

**НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ БІОРЕСУРСІВ
І ПРИРОДОКОРИСТУВАННЯ УКРАЇНИ**

Факультет конструювання і дизайну

ДОПУСКАЄТЬСЯ ДО ЗАХИСТУ
Завідувач кафедри
технічного сервісу та інженерного
менеджменту ім. М.П. Момотенка
(назва кафедри)

_____ Роговський І. Л.
(підпис) (ПІБ)

“ _____ ” _____ 2025 р.

ДИПЛОМНИЙ ПРОЄКТ БАКАЛАВРА
на тему «Розробка конструкції камери піролізу установки з терміко-хімічної
конверсії біомаси в піролізний газ і оливу»

Спеціальність 133 «Галузеве машинобудування»

Гарант освітньої програми

Д.т.н., професор
(науковий ступінь та вчене звання)

_____ (підпис)

Булгаков В.М.
(ПІБ)

Керівник дипломного проєкту бакалавра

К.т.н., доцент
(науковий ступінь та вчене звання)

_____ (підпис)

Цивенкова Н.М.
(ПІБ)

Виконав

_____ (підпис)

Олексієнко Д.В.
(ПІБ студента)

КИЇВ – 2025

РЕФЕРАТ

В дипломному проєкті удосконалено конструкцію піролізної установки – камери піролізу, для підвищення ефективності виробництва піролізної оливи та біовугілля. З метою вибору прототипу камери піролізу досліджено конструкції піролізних установок, що працюють на аграрній рослинній сировині та типові технологічні процеси виробництва зазначених видів біопалив.

Прийнято рішення розробити камеру високотемпературного піролізу, так як вказана конструкція забезпечує мінімальне виробництво біовугілля та оливи і максимальне виробництво газу з низькою теплотою згорання, що робить його, після стискання, придатним до перевезень на значні відстані. Виконано математичні розрахунки, на основі яких удосконалено камеру піролізу, що є на 18,5 % ефективнішою за відомі на ринку аналоги за готовим продуктом (газом та оливою). Біовугілля в невеликій кількості отримуємо як супутній продукт.

Мета робота – розробити конструкцію камери піролізу установки з терміко-хімічної конверсії біомаси в піролізний газ і оливу.

Перший розділ дипломного проєкту присвячено перспективності напрямку та аналізу досліджень з піролізу твердої рослинної біомаси, зокрема аграрного походження. Наведено характеристики біомаси та основи технології її піролітичного розкладання, а також апаратне оформлення процесу піролізу.

В другому розділі проаналізовано технологічні процеси піролізу біомаси та обрано найбільш придатний з них для умов фермерських господарств. Розроблено технологічний процес піролізу аграрних рослинних залишків.

В третьому розділі проаналізовано конструкції установок піролізу рослинної біомаси. Обрано конструкцію-прототип та удосконалено її шляхом розробки та заміни основного вузла – камери піролізу. Виконано розрахунки вузлів камери піролізу, виходячи із заданої продуктивності та виду продукту.

Четвертий розділ містить заходи з охорони праці.

П'ятий розділ містить економічні розрахунки доцільності конструкторських рішень.

Ключові слова: біомаса, камера піролізу, біовугілля, олива, піролізний газ.

ЗМІСТ

ВСТУП.....	10
РОЗДІЛ 1. АНАЛІЗ ДОСЛІДЖЕНЬ ПАРАМАТРІВ ЛІГНОЦЕЛЮЛОЗНОЇ БІОМАСИ ТА ПРОЦЕСІВ ЇЇ ПІРОЛІЗУ.....	12
1.1. Аналіз хімічного складу та будови лігноцелюлозної біомаси для виробництва палив другого покоління шляхом піролізу...	13
1.2. Аналіз основних видів процесу піролізу лігноцелюлозної біомаси.....	17
1.3. Аналіз параметрів, що впливають на ефективність процесу піролізу лігноцелюлозної біомаси.....	22
1.4. Основні напрямки застосування продуктів процесу піролізу біомаси в енергетиці.....	32
1.5. Висновки до розділу 1.....	33
РОЗДІЛ 2. ТЕХНОЛОГІЧНА ЧАСТИНА.....	34
2.1. Аналіз методів попередньої підготовки лігноцелюлозної біомаси до піролізу.....	34
2.2. Аналіз технологій піролізу рослинної біомаси.....	37
2.3. Розробка технологічної схеми попередньої підготовки деревної біомаси до піролізу.....	40
2.4. Розробка технологічної схеми піролізу деревної біомаси.....	48
2.5. Висновки до розділу 2.....	52

РОЗДІЛ 3. КОНСТРУКТОРСЬКА ЧАСТИНА.....	53
3.1. Аналіз конструкцій камер піролізу лігноцелюлозної біомаси..	53
3.2. Вибір прототипу установки піролізу деревини та розробка методики розрахунку.....	62
3.3. Розрахунок параметрів установки з терміко-хімічної конверсії деревини в піролізний газ і оливу.....	69
3.4. Обґрунтування конструкції установки з терміко-хімічної конверсії деревини в піролізний газ і оливу.....	75
3.5. Висновки до розділу 3.....	80
РОЗДІЛ 4. ТЕХНІКА БЕЗПЕКИ ТА ПОЖЕЖНА БЕЗПЕКА.....	81
4.1. Вимоги техніки безпеки, які висуваються до установки піролізу деревинних пелет.....	81
4.2. Вимоги пожежної безпеки до установки піролізу деревних пелет.....	84
4.3. Висновки до розділу 4.....	86
РОЗДІЛ 5. ЕКОНОМІЧНА ЧАСТИНА.....	87
5.1. Економічні розрахунки за проектом.....	87
5.2. Висновки до розділу 5.....	90
ВИСНОВКИ.....	91
СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ.....	92

ПЕРЕЛІК УМОВНИХ ПОЗНАЧЕНЬ

$h_{\text{реак. камери}}$ – висота від місця встановлення фурм в камері піролізу до камери нагнітання, м;

$r_{\text{отв}}$ – відстань між центрами отворів піролізної камери, м;

$N_2^{\text{пірол. газ}}$ – вміст N_2 в піролізному газі, %;

$D_{\text{пірол. камера}}$ – діаметр піролізної камери, м;

$D_{\text{сек. под. аг. дут.}}$ – діаметр секції подачі агенту дуття до нагнітальної камери, м;

$n_{\text{прод. сух. перегонки}}$ – кількість виробленого з деревини сухого газу після очищення від решти продуктів піролізу, м³/кг;

