} - \frac{dG_2}{dx} = \frac{\Delta\varphi_5 G_{s0}}{\Delta x} + \frac{1}{u_g} \left[2G_2 \frac{\mu_3}{\mu_2} (Hk_i + C^* k_i^*) + G_6 \frac{\mu_3}{\mu_6} (Hk_2 + C^* k_2^*) \right]; \quad (14)$$

$$\text{H}_2 - \frac{dG_4}{dx} = \frac{\Delta\varphi_2 G_{s0}}{\Delta x} + \frac{G_6 \mu_5}{u_g \mu_6} (Hk_2 + C^* k_2^*); \quad (15)$$

$$\text{H}_2\text{O} - \frac{dG_5}{dx} = \frac{\Delta\varphi_7 G_{s0}}{\Delta x} - \frac{G_6}{u_g} (Hk_2 + C^* k_2^*); \quad (16)$$

$$\text{CH}_4 - \frac{dG_6}{dx} = \frac{\Delta\varphi_3 G_{s0}}{\Delta x}; \quad (17) \quad \text{N}_2 - (G_3 = \text{const}). \quad (18)$$

Динаміка видалення вологи задається в залежності від локальної температури твердої фази T_s при допомозі функції ζ і визначається рівнянням

$$\Delta\varphi_7 = \varphi_{70} [\zeta(T_s(x + \Delta x)) - \zeta(T_s(x))]; \quad (19)$$

$$\text{вигорання вуглецю у біовуглеці} - \left(\frac{dG_s}{dx}\right)_b = -\frac{H}{u_g} (k_1 G_2 \frac{\mu_8}{\mu_2} + k_2 G_6 \frac{\mu_8}{\mu_6}); \quad (20)$$

$$\text{вигорання сажі в газі} - \left(\frac{dG_{st}}{dx}\right)_b = -\frac{C^*}{u_g} (k_1^* G_2 \frac{\mu_8}{\mu_2} + k_2^* G_6 \frac{\mu_8}{\mu_6}); \quad (21)$$

$$\text{вихід твердої фази} - \Delta G_s = -G_{s0} (\Delta\varphi_7 + \sum_{k=1}^5 \Delta\varphi_k) + \left(\frac{dG_s}{dx}\right)_b \Delta x; \quad (22)$$

$$\text{вміст часток сажі в газі} - \Delta\varphi_1^0 = \Delta\varphi_1 + (\Delta\varphi_1)_b; \quad (\Delta\varphi_1)_b = \left(\frac{dG_{st}}{dx}\right)_b \frac{\Delta x}{G_{s0}}; \quad (23)$$

Рівняння для визначення температур біовуглецю T_s і газу T_g мають вид:

$$dT_s / dx = A_1 + A_2 + A_3 + A_4 + A_5; \quad (24)$$

$$dT_g / dx = B_1 + B_2 + B_3 + B_4 + B_5; \quad (25)$$

Складові цих рівнянь визначаються наступними рівняннями:

1- врахування міжфазового теплообміну:

$$A_1 = \frac{\sigma\chi P_r^{1/3} \lambda_g u_g \rho_g}{4\delta\eta_g c_s \rho_s u_s} (T_g - T_s); \quad B_1 = \frac{\sigma\chi P_r^{1/3} \lambda_g (1-P)}{4\delta\eta_g c_g^* P} (T_s - T_g); \quad (26)$$

$$\chi = 1 - 1,164(1-P)^{2/3}; \quad (P \triangleright 0,4); \quad \chi = 0,56P - 0,052; \quad (P \leq 0,4);$$

2- тепловий потік від газової оболонки

$$A_2 = B_2 = \frac{Q_T}{LF}; \quad F = G_s c_s + G_g c_g + G_{st} c_{st}; \quad (27)$$

3- тепловий ефект хімічних реакцій (8):

$$A_3 = B_3 = \frac{1}{u_g F} \left[(Hk_1 + C^* k_1^*) \frac{Q_1 G_2}{\mu_2} + (Hk_2 + C^* k_2^*) \frac{Q_2 G_6}{\mu_6} \right]; \quad (28)$$

$$4- \text{випаровування вологи з біомаси} - A_4 = B_4 = -\frac{\Delta\varphi_7 G_{s0} Q}{F \Delta\chi}; \quad (29)$$

5- тепловий ефект виходу летких (Q° кДж/кг):

$$A_5 = B_5 = \frac{\sum_{k=1}^5 \Delta\varphi_k G_{s0} Q^\circ}{F \Delta\chi}; \quad (30)$$

Алгоритм розрахунку. Отримана система рівнянь (12-30) замкнута і її можна інтегрувати числовим методом. На першому кроці приймаються величини витрат G_{j0} і температур T_{g1} газових компонентів на виході з камери згоряння та задається деяке значення початкової температури газу T_{g0} . Тепловий потік, підведений до реактора, визначається з рівняння

$$Q_T = \omega T_{g1} \sum_{j=1}^7 G_{j0} \bar{c}_j(T_{g1}) - T_{g0} \sum_{j=1}^7 G_{j0} \bar{c}_j(T_{g0}), \quad (31)$$

де $\bar{c}_j(T)$ -середня питома теплоємність компоненту для температурного інтервалу $(0^\circ\text{C}-T)$; ω -втрати теплоти через стінку; T_{g0} -температура теплоносія на вході в реакційну камеру; G_{j0} -витрати газових компонентів на виході з камери згоряння; T_{g1} -температура газових компонентів на виході з камери згоряння.

Далі виконується інтегрування системи (12-30) і визначення середньої температури T_m двофазної суміші в камері піролізу реактора і теплового потоку між оболонкою і реактором

$$Q'_T = \left(\frac{1}{\alpha_1} + \frac{D_2 - D_1}{2\lambda_m} + \frac{1}{\alpha_2} \right)^{-1} \pi L \frac{D_2 + D_1}{2} \left(\frac{T_{gn} + T_{g0}}{2} - T_m \right), \quad (32)$$

де α_1 -коефіцієнт тепловіддачі від газу до стінки ; α_2 -коефіцієнт тепловіддачі від стінки до шару біомаси; T_m -середня температура двофазної суміші в камері піролізу реактора; D_1, D_2 -внутрішні діаметри реактора і оболонки відповідно; L -довжина реактора; λ_m -коефіцієнт теплопровідності матеріалу.

Порівнюючи величини теплових потоків Q_T і Q'_T здійснюється наступна ітерація при новій початковій температурі T_{g0} газу по (31). Процес ітерацій виконується до досягнення заданої точності розрахунків.

Описаний метод розрахунку реалізований в програмі WOOD (C++) і може бути використаний для полідисперсного складу сировини, а також більш повної стехіометричної схеми. Він дозволяє отримати детальну інформацію про параметри робочого процесу при різних навантаженнях та різних параметрах процесу.

Результати попередніх експериментальних досліджень процесу в стаціонарному режимі на лабораторній установці і результати аналітичних досліджень з використанням розробленої математичної моделі процесу термохімічної конверсії рослинної біомаси і програми його розрахунку, дозволили створити експериментальну модельну шнекову установку (рис.18), з повномасштабною реакційною камерою ($D_1=0,309\text{м}$, $D_2=0,325\text{м}$, $L=1,3\text{м}$), яка призначалася для відпрацювання технологічних параметрів і конструктивних особливостей установки та верифікації отриманих даних і їх уточнення в динаміці, в умовах реального процесу.

Приведено опис експериментальної установки, контрольно-вимірювальної та газоаналізуючої апаратури, методики проведення експериментів і результати експериментального дослідження.

Для експериментальних робіт використана деревна тріска до 30 мм. Склад робочої маси деревини при вологості $W^p = 30\%$: зольність $A^p = 0,7\%$,

$C^p=35,4\%$, $H^p=4,2\%$, $O^p=29,3\%$, $N^p=0,4\%$. Нижча теплота згоряння $Q_{н^p}=12,3$ МДж/кг. Процес отримання газового теплоносія здійснювався при допомозі газового пальника попереднього змішування (розробка ІТТФ), шляхом спалювання природного газу з нестачею повітря.

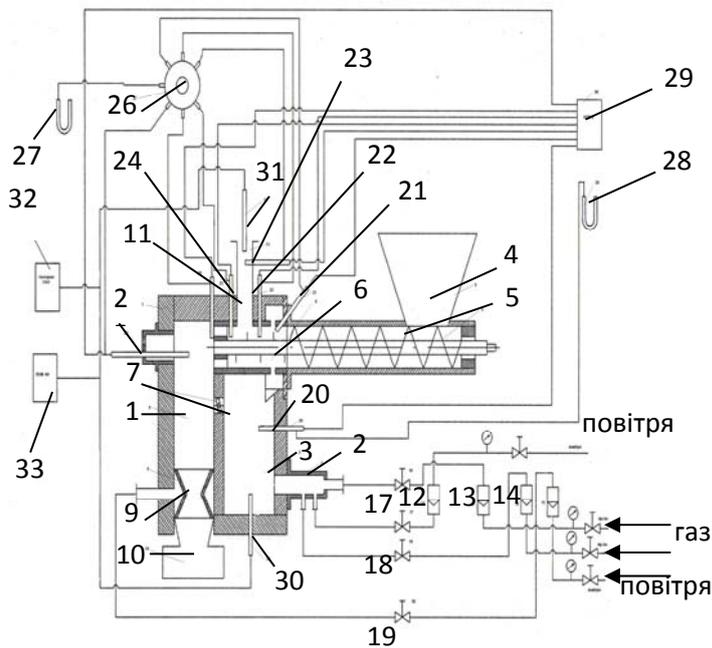


Рис.18 Схема модельної експериментальної установки для термохімічної конверсії рослинної біомаси: 1-корпус; 2-камера згоряння; 3-технологічна топка; 4-витратний бункер; 5-шнек; 6-реакційна зона; 7-регулююча заслінка; 8-шахта; 9-колосникова ґратка; 10-бункер біовуглецю; 11-камера допалювання пірогазу; 12-15-ротаметри; 16-19-регулююча арматура; 20-25-точки вимірювання температури і тиску; 26-28-реєстрація тиску; 29-реєстрація температури; 30, 31-точки забору проб газу на хімічний аналіз; 32, 33-прилади газового аналізу.

На експериментальній установці вимірювалися витрати, тиск, температура робочих тіл в характерних точках. Склад газових проб визначався на хроматографах «Газохром 3101» і ЛХМ-80.

В експериментах варіювалися наступні параметри: температура теплоносія, $T_{го}^{\circ}C$: 900-1160; температура процесу, $T_{ш}^{\circ}C$: 250-500; витрати біомаси, G_T кг/год: 25-100; вологість вихідної сировини, W^p %: 30-45;

Коректність експериментальних досліджень оцінювалася по матеріальному балансу. При розбіжності балансу більше 15% дослід виключався. Отримані результати представлені на рис. 19-23.