$\xi_{\text{отв}}$ – коефіцієнт витікання агенту дуття з отвору;

$Q_H^{\text{деревини}}$ – нижча теплота згоряння деревини, кДж/кг;

$V_{\text{аген. дут.}}$ – об'ємні витрати агенту дуття установкою при роботі в режимі газифікації, м³/год;

$\mu_{\text{біовуг}}$ – періодичність вивантаження біовугілля, год;

λ – коефіцієнт втрат деревних пелет при завантаженні піролізної установки;

τ – коефіцієнт доплат до посадового окладу (1,3);

γ – коефіцієнт запасу бункера установки хіміко-термічного розкладання деревини в режимах піролізу та газифікації;

ζ – коефіцієнт, що враховує відсоток піролізного газу в загальній кількості продуктів піролізу деревини;

μ – періодичність, з якою завантажується бункер установки деревиною, год;

ζ_1 – коефіцієнт експлуатації піролізної установки залежно від сумарного часу її роботи, $\zeta=0,98$;

$V_{\text{агент. дут.}}$ – швидкість фільтрації агенту дуття, м/с;

$\rho_{\text{біовуг}}$ – насипна щільність біовугілля, кг/м³;

$\rho_{\text{деревина}}$ – насипна щільність деревини, кг/м³.

$\eta_{\text{пір. уст.}}$ – коефіцієнт корисної дії піролізної установки;

Δp_1 – опір просвітів колосника, кгс/м²;

$(\text{ЧВ}_6 + \text{ЧВ}_6)/(\text{РЕВ}_m + \text{КЕЕ}_m)$ – зміна часу роботи удосконаленої піролізної установки порівняно з базовою, год;

$S_{\text{просвіт}}, S_{\text{колосн.}}$ – площа просвіту та колосника, м^2 ;

b_1, β_1 – ширина колоснику і просвіту, м;

$d_{\text{гідр.}}$ – гідравлічний діаметр колосників, м;

$D_{\text{установ.}}$ – діаметр корпусу установки хіміко-термічного розкладання деревини в режимах піролізу та газифікації, м;

$h_{\text{к.в.-к.р}}$ – відстань від колосникової решітки до торця камери піролізу, мм;

$h_{\text{пірол.камери}}$ – висота камери піролізу, м;

$m_{\text{отв}}$ – кількість отворів піролізної камери, шт;

S – площа живого перетину колосникової решітки, м^2 ;

U – теплове напруження піролізної камери, $\text{кДж}/\text{м}^2 \cdot \text{год}$;

$V_{\text{бункер}}$ – об'єм бункера установки термічної переробки деревини, м^3 ;

$V_{\text{деревини}}$ – витрати деревини на процес піролізу, $\text{кг}/\text{год}$;

$V_{\text{корп.біовуг}}$ – об'єм частини корпусу, де накопичується біовугілля в установці термічної переробки деревини, м^3 ;

$V_{\text{піроліз.газ}}$ – об'ємне продукування піролізного газу установка хіміко-термічного розкладання біомаси (УХТРБ), $\text{м}^3/\text{год}$;

$V_{\text{піроліз.газ/рік}}$ – річне виробництво піролізного газу удосконаленою піролізною установкою за поточний рік, натур. од.;

$W_{\text{деревини}}$ – відносна вологість деревини, %;

z_1, z_2 – довжина колосників та перегородок, м;

$БВ$ – балансова вартість піролізної установки, грн;

$ВЗП$ – кошти на запасні частини до покращеної піролізної установки, грн;

$ВР_{\text{опл.пр.}}$ – оплата праці працівників, грн;

$ВТ_{\text{пел.}}$ – вартість кілограма деревних пелет, $\text{грн}/\text{кг}$;

$ВТ_{\text{пір.газ.}}$ – технологічні витрати на виробництво тис. м^3 піролізного газу, грн;

$ВТ_{\text{рем}}$ – витрати на ремонтні роботи, грн.

E – економічний ефект (річний), грн;

$ЄСВ$ – єдині соціальні внески (1760 грн);

$МВ$ – кошти на матеріали для вироблення камер піролізу, бункера піролізної установки, грн;

$PB_{\text{пірол.уст.}}$ – прямі витрати на виробництво піролізної установки (камери піролізу та бункеру піролізної установки), грн;

$ПКВ_{\text{м.}}$, $ПКВ_{\text{б}}$ – питомі капітальні вкладення, віднесені до тис. куб. м. піролізного газу, виробленого обома піролізними установками, грн;

$ПО_{\text{с}}$ – ставка за посадовими окладами, грн/год;

p_1, p_2 – периметр колосника та просвіту відповідно, м;

$ТО_{\text{н.ч.}}$ – норма часу на виконання технологічних операцій, хв;

Φ – річний фонд роботи піролізної установки, год;

ВСТУП

Погіршення стану довкілля потребує нових рішень щодо відходу від використання традиційних викопних палив та зосередження на використанні альтернативних джерел енергії, зокрема біомаси. Оскільки Україна є аграрною країною, то з економічної точки зору доцільним є розвивати технології виробництва енергії з рослинної біомаси агарного походження, якої є в достатній кількості, навіть з врахуванням потреб суміжних галузей економіки.

З усіх технологій переробки біомаси в енергію найбільш перспективними є процеси торефікації, газифікації та піролітичного розкладання. Проте сучасні вимоги щодо якості кінцевого продукту диктують суворі вимоги до технологій та обладнання терміко-хімічної конверсії біомаси в енергію, що потребує розробки нових методик та проведення відповідних досліджень із застосуванням сучасних досягнень в галузі науки та техніки.

Актуальність теми дослідження. В господарській діяльності процес піролізу використовується впродовж багатьох років, забезпечивши можливість виробляти біопалива II-покоління (біовугілля, газ, оливу) поряд з такими процесами як торефікація та газифікація біомаси. Удосконалення технології і обладнання для здійснення піролізу дозволяє підвищити ефективність піролітичного розкладання сировини та отримати високу якість бажаних продуктів для потреб транспортної, хімічної та енергетичної галузей економіки. Інтенсивне використання продуктів процесу піролізу впродовж останніх десяти років спричинене різкими змінами клімату, бажанням зменшити негативні наслідки глобального потепління та вимогами щодо утилізації відходів згідно принципів сталого розвитку.