Досліджено вплив температури процесу на вихід летких і біовуглецю. Встановлено, що при досягненні шаром біомаси температури 450-500°C виділення летких завершується на 70% (рис.19). Їх теплота згоряння при прогріванні шару до температури 500°C коливається від 6000 до 7300 кДж/нм³.

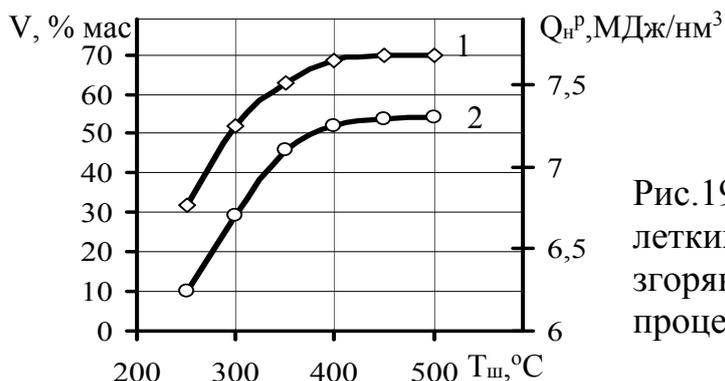


Рис.19 Залежність виходу летких (1) і їх теплоти згоряння (2), від температури процесу

На рис.20 приведена залежність складу піролізного газу і його теплоти згоряння, а також виходу і складу біовуглецю (рис.21) від температури процесу.

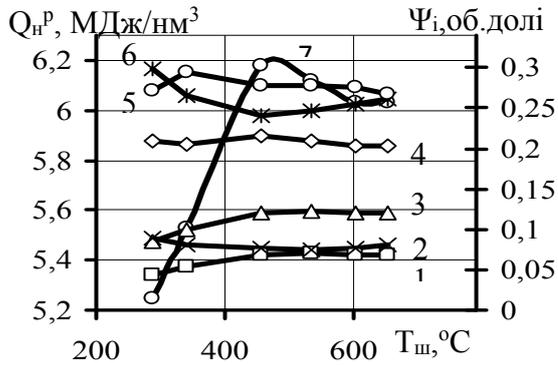


Рис.20 Залежність складу піролізного газу і його теплоти згоряння, від температури піролізу: 1- CH_4 , 2- CO , 3- CO_2 , 4- H_2 , 5- H_2O , 6- N_2 , 7- $Q_{н^p}$.

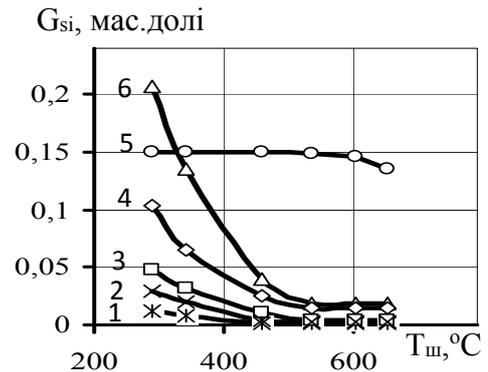


Рис.21 Залежність виходу біовуглецю і його складу, від температури піролізу, G_{si} : 1- H_2 , 2- CO , 3- CH_4 , 4- CO_2 , 5- C (біовуглець), 6-

Хроматографічний аналіз показав, що середній склад піролізного газу наступний, в % об.: H_2 -0,7; CO -5,43; CH_4 -12,51; C_2H_6 -0,2; C_3H_8 -0,23; CO_2 -7,17; O_2 -0,28; N_2 -62,73; A_r -0,75; $Q_{н^p}$ =6,56 МДж/нм³

За технічним аналізом біовуглець має склад: вуглець 70-80%, леткі до 15%, зольність 4-10%; вологість 4-10%. Проведені атестаційні випробування показали, що нижча теплота згоряння отриманого біовуглецю складає 24,75 МДж/кг. Такий біовуглець можна використовувати для подальшого пресування при виробництві твердого палива, газифікації і отримання силового газу, для виробництва добрива, в якості технічного сорбенту і т. ін.

Досліджено вплив вологості вихідної біомаси на її прогрівання до температури розкладу та на вихід і якість продуктів піролізу. Так, при зміні вологості біомаси вихід продуктів піролізу змінюється згідно графіків приведених на рис.22, де питомий вихід біовуглецю склав 0,13-0,17 кг/кг.

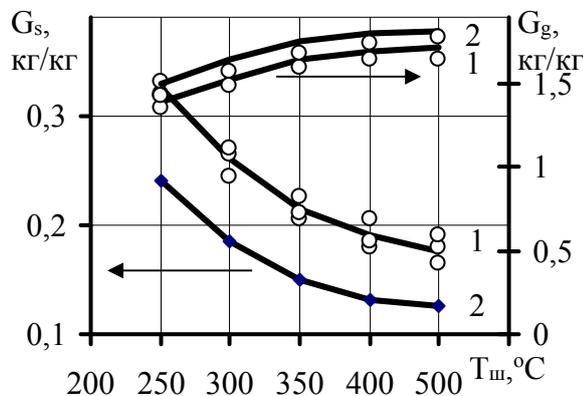


Рис.22 Залежність питомого виходу біовуглецю (G_s) і летких (G_g) від температури процесу ($T_{ш}$) та вологості біомаси (W^p , %): 1-30; 2-45.

Вихід газової фази летких склав до 1,8 кг/кг робочої маси. Це суміш конденсованих і неконденсованих продуктів, яку найбільш доцільно використовувати для спалювання в гарячому стані (без конденсації).

При цьому, графік продуктивності установки має лінійний характер (рис.23), що є наслідком стабільної роботи пальника, а також рівномірної подачі і переміщення біомаси в реакційній зоні та видалення біовуглецю з реактора шнековим живильником.

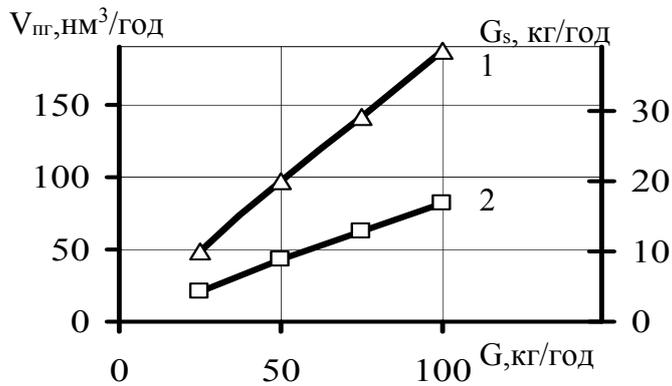


Рис.23 Продуктивність установки по: вихідній біомасі, G ; піролізному газу, $V_{пг}$ (1); біовуглецю G_s (2).

Дослідженнями показано високу ефективність процесів, які проходять в режимі «теплого удару» високотемпературним газовим теплоносієм ($1000-1100^\circ\text{C}$), що забезпечує середню швидкість підйому температури (до $1^\circ\text{C}/\text{c}$) і розрахований темп прогрівання шару біомаси різної вологості (рис.24), та виходу продуктів піролізу (рис.25) по довжині піролізної камери. Підтверджено вплив температури процесу на вихід піролізного газу (рис.26).

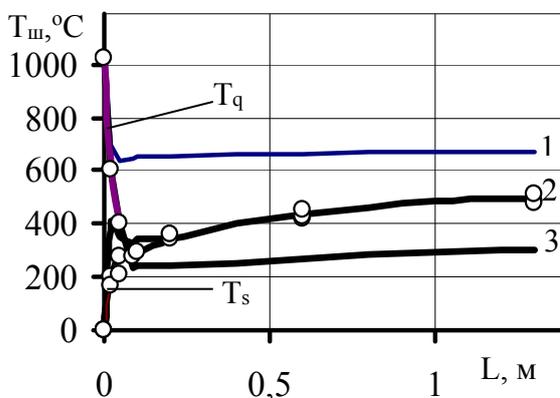


Рис.24 Вплив вихідної вологості біомаси (W_p) на середню температуру її прогрівання по довжині реактора (L), $W_p, \%$: 1-20, 2-30, 3-40.

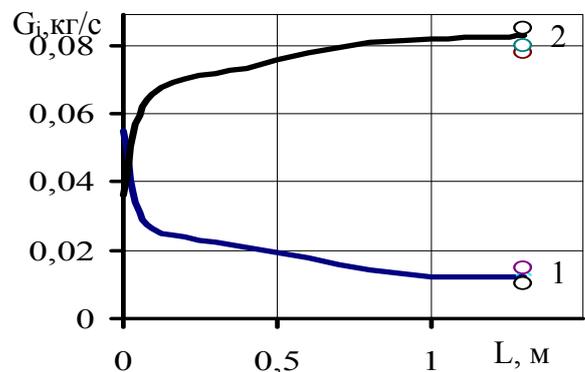


Рис.25 Вихід біовуглецю (1) і летких (2) з біомаси вологістю 30%, по довжині реактора (L).

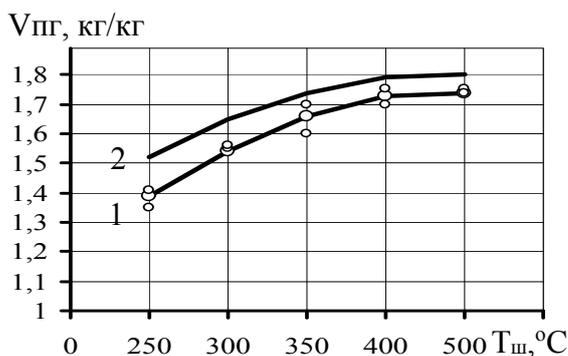


Рис.26 Залежність виходу піролізного газу ($V_{пг}$) від температури процесу і вихідної вологості біомаси, $W_p, \%$: 1-30, 2-45.

Як видно, експериментальні результати (0-експериментальні точки) добре корелюються з результатами розрахункових досліджень (розбіжність в межах 15-20%), що вказує на адекватність математичної моделі реальному процесу.

Проведені дослідження дозволили визначити технологічні параметри процесу і розрахувати конструктивні особливості обладнання для його реалізації. Так, наприклад, для термохімічної конверсії рослинної біомаси, при витраті 0,06кг/с і температурі процесу ($T_{ш}=450-500^{\circ}\text{C}$), час перебування біомаси в піролізній зоні становить до 30 хвилин. Для цього довжина реакційної зони (діаметром $D_1=0,295\text{м}$) повинна бути не менше $L=1,3\text{м}$, а товщина затиснутого шару-1,2-1,5 діаметру розвантажувального шнеку (0,285м), що формується відповідними характеристиками шнекового живильника (діаметр-0,14м, крок витка-0,11м, пресуюча спроможність-14-15%, оберти шнеку-до 10 об/хв.).

За результатами досліджень розроблені рекомендації по конструюванню шнекового реактора та вибору допоміжного обладнання при створенні енерготехнологічних установок.