Впродовж останнього десятиліття значно зріс інтерес до цієї технології і з боку великих підприємств енергетичного сектору, що сприяло проведенню широкомасштабних досліджень механізмів піролітичного розкладання біомаси. Це дозволяє суттєво зменшити вуглецевий слід та виробляти біопаливо II-покоління у сталий спосіб.

Сучасні дослідження технологій та засобів процесів піролізу є багатообіцяючими, що відкриває шлях до дешевих та екологічно чистих продуктів, які матимуть широке застосування в багатьох секторах економіки.

Мета роботи – розробити конструкцію камери піролізу установки з терміко-хімічної конверсії біомаси в піролізний газ і оливу.

Для досягнення цієї мети розв’яжемо нижче зазначені **задачі**:

– провести аналіз паливних властивостей біомаси з метою її піролітичного розкладання;

– провести аналіз технологій терміко-хімічної конверсії біомаси в піролізний газ і оливу;

– удосконалити конструкцію камери піролізу установки терміко-хімічної конверсії біомаси в піролізний газ і оливу;

– розробити заходи з охорони праці при роботі з установкою терміко-хімічної конверсії біомаси в піролізний газ і оливу;

– провести економічні розрахунки.

Об’єкт дослідження – технологічний процес терміко-хімічної конверсії біомаси в піролізний газ і оливу.

Предмет дослідження – закономірності впливу конструкційних параметрів камери піролізу на ефективність терміко-хімічної конверсії біомаси в піролізний газ і оливу.

Практичне значення одержаних результатів: удосконалено конструкцію камери піролізу, що сприяло підвищенню ефективності піролітичного розкладання біомаси та виробництву піролізного газу та оливи високої якості.

Особистий внесок здобувача: основні дослідження за темою дипломного проекту автором отримані самостійно.

РОЗДІЛ 1

АНАЛІЗ ДОСЛІДЖЕНЬ ПАРАМАТРІВ ЛІГНОЦЕЛЮЛОЗНОЇ БІОМАСИ ТА ПРОЦЕСІВ ЇЇ ПІРОЛІЗУ

За [1] процес піролізу біомаси є перспективним методом конверсії малоцінної сировини (кукурудзиння, лушпиння горіхів, солома зернових, стебла та бадилля соняшника, енергетичні швидкоростучі рослини, деревинні відходи) в палива II-покоління. Проте, щоб технології піролізу стали конкурентоспроможними поряд з іншими методами виробництва альтернативної енергії (фотовольтаїка, вітрогенерація) потрібно провести ряд досліджень в напрямку підвищення ефективності конструкцій камер піролізу та зниження собівартості виробленої продукції, що можливо, також, за рахунок попередньої підготовки відповідної сировини. Зокрема, вид та хімічний склад біомаси чинить суттєвий вплив на якість вироблених продуктів піролізу [2]:

- залежно від виду та складу біомаси, час у та місця її вирощування та збирання змінюється співвідношення органічних та неорганічних компонентів;

- вміст лігніну, геміцелюлози та целюлози в біомасі чинить вплив на продуктивність процесу піролізу та визначає склад, характеристики та якість кінцевого продукту процесу піролітичного розкладання біомаси.

Отже, за вищий вміст в кінцевих продуктах піролізу оливи відповідає вміст в біомасі целюлози та геміцелюлози, тоді як за виробництво біовугілля – відповідає вміст лігніну. Чим вищий вміст в біомасі лігніну, тим більш в'язким за консистенцією буде вироблене біопаливо, яке характеризуватиметься нижчим вмістом вологи [3].

Отже, знання хімічного складу лігноцелюлозної сировини є необхідним, якщо її застосовувати з метою піролітичного розкладання для виробництва оливи, біовугілля, піролізного газу. Надалі розглядатимемо лігноцелюлозну біомасу, оскільки вона є непридатною для тваринництва, частково придатною в рослинництві і, може бути використана для виробництва палив II-покоління.

1.1. Аналіз хімічного складу та будови лігноцелюлозної біомаси для виробництва палив другого покоління шляхом піролізу

Лігноцелюлоза, яка є основною складовою біомаси та неїстівною частиною рослин, має волокнисту структуру. Якщо говорити про світову продовольчу безпеку, то на відміну від культур продовольчого спрямування, використання лігноцелюлози в енергетичних цілях їй не є загрозовим [4].

Отже, лігнін, геміцелюлоза та целюлоза в лігноцелюлозі містяться в переважній кількості і є її найбільш важливими складовими, решта – рослинні екстракти та неорганічні компоненти. Серед усіх складових лігноцелюлози вміст целюлози є найвищим, а загалом, целюлоза є найбільш поширеним органічним полімером у стінках клітин різноманітних рослин. Склад целюлози – аморфна та кристалічна фракції. Водневі зв'язки скріплюють між собою структурно-целюлозні ланцюги, утворюючи целюлозні фібрили. Зазначені целюлозні фібрили призначені для запобігання гідролізу целюлози під впливом ферментів та кислот. Цього можна досягти завдяки тому, що целюлозні фібрили оточені тривимірною лігніновою матрицею, зображеною на рис. 1.1.