У четвертому розділі представлені розроблені і створені установки для термохімічної конверсії рослинної біомаси в піролізний газ і біовуглець і їх характеристики. Так, на рис.27 приведена дослідна енерготехнологічна установка ЕТУ-1. Її продуктивність складає по: деревній біомасі до 200кг/год; біовуглецю-30-35кг/год; піролізному газу до 300 м^3 /год, з теплотою згоряння-до 6,6МДж/ м^3 . В установці в якості газового теплоносія застосовані продукти неповного згоряння природного газу. Введення в теплоносій надлишкової кількості природного газу дозволяє не тільки стабілізувати режим піролізу і покращити якість піролізного газу при зміні вологості біомаси чи технологічного режиму, але й дає можливість додатково науглероджувати біовуглець і підвищувати його механічні та теплотехнічні характеристики. В перспективі, шляхом науглероджування біовуглецю можна отримувати нові вуглемісткі матеріали з заданими характеристиками.

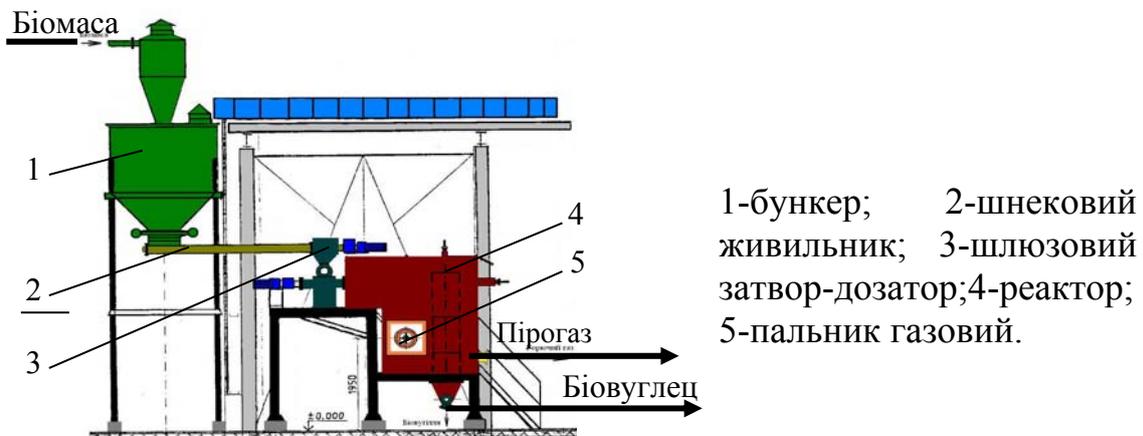


Рис.27 Енерготехнологічна установка ЕТУ-1 для термохімічної конверсії рослинної біомаси в піролізний газ і біовуглець

Подальшого розвитку розроблена технологія отримала в експериментальній установці ЕТУ-200 (патент України на корисну модель №79797), яка представлена на рис.28. Її продуктивність складає по: деревній біомасі до 200кг/год; біовуглецю до 45 кг/год; горючому газу до 160 нм³/год, з теплотою згоряння до 8,5 МДж/нм³.

Відмінність даної схеми полягає в тому, що теплоносієм є продукти неповного згоряння піролізного газу отриманого в ході термохімічної конверсії і основна маса (75-80%) їх теплоти передається шару біомаси через стінку. Решта теплоносія після теплообмінника і очистки фільтрується протитоком через затиснутий рухомий шар біовуглецю для його охолодження і науглероджування. Це дозволяє зменшити розбавлення горючого газу негорючими компонентами продуктів неповного згоряння і підвищити його теплоту згоряння на понад 30%. Суттєвою перевагою такої схеми є відсутність необхідності підведення природного газу, що робить установку більш мобільною і наближеною до ресурсної бази.

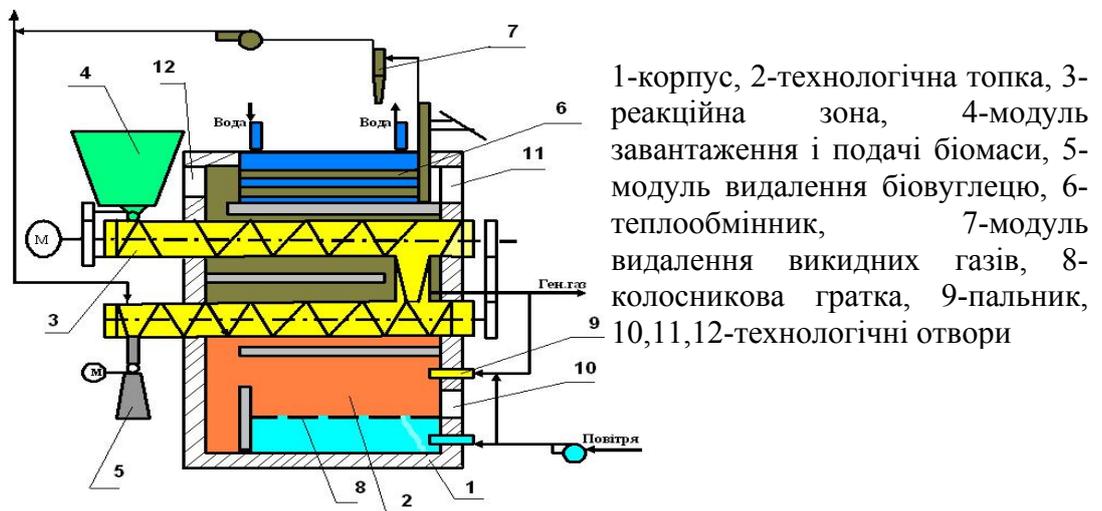


Рис.28 Модель дослідної установки ЕТУ-200 для термохімічної конверсії рослинної біомаси в піролізний газ і біовуглець

Важливою перевагою даних установок є безвідходність і можливість піддавати термохімічній конверсії дрібно фракційну рослинну біомасу з високою вологістю (50-55%). Зокрема, крім тріски, досліджувалися кора, лузга соняшника, насіння буряка, фрезерний торф.