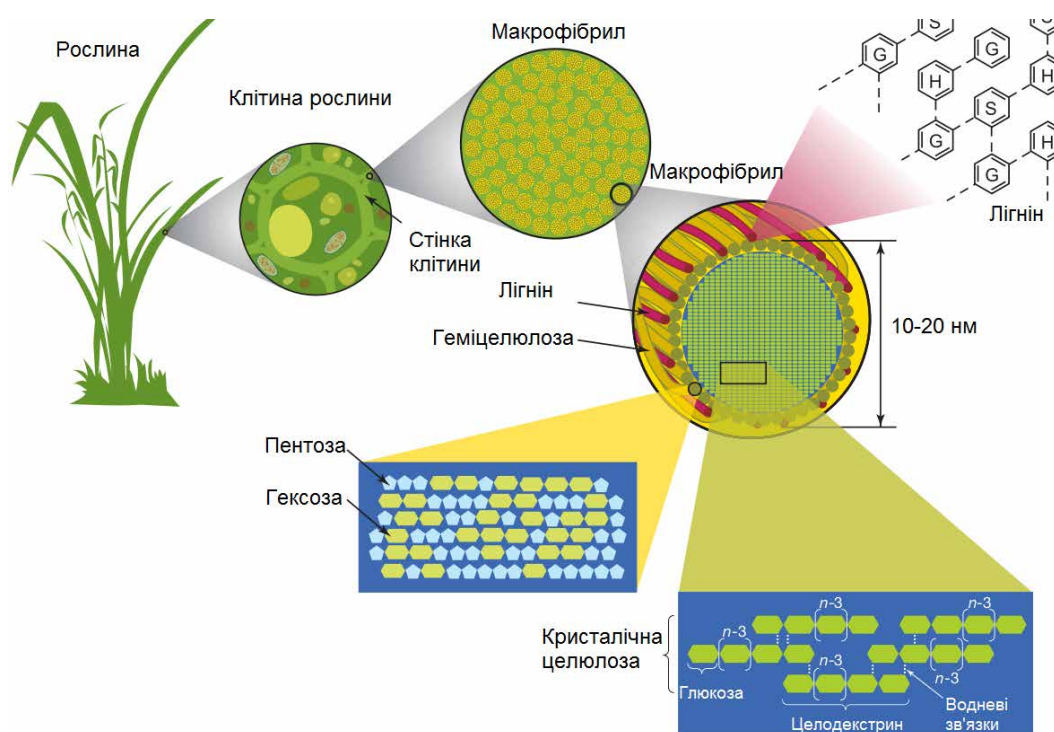


Рис. 1.1. Схема будови лігноцелюлозної біомаси

Целюлоза за будовою складається з одиниць Д-глюкози, що повторюються, які між собою поєднані $\beta(1\rightarrow4)$ глікозидними зв'язками [5]. Міцний зв'язок (у шестивуглецевому кільці) між гідроксильними групами та водневими сполуками забезпечує кристалічній структурі целюлози високу хімічну стабільність та механічну міцність.

Геміцелюлоза є складним полімерним матеріалом. До її складу входять цукрові кислоти; галактоза, маноза, глюкоза (загалом шість вуглецевих цукрів); та п'яти одиниць вуглецевих цукрів, таких як ксилоза та арабіноза.

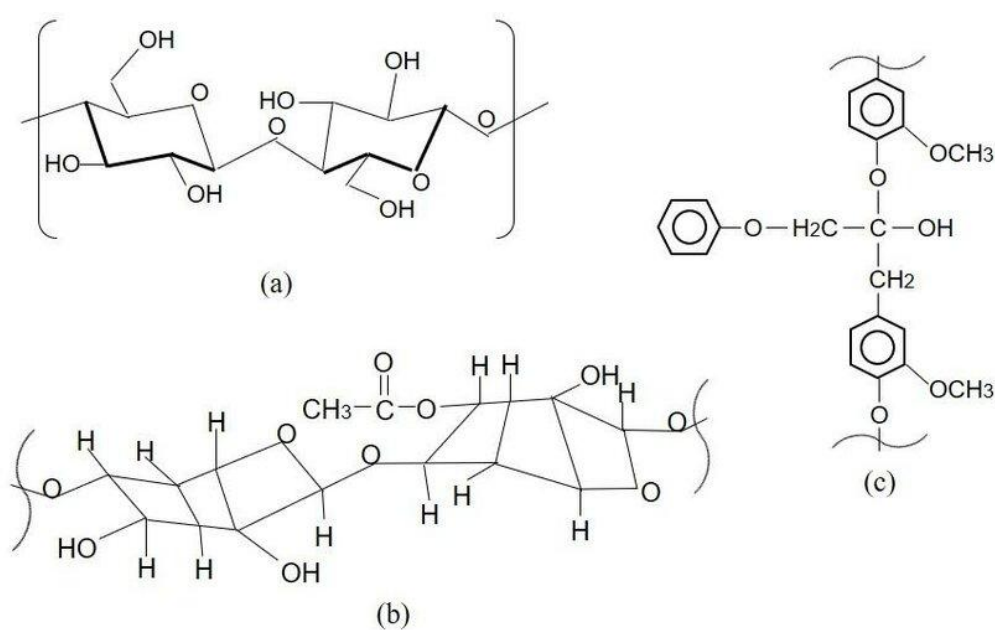


Рис. 1.2. Структурна будова: а – целюлоза; б – геміцелюлоза; с – лігнін

Геміцелюлозний компонент лігноцелюлози служить сполучною ланкою між лігніном та целюлозою. Геміцелюлоза, якщо порівнювати з целюлозою, містить ланцюги цукрових одиниць, які легко гідролізуються, та має порівняно меншу молекулярну масу. На відміну від целюлози, геміцелюлоза має низьку хімічну та механічну стабільність, оскільки геміцелюлоза за структурою є аморфною. Якщо порівнювати м'яку та тверду породи дерев, то прикладом геміцелюлози є глюкоманнан та ксилан. Вміст ацетилглюкуроноксилану в геміцелюлозі для листяних порід дерев сягає близько 30% (це значення складають, переважно, його основні компоненти – галактоза та ксилоза) [6].

Вміст глюкоманнану складає 15%, а галактоглюкоманнану – 8% (разом з манозою та глюкозою) з усіх геміцелюлоз, що містяться у м'яких породах деревини.

Після целюлози та геміцелюлози лігнін є третім найбільш поширеним компонентом лігноцелюлози. Його склад – це три різні види заміщених фенілпропанових одиниць, що робить його аморфним за своєю структурою. Лігнін містить пов'язані між собою в різних формах *p*-гідроксилфеніл, гваяцил та сирингіл.

Лігнін у складі лігноцелюлози забезпечує непроникність, стійкість до окислення та дії мікроорганізмів, структурну підтримку. Лігнін є стійким до дерградаційних змін завдяки нерозчинності у рідинах (зокрема воді) та природній відсутності здатності до оптичної активності [7].

Також лігноцелюлозні матеріали з біомаси, окрім описаних вище основних складових, містять екстрактивні речовини (прості цукри, крохмаль, пектини, ефірні олії, алкалоїди, віск, камеді, терпени, феноли, смоли, слизи, сапоніни, глікозиди, жири і білки). Вказані речовини у складі лігноцелюлозних матеріалів працюють на зразок системи захисту від комах та мікробів, а також беруть участь в метаболічних процесах, діючи як проміжні продукти, які відповідають за запаси енергії в рослині [8].

Склад деяких зразків лігноцелюлозної біомаси наведено в таблиці 1.1.

Для піролізу використовують кілька типів лігноцелюлозних матеріалів. Ці матеріали можна згрупувати в три великі класи: біомаса енергетичних культур, відходи сільського господарства та деревинна біомаса.