В заключній частині четвертого розділу приведені рекомендовані технологічні схеми і рекомендації для ефективного впровадження розроблених установок. Продукти термохімічної конверсії ЕТУ-1 при реалізації способу двоступеневого спалювання твердого палива (патент України №52297) можна ефективно використовувати в різних теплоенергетичних установках, зокрема, в пиловугільних котлах (патент України на корисну модель №.41705). При цьому, економиться основне

викопне паливо і до 10% природного газу, що використовується для підсвітки, а також зменшуються шкідливі викиди у довкілля.

Установку ЕТУ-200 можна використовувати і в когенераційних системах енергозабезпечення, зокрема для живлення двигунів внутрішнього згоряння, оскільки піролізний газ практично не містить смол (менше $0,5\text{г/м}^3$). При забезпеченні тепловою і електричною енергією населеного пункту з використанням когенераційних установок тарифи на теплову і електричну енергію можуть бути зменшені на 20%.

Попередні розрахунки показників економічної ефективності розробленої технології свідчать про перспективність її впровадження як на енергетичних, так і комунальних об'єктах України. Впровадження тільки однієї установки (продуктивністю 200кг/год біомаси) може забезпечити заміщення біля 300тис.м^3 природного газу на рік і вироблення $250\text{-}280\text{т}$ біовуглецю. При врахуванні всіх витрат на даний час термін окупності установки складе до 2 років.

З екологічної точки зору запропонована технологія є безвідходна, вона дозволяє скоротити викиди парникових газів (CO_2 , CH_4) до 40% за рахунок скорочення витрат викопних палив і довготривалого відтермінування викидів вуглецю у довкілля.

ВИСНОВКИ

1. Показано, що одним з найбільш ефективних шляхів використання рослинної біомаси є її комплексна піролізна конверсія в енергетичні і супутні продукти з високими споживчими характеристиками.

2. Удосконалено технологію термохімічної конверсії рослинної біомаси в піролізний газ і біовуглець на базі піролізного процесу, що реалізується в шнековому реакторі з комбінованим підведенням теплоти через стінку і при фільтрації газового теплоносія через затиснутий рухомий шар біомаси, що дозволило підвищити ефективність конверсії біомаси і зменшити питомі масогабаритні показники обладнання.

3. Вперше досліджено і випробувано використання продуктів неповного згоряння вуглеводневих газів як газового теплоносія, що дозволило підвищити стабільність процесу і характеристик піролізного газу та дає можливість покращувати механічні характеристики біовуглецю.

4. Вперше експериментально отримано газовий теплоносій при змішаній конверсії природного газу в продуктах неповного згоряння з загальним надлишком повітря $0,5$, що дозволило підвищити його теплотехнічні характеристики.

5. Експериментально досліджені і уточнені основні гідромеханічні характеристики полідисперсного шару тріски нерегулярної форми дозволили визначити граничні параметри шару (товщину, фракційний розмір і дійсну швидкість фільтрації) та уточнити закономірності гідравлічного опору шару.

6. Розроблена математична модель і програма розрахунку запропонованого процесу термохімічної конверсії були побудовані на

стехіометричній схемі ендотермічних реакцій і розрахунку констант швидкостей реакцій в ареніусівському наближенні, завдяки чому удосконалено і спрощено розрахунки піролізного процесу.

7. На базі запропонованого методу розрахунку та експериментальних досліджень визначені основні технологічні параметри процесу (температура: теплоносія 1000-1100 °С, процесу 450-500 °С, час конверсії до 30 хвилин) та конструктивні особливості (реакційна зона не менше 1,3 м, зона, яка необхідна для формування затиснутого шару, складає 1,2-1,5 діаметру шнеку).

8. На основі виконаних досліджень розроблено рекомендації щодо розрахунку технологічних параметрів процесу, основ конструювання реактора, вибору допоміжного обладнання та запропоновані технологічні схеми використання установок.

9. Розроблена, виготовлена і випробувана установка продуктивністю до 200 кг/год рослинної біомаси, яка продукує до 300 нм³/год горючого газу з теплотою згоряння до 6,6 МДж/нм³ і 30-35 кг/годину біовуглецю і дозволяє до 40% скоротити шкідливі викиди. Термін окупності установки біля 2 років

10. Вперше розроблена і створена діюча модель енерготехнологічної установки, де в якості газового теплоносія є продукти неповного згоряння власного піролізного газу, яка є мобільною і наближеною до ресурсної бази біомаси.

СПИСОК ОСНОВНИХ ОПУБЛІКОВАНИХ ПРАЦЬ ЗА ТЕМОЮ ДИСЕРТАЦІЇ

1. Скляренко Е.В. Исследование процесса термохимической конверсии растительной биомассы в горючий газ и биоуглерод на установке шнекового типа / Е.В. Скляренко, Б.Д. Билека // Энерготехнологии и ресурсосбережение.-2016.-№2.-С. 43-49. (Індексується у Ulrich's Periodicals Directory).

Автор виконав огляд і аналіз матеріалів щодо використання рослинної біомаси в теплоенергетиці, розробку технологічної схеми і обґрунтування її ефективності.