Використання вказаних в таблиці 1.1 видів біомаси для виробництва енергії шляхом піролізу є перспективним, оскільки дозволяє зменшити викиди CO₂ в атмосферу та сприяти відтворенню гумусного шару ґрунтів при їх вирощуванні на маргінальних землях. Також використання відходів сільськогосподарського виробництва сприятиме розповсюдженню перспективної практики забезпечення сільськогосподарських та фермерських підприємств власною енергією з агрокультур, вирощених на власних полях.

Склад деяких зразків лігноцелюлозної біомаси [9]

Вид матеріалу	Вид рослинної біомаси	Вміст компонентів в рослинній біомасі, %		
		Лігнін	Геміцелюлоза	Целюлоза
Енергетичні культури	Свічграс	11,97	31,42	45,05
	Камерунська трава	23,85	24,08	22,02
	Цинодон пальчастий	6,37	35,81	24,67
	Канаркова трава очеретяна	7,75	42,73	29,68
	Бамбук	21,07 – 30,89	14,58 – 26,04	25,77 – 42,89
Відходи сільського господарства	Відходи чаю	39,68	19,88	30,18
	Солома пшениці	15,08 – 16,5	27,41 – 49,88	27,41 – 30,05
	Відходи бананів	13,75	14,76	13,18
	Жом сорго	9,96	24,02	40,89
	Серцевина кайри	31,19	15,29	28,11
	Стебло бавовни	0	15,97	76,85
	Стебло кукурудзи	157,12	43,21	22,77
	Кукурудза	14,39	30,65	51,18
	Лушпиння проса	14,03	27,01	33,32
	Фундук	51,47	15,68	22,89
	Мигдаль	27,69 – 34,92	27,92 – 38,11	29,1 – 31,09
Деревинна біомаса	Дуб	35,48	21,88	43,19
	Береза	15,69	40,08	25,69
	Бук	21,89	31,75	45,78
	Ялина	28,11	21,18	50,77
	Дугласія тисолиста	29,89	19,22	44,99
	Сосна	26,76	23,96	45,58

За таблицею 1.1 можна говорити про широкий спектр саме лігноцелюлозної біомаси аграрного походження, яка може бути використана для виробництва енергії шляхом її піролізу.

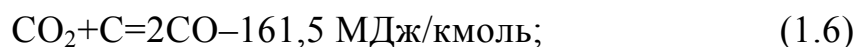
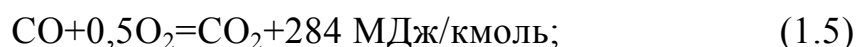
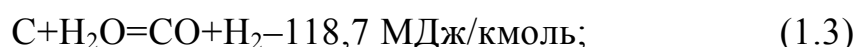
1.2. Аналіз основних видів процесу піролізу лігноцелюлозної біомаси

Піроліз, або суха перегонка (dry distillation) – це технологічний процес термічної деструкції (розкладання) органічної частини твердої рослинної біомаси (РБ_т) на рідкі (піролізна олива), тверді (біовугілля) та газоподібні (леткі речовини) продукти [10].

Схематично піролітичне розкладання РБ_т запишемо як [10]:



Під час піролізу деструкція органічної складової РБ_т супроводжується взаємодією С палива із зв'язаним О₂ та Н₂О із утворенням рідких вуглеводневих сполук, смол, газів та біовугілля [10]:



Класифікації процесів піролізу лігноцелюлозної біомаси залежно від різних факторів впливу наведено на рис. 1.3.

Процес піролізу поділяється залежно від: технології, що використовується (термічний, з обертовим конусом, абляційний, в реакторі з 2 шнеками, в суцільному шарі, в циркулюючому киплячому шарі, в потоці, в 2 реакторах киплячого шару); способу підведення теплоти (алотермічний, автотермічний); хімічних реакцій (окислювальний і сухий); температури (високотемпературний, середньої та низької температури); швидкості нагрівання (повільний, проміжний, швидкий та миттєвий).

Тип процесу піролізу обирається виходячи з хімічно-фізичних властивостей біомаси та бажаного складу кінцевих продуктів.

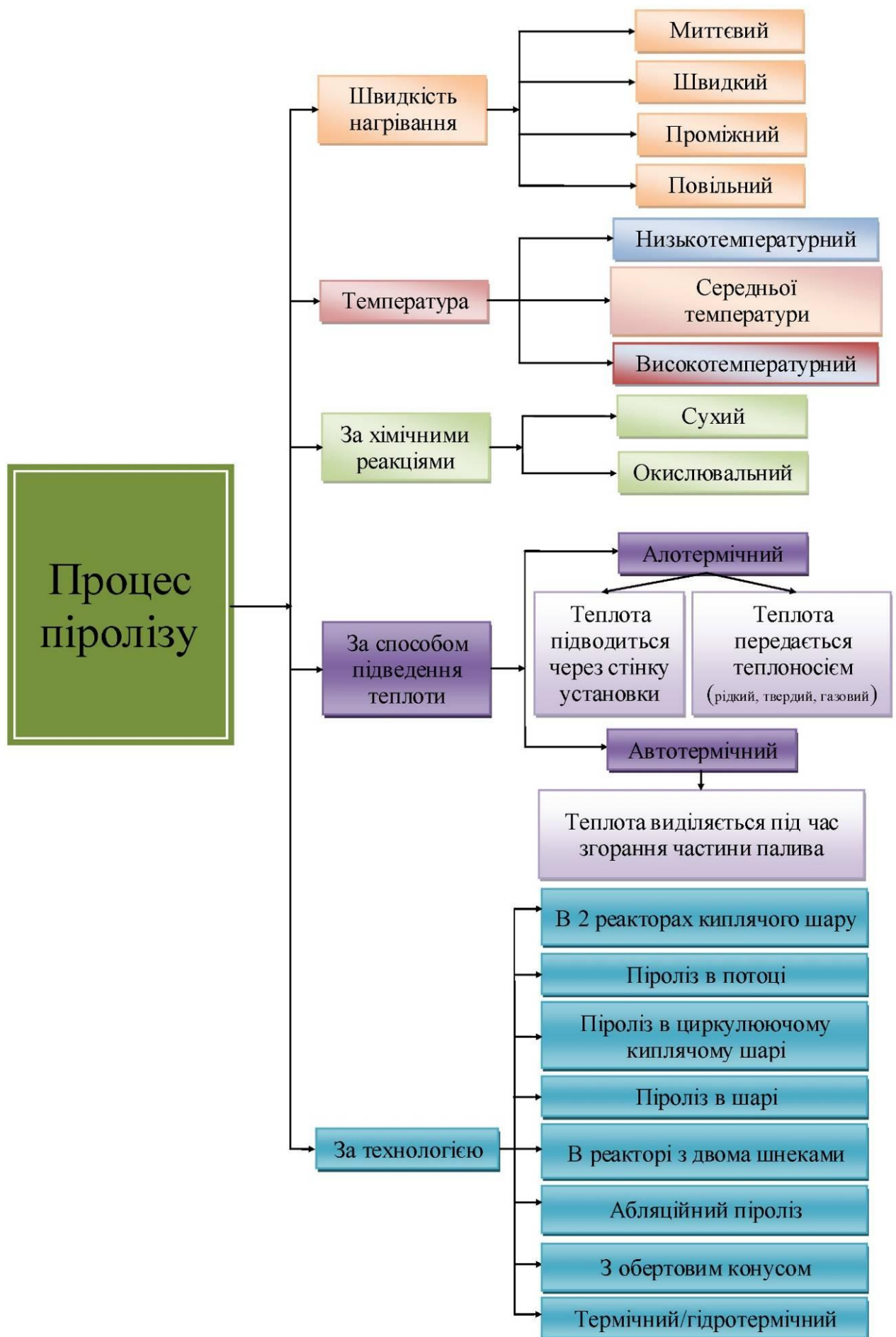


Рис. 1.3. Класифікації процесів піролізу лігноцелюлозної біомаси [10]

В діапазоні температур 345...570 градусів починається термічне розкладання складових біомаси, яке триває до досягнення температурою позначки у 800 градусів. Утворення рідких, твердих та газоподібних продуктів процесу піролізу відбувається внаслідок розриву в біомасі водневих, вуглецевих та кисневих видів зв'язку. Умовно реакції, які призводять до розриву зв'язку поділяються на первинні та вторинні. До первинних реакцій слід віднести реакції зневоднення та обвуглювання в результаті чого матимемо первинні та проміжні продукти. Проміжні продукти первинних реакцій надалі беруть участь у вторинних реакціях (деградація та випаровування) процесу піролітичного розкладання біомаси. Складові біомаси під час протікання первинних реакцій розкладаються нерівномірно, а ступінь їх розкладання та швидкість залежать від режимних параметрів процесу. За черговістю розкладання першою деградує геміцелюлоза, надалі целюлоза, і, на останок, лігнін, який потребує більш широкого температурного інтервалу. При високих температурах глікозидні зв'язки, що зв'язують глюкозні одиниці геміцелюлози та целюлози легко розвиваються. Вказані складові біомаси на початкових стадіях піролізу швидко розкладаються. Це є причиною зниження ступеня їх полімеризації.

Якщо говорити про геміцелюлозу, то складна структура цього компоненту є причиною різниці її поведінки в процесі піролізу. За [11] досліджено, що різні види геміцелюлози демонструють різну швидкість втрати ваги. Проте, геміцелюлози на основі глюкану мають вищу термічну стабільність, тоді як геміцелюлози на основі ксилану є найменш термічно стабільними. Лігнін, на відміну від целюлози та геміцелюлози, має ароматичну матрицю з різними зв'язками, серед яких найпоширенішими є ефірні. Вказані зв'язки, переважно, відносно легко розриваються, утворюючи фенольні сполуки, на відміну від вуглецевого зв'язку, який важко розривається. Отже, порівняно з целюлозою та геміцелюлозою, термічна деградація лігніну характеризується більш широким піком на його похідних термогравіметричних кривих.

Для термічного розкладання біомаси, в основному, використовують такі методи піролізу: миттєвий, швидкий та повільний [12]. В таблиці 1.2 наведено порівняння цих видів піролізу за режимними параметрами процесу та фізичними властивостями біомаси, які впливають на об'ємний вихід кінцевих продуктів – газу, оливи та біовугілля.

Таблиця 1.2

Режимні параметри миттєвого, швидкого та повільного процесів піролізу [12]

Параметр	Миттєвий піроліз	Швидкий піроліз	Повільний піроліз
Розмір частинок біомаси, мм	<0,5	<1	5 – 50
Тривалість перебування частинки в реакторі, с	<1	0,5 – 10	300 – 500
Швидкість нагрівання, °C/с	>1000	10 – 200	0,1 – 1,0
Температура, °C	900 – 1200	850 – 1250	550 – 950

Повільний піроліз [13] реалізується при низьких швидкостях та температурах нагрівання і призначений для максимізації виробництва біовугілля. Піролізна олива також виробляється при цьому методі піролізу, оскільки час перебування біомаси в реакторі досить тривалий (300 – 500 с), а складові біомаси, перебуваючи так довго в паровій фазі, схильні вступати в реакції одна з одною. Проти виробництво піролізної оливи при цьому методі відбувається в меншій кількості і якість її бажає кращого. Недоліками технології повільного піролізу, що роблять її малопридатною до виробництва оливи, є тривалість цього методу, яка є причиною розтріскування основного проміжного продукту і, як наслідок, піролізної оливи поганої якості. Також, утримування частинок біомаси тривалий час в реакторі при заданій температурі потребує значних витрат енергії через обмежену теплопередачу.

Швидкий піроліз [13] протікає в температурному діапазоні 850–1250 градусів зі значною швидкістю нагрівання біомаси (10...200 градусів за секунду) впродовж короткого проміжку часу (1...10 секунд). Зазначений вид

піролізу використовують для виробництва піролізної оливи, оскільки при вказаних режимних параметрах її виробництво є суттєво вищим, ніж виробництво синтетичного газу та біовугілля. При швидкому піролізі можна отримати близько 60...75% оливи, 10...20% піролізного синтез-газу та 15...25% біовугілля. При швидкому піролізі передбачено нагрівання частинок біомаси до заданих температур, при яких протікає термічний крекінг, а за рахунок мінімізації часу перебування біомаси в реакторі рідка біомаса під впливом теплоти перетворюється на біовугілля. За рахунок високих температур процесу біомаса перетворюється на оливу, замість того, щоб стати біовугіллям.