2. Носач В.Г. Об эффективности производства тепловой и электрической энергии из древесины / В.Г. Носач, А.А. Шрайбер, Е.В. Скляренко // Промышленная теплотехника.-2004.-т.26, №3.-С. 54-57.

Автор виконав огляд і аналіз матеріалів щодо використання рослинної біомаси в теплоенергетиці, розробку технологічної схеми і обґрунтування її ефективності.

3. Носач В.Г. Исследование термохимической переработки древесины в жатом подвижном и фильтруемом слое / В.Г. Носач, Е.В. Скляренко, В.И. Родионов // Промышленная теплотехника.-2005.-т.27, №5.-С. 66-69.

Автором виконано експериментальне дослідження процесу, аналіз та обробку результатів досліджень.

4. Баштовой А.И. Математическое моделирование процесса газификации древесины / А.И. Баштовой, Е.В. Скляренко // Промышленная теплотехника.-2006.-т.28, № 6.-С. 71-77.

Автором розроблена фізична модель реактора і експериментально визначені вихідні дані для математичної моделі і програми розрахунку.

5. Носач В.Г. Использование продуктов термохимической переработки древесины в пылеугольных котлах / В.Г. Носач, А.А. Рудник, Е.В. Скляренко // Промышленная теплотехника.-2008.-т.30, № 3.-С. 27-29.

Автором проведено обґрунтування ефективності використання продуктів термохімічної конверсії деревини, при спалюванні низькосортного вугілля в пиловугільних котлах.

6. Носач В.Г. Биоэнергетика будущего / В.Г. Носач, Е.В.Скляренко // Энергетика та електрифікація.-2008.-№4.-С. 39-42.

Автором проаналізовано шляхи розвитку біоенергетики в Україні.

7. Билека Б.Д. Пути улучшения тепловых и экологических характеристик когенерационных установок с приводом от газотурбинных и газопоршневых двигателей. / Б.Д. Билека, В.Я. Кабков, Е.В. Скляренко, В.Н. Погожев //Авиационно-космическая техника и технология.-2011.-№ 10.-С. 34-37. Автор приймав участь у проведенні експериментальних досліджень по нейтралізації шкідливих викидів поршневими когенераційними установками, обробці та аналізі дослідних даних.

8. Nosach V.G. Mathematical modeling of heat and mass transfer in a concentrated disperse system with chemical reactions / V.G Nosach, A.A. Shraiber, E.V Sklyarenko // Proc. 10 Workshop «Two-Phase Flow Predictions». Halle: Martin – Luther University.-2002.-P. 412-417.

9. Скляренко Е.В. Энерготехнологическая установка для переработки растительной биомассы / Е.В.Скляренко, Б.Д. Билека //Промышленная теплотехника.-2015.-т.37, №7.-С.122.

10. Патент на винахід 43070 А Україна, МПК С10В 53/02 Спосіб піролізу деревини [Текст] / Носач В.Г. Іванова Л.І., Яворовський П.П., Скляренко Є.В., Родіонов В.І.; власник: Інститут технічної теплофізики НАН України.- № 2001020750; заявл.: 02.02.2001; публ.: 15.11.2001, Бюл. № 10.

11. Патент на корисну модель UA 52297 А Україна, МПК F23B1/14. Спосіб двоступеневого спалювання твердого палива [Текст] / Носач В.Г., Скляренко Є.В., Родіонов В.І.; власник: Інститут технічної теплофізики НАН України.-№ 2002042675; заявл.: 03.04.2002; публ.: 16.12.2002, Бюл. № 12.

12. Патент на корисну модель UA 41705 Україна, МПК F 23 В 90/00 Спосіб використання біомаси для отримання теплоти [Текст] / Носач В.Г., Скляренко Є.В.; власник: Інститут технічної теплофізики НАН України.-№ U 2008 09636; заявл.: 23.07.2008; публ.: 10.06.2009, Бюл. № 11.

13. Патент на корисну модель UA 79797 U Україна, МПК С10В 51/00. Установка для енерготехнологічної переробки біомаси [Текст] / Білека Б.Д., Погожев В.М., Скляренко Є.В.; власник: Інститут технічної теплофізики НАН України.-№ u 201214465; заявл.:17.12.2012; публ.: 25.04.2013, Бюл. № 8.

14. Патент на винахід UA 102789 C2 Україна, МПК C10B 51/00, C10B 53/02, C10B 53/00, C10J 3/00, F23J 15/00, F23G 5/027, F23G 7/00, F23L 15/00. Спосіб енерготехнологічної переробки біомаси [Текст] / Носач В.Г., Басок Б.І., Білека Б.Д., Демиденко С.К., Погожев В. М., Скляренко Є.В.; власник: Інститут технічної теплофізики НАН України.-№ а 2012 07752; заявл.: 25.06.2012; публ.: 12.08.2013, Бюл. № 15.

АНОТАЦІЯ

Скляренко Є.В. Створення піролізної технології та установки для термохімічної конверсії рослинної біомаси.

Дисертація на здобуття наукового ступеня кандидата технічних наук за спеціальністю 05.14.06 – Технічна теплофізика та промислова теплоенергетика. Інститут технічної теплофізики НАН України, Київ, 2017

Дисертація присвячена теоретичному і експериментальному дослідженню процесу термохімічної конверсії рослинної біомаси, направленому на підвищення ефективності використання її енергетичного потенціалу. Суть технології полягає в термохімічній конверсії рослинної біомаси в піролізний газ і біовуглець при фільтрації продуктів неповного згоряння вуглеводневого газу через затиснутий рухомий шар.

Дослідження процесу проводились на експериментальних установках і з використанням розробленої математичної моделі і програми його розрахунку.