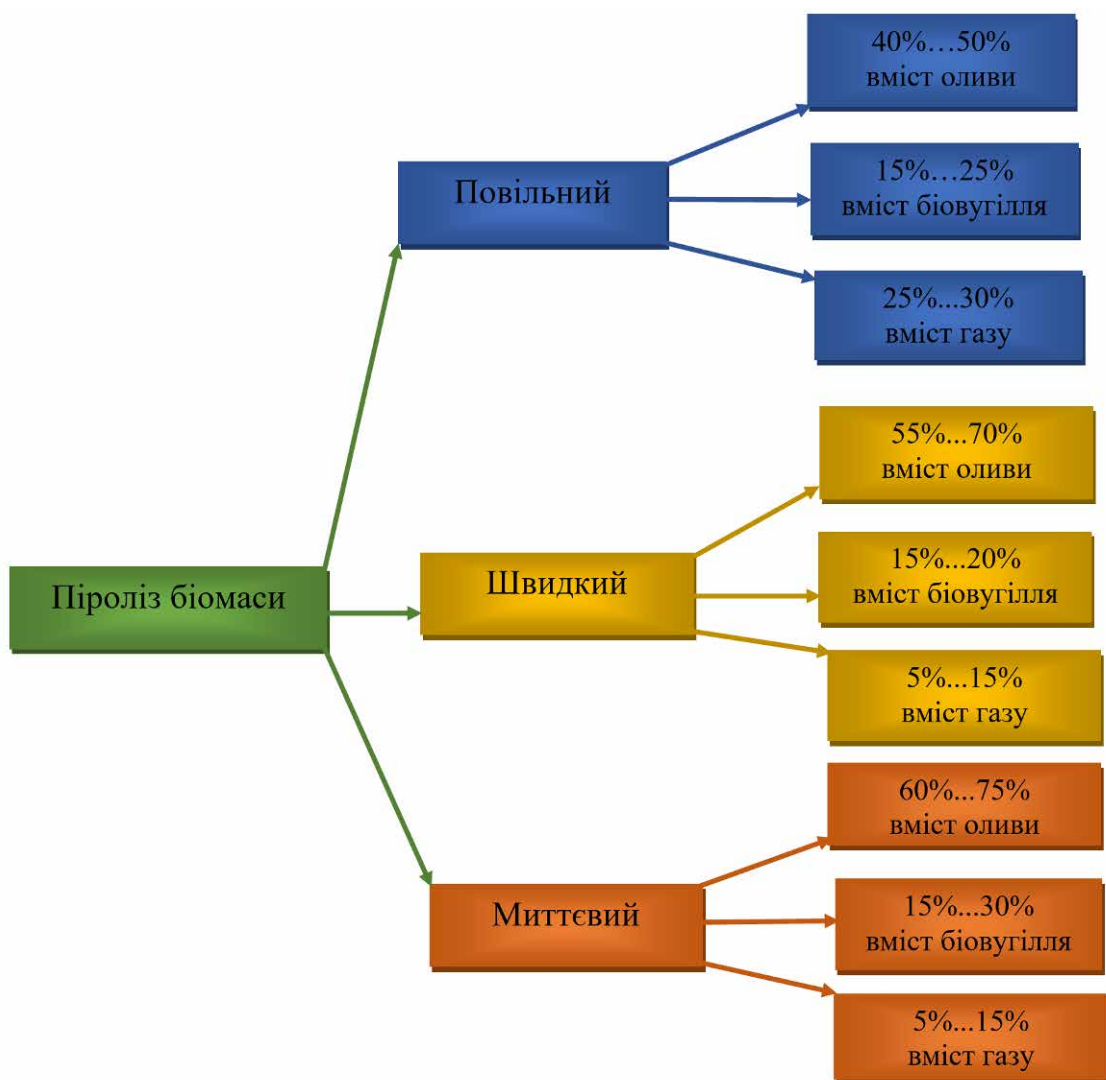


Рис. 1.4. Методи піролізу та відсотковий вміст продуктів піролізу, що відповідає кожному з методів [13]

Швидкий піроліз [13] набув широкого розповсюдження не лише в галузі енергетики, а також в хімічній та харчовій промисловості. Також піролізну

оливу, оскільки вона є рідиною, зручніше та дешевше ніж тверді чи газоподібні продукти піролізу зберігати та транспортувати. На доданок, піролізна олива може використовуватися як проміжний продукт, що містить різноманітні корисні сполуки, кожна з яких окремо має значно більшу додану вартість, порівняно з її використанням в якості палива. Швидкий піроліз, порівняно з миттєвим та повільним, якщо він реалізується в незначних масштабах, потребує низьких інвестицій і характеризується високою енергоефективністю.

Перевагою швидкого піролізу біомаси є низька вартість, використання палив II-покоління та нульовий баланс за вуглекислим газом. Піролізна олива має вищу теплотворну здатність порівняно з синтез-газом та біовугіллям.

Миттєвий піроліз [13] може забезпечити виробництво піролізної оливи до 75% від об'єму усіх вироблених продуктів. Це одна з технологій виробництва рідкого, твердого та газоподібного видів палива. За рахунок високої температури в реакторі (450...1000 градусів) частинки біомаси швидко нагріваються і менш ніж за секунду починається виділення піролізного газу. Дана технологія, попри очевидні переваги, має свої недоліки та обмеження до застосування: а) в якості побічного продукту процесу може утворитися незначна кількість води, яка при змішуванні з оливою, впливає на її стабільність, якість та можливість застосування в подальших технологічних процесах; б) піролізна олива може містити такі лужні метали як натрій та калій, які під час піролізу вивільняються з біомаси; в) існує ймовірність ускладнення обробки та транспортування оливи через підвищену в'язкість, спричинену реакціями полімеризації та конденсації; г) ймовірність вмісту твердих речовин; д) низька корозійна та термічна стабільність виробленої оливи.

1.3. Аналіз параметрів, що впливають на ефективність процесу піролізу лігноцелюлозної біомаси

Основними параметрами, від яких залежить якість протікання процесу піролізу, є тип лігноцелюлозної біомаси та розмір її частинок; тиск в реакторі та швидкість нагрівання частинок біомаси; тип каталізатора; час перебування

частинок біомаси в реакторі (камері піролізу) [14]. Для реалізації первинних та вторинних процесів піролітичного розкладання біомаси потрібна забезпечити тепло- та масоперенесення. За температур 200...300 градусів відбувається первинне розкладання біомаси, що супроводжується деградацією структури клітин біомаси. В результаті утворюються проміжні продукти – деградована біомаса, біовугілля та леткі речовини. Залежно від режимних параметрів процесу та типу біомаси маємо такі кінцеві продукти – біовугілля (твердий залишок, який залишився після усунення летких речовин), леткі речовини (пара, газ). Біовугілля має значну реактивну площу поверхні, містить багато вуглецю і може, в подальшому, бути використане для виробництва синтез-газу.

Вторинне піролітичне розкладання біомаси протікає при температурах вищих за 500 градусів і відрізняється високотемпературним крекінгом первинних продуктів піролізу. При цьому сукупне виробництво рідин та газів (пропілен, етилен) зростає. На відміну від реакцій первинного розкладання реакції вторинного розкладання протікають швидше і з виділенням значної кількості теплоти. Утворений при цьому генераторний газ є сумішшю горючих (H_2 , CO) та негорючих (CO_2 , водяна пара, смола, C_nH_m , легкі оксигенати, N_2) речовин. Утворені в результаті піролізу продукти, в свою чергу, можна використовувати для виробництва енергії. До параметрів, які чинять вплив на процес первинного та вторинного розкладання біомаси віднесемо: склад та тривалість перебування біомаси в реакторі; швидкість нагрівання, температура.

З метою досягнення бажаних результатів процес піролізу можна модифікувати шляхом зміни робочих діапазонів режимних параметрів процесу та властивостей біомаси. Прикладом первинної реакції є розщеплення геміцелюлози, лігніну та целюлози на простіші сполуки. Особливість вторинних реакцій – розщеплення проміжних продуктів. За технологією основні продукти розщеплюються на менші молекули, для перетворення целюлози на цукри, та протікає процес перетворення основних продуктів на великі за розміром молекули та вуглець.

Температура [14] є одним з факторів, від яких залежить процес піролізу біомаси. Від величини даного параметру залежить ступінь розкладання летких

компонентів біомаси. Виділення смолистих речовин починається при температурі нижчій за 300 градусів через розкладання геміцелюлози та неконденсованих газів. Розпад біомаси на складові та вивільнення хімічних сполук починається коли температура процесу піролізу сягає 500°C. З лігніну отримують фенольні сполуки, тоді як з целюлози отримують 5-гідромертилфурфурал, левоглюкозан, оцтову кислоту та гідроксиацетальдегід. В таблиці 1.3 наведено типові температури процесу та вихід, залежно від виду сировини, піролізної оливи.

Таблиця 1.3

Вихід піролізної оливи залежно від сировини та температури піролізу [14]

Вид сировини	Виробництво піролізної оливи, (% за об'ємом)	Температура (°C)
Bagassa guianensis	66	500
Соева макуха	41	530
Деревина твердих порід	67	532
Макуха соняшникова	41	550
Вугілля	42	500
Лушпиння рису	70	450
Солома пшениці	34	600

Найкращий температурний діапазон для забезпечення максимального виробництва піролізної оливи в процесі швидкісного піролізу становить 400...500 градусів. З подальшим ростом температури процесу вихід піролізної оливи скорочується. Також за вищих температур додаткове видалення з первинного вугілля легких речовин врівноважує виробництво вторинного біовугілля. Загалом близько 80 – 90% загальної конверсії в сировині має місце в діапазоні температур 300 – 400°C. Кінцева температура процесу має вплив на вміст оливи в рідкій фракції готового продукту. Для руйнування целюлозного зв'язку потрібно більше енергії, отже вища температура, тому при вищих значеннях температури ефективність конверсії біомаси в продукти піролізу є

вищою. За [15] при дослідження піролізу соєвого шроту ріст температури з 400 до 700°C збільшив ступінь розкладання шроту на 12% (мас.). В цьому ж діапазоні температур вихід оливи з соняшникової макухи склав 10,7% (мас.). Найкращі результати за виходом оливи мали місце при температурі 500...550°C. При зростанні температури до 600°C зростає швидкість утворення горючих газів вторинних реакцій. Проте зростання виробництва оливи мало місце лише до температури 570°C, в той час як виробництво газу, яке розпочалося при температурі 430 градусів збільшувалося до температури 730°C. Більш стабільні сполуки утворювалися під час вторинного розкладання коли зростала кінцева температура піролізу, під час якого були виявлені сполуки, що містять функціональні групи. При підвищенні температури утворювалися та накопичувалися поліцикличні ароматичні вуглеводні (фенантрен, пірен). Оскільки при високих температурах протікала дегідратація та декарбоксілювання то, відповідно концентрація кисню зменшувалася, а вміст піролізної оливи збільшувався.

Розмір частинок біомаси [16] чинить безпосередній вплив на якість та вихід піролізної оливи. З метою забезпечення легкості та рівномірності нагрівання частинок біомаси під час процесу піролізу рекомендується їх розмір зменшувати до 35 мм шляхом подрібнення. При піролізі в установках з циркулюючим псевдозрідженим шаром бажано, щоб діаметр частинок не перевищував 6 мм; в установках з обертовим конусом – 20 мм; в установках з псевдозрідженим шаром – 2 мм. Рекомендовані розміри частинок для різних видів біомаси наведені в таблиці 1.4.

Таблиця 1.4

Рекомендовані розміри частинок біомаси для процесу піролізу [16]

Вид сировини	Оптимальний розмір частинок
Ріпак	<0,4 мм>1,8 мм
Тверді побутові відходи (ТПВ)	Неподрібнені, 1 – 2 см
Фундук	0,225<dp<0,425
Частинки деревини	350 – 800 μм

Частинки деревини діаметром 350 мкм при температурі 300...400 градусів повністю піролітично розкладаються, тоді як частинки діаметром 800 мкм піролітично розкладалися неповністю. Якщо говорити про піроліз ТПВ та фундуку, то процес піролізу мав найвищу ефективність при піролізі частинок діаметром 0,45 – 0,6 мм [16]. При піролізі ріпаку найвища ефективність процесу мала місце при розмірі частинок 0,6 – 0,85 мм. При піролітичному розкладанні відходів рослинництва ступінь розкладання для різних груп розмірів відходів (180...300, 150...180 та <150 мкм) суттєво відрізняється. Теплова поведінка на початку та в кінці процесу піролізу частинок біомаси розміром <150 мкм відрізнялася. Оскільки частинки <150 мкм зазвичай мали різну реактивну площу поверхні, то різниця пояснювалася процесами тепло- та масопереносу. При піролізі більших за розміром частинок вихід оливи зменшується, так як до частинок більшого розміру, через нижчий коефіцієнт теплопередачі, потрібно підвести більшу кількість теплоти. Гірша теплопередача є причиною вищих значень енергії активації для частинок