Досліджувалися теплотехнічні і геометричні параметри процесу та фактори, які впливають на його ефективність: температура, час перебування, гідравлічний опір затиснутого шару, вологість вихідної біомаси, характеристики теплоносія. Результати досліджень використані для розробки пілотного зразка енерготехнологічної установки продуктивністю до 200 кг/год деревної біомаси. Установка може бути використана при адаптації існуючих промислових котлів до рослинної біомаси як палива для скорочення витрат викопних палив та шкідливих викидів.

Попередні розрахунки показників економічної ефективності технології свідчать про перспективність її впровадження на енергетичних об'єктах України.

Ключові слова: енергоефективність, скорочення шкідливих викидів, рослинна біомаса, термохімічна конверсія, піролізний газ, біовуглець, шнекова експериментальна установка.

ABSTRACT

Sklyarenko E.V. Creation of pyrolysis technology and installation for thermochemical conversion of plant biomass

The Dissertation is for competition of the scientific degree of candidate of technical sciences in specialty 05.14.06 – Engineering thermo physics and industrial heat power engineering. Institute of Engineering Thermophysics of National Academy of Sciences of Ukraine, Kiev, 2017.

The Dissertation is dedicated to theoretical and experimental research of the process of thermochemical conversion of plant biomass directed at the increase in the efficiency of using its power capacity. The essence of technology lies in thermochemical conversion of plant biomass into pyrolysis gas and bio carbon, during the filtration of products of incomplete combustion of hydrocarbon gas through pressed mobile layer.

The Research of the process have been conducted at experimental plants using the developed mathematical model and program of its calculation.

Heat and technical and geometric parameters of the process and factors that influence its efficiency: a temperature, a residence time, pressure loss of the pressed layer, humidity of the initial biomass, characteristics of the heat carrier have been made. Results of research have been used for development of pilot sample of power technology plant with capacity up to 200 kg/h of wood biomass. Plant can be used in the adaptation of existing industrial boilers to plant biomass as fuel, for reduction of fossil fuel rate and harmful emissions.

Preliminary calculation of indicators of the economic efficiency of technology testifies to prospects of its introduction to energy facilities of the Ukraine.

Keywords: power efficiency, reduction of harmful emissions, plant biomass, thermochemical conversion, pyrolysis gas, bio carbon, experimental plant.

АННОТАЦИЯ

Скляренко Е.В. Создание пиролизной технологии и установки для термохимической конверсии растительной биомассы.

Диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук по специальности 05.14.06 – Техническая теплофизика и промышленная теплоэнергетика. Институт технической теплофизики НАН Украины, Киев, 2017.

Диссертация посвящена теоретическому і експериментальному дослідженню процесу термохимической конверсии растительной биомассы, направленному на повышение эффективности использования ее энергетического потенциала.

Суть технологии заключается в термохимической конверсии растительной биомассы в пиролизный газ и биоуглерод при фильтрации продуктов неполного сгорания углеводородного газа через зажатый подвижный слой. Основная идея процесса заключается в проведении пиролиза растительной биомассы в режиме «теплового удара» высокопотенциальным газовым теплоносителем, что позволяет за короткий промежуток времени перевести ее значительную часть органики в газовую фазу, уменьшить выход смол и закончить процесс на стадии отгонки летучих и биоуглерода.

Особенности процесса позволяют получить і дополнительные преимущества:

- газовый теплоноситель в виде продуктов неполного сгорания углеводородного газа обеспечивает высокую стабильность процесса и характеристик пиролизного газа, а также дает возможность улучшать механические характеристики биоуглерода и создавать новые углеродсодержащие материалы.

- зажатый слой препятствует механическому выносу частиц биомассы, позволяет форсировать скорость фильтрации газового теплоносителя и интенсифицировать тепломассообменные процессы в реакционной зоне, а также увеличивает коэффициент заполнения реактора, что повышает производительность установки и уменьшает ее массогабаритные характеристики;

- шнек обеспечивает шуровку слоя и равномерное перемещение биомассы по длине реактора, что позволяет улучшить тепломассообменные процессы и получить биоуглерод одинакового качества, без обгара и комкования.

Исследования процесса проводились на экспериментальных установках с использованием разработанной математической модели и программы его расчета.

Исследовались теплотехнические и геометрические параметры процесса и факторы влияющие на его эффективность: температура, время пребывания, гидравлическое сопротивление зажатого слоя, влажность исходной биомассы, характеристики теплоносителя. Результаты исследований использованы для разработки пилотного образца энерготехнологической установки производительностью до 200 кг/час растительной биомассы. Установка может быть использована при адаптации существующих промышленных котлов к растительной биомассе как топливу для сокращения расхода ископаемых топлив и вредных выбросов.

Предварительные расчеты показателей экономической эффективности технологии свидетельствуют о перспективности ее внедрения на энергетических объектах Украины. Внедрение только одной установки (производительностью 200кг/час биомассы) позволяет заместить около 300тыс.м³ природного газа в год и произвести 250-280 т биоуглерода. При учете всех затрат на сегодня срок окупаемости установки составит до 2 лет.

С экологической точки зрения разработанная технология есть безотходной. Она позволяет сократить выбросы парниковых газов (СО₂, СН₄) до 40% за счет сокращения расходов традиционных ископаемых топлив и длительной отсрочки выбросов углерода в окружающую среду.

Ключевые слова: энергоэффективность, сокращение вредных выбросов, растительная биомасса, термохимическая конверсия, пиролизный газ, биоуглерод, шнековая экспериментальная установка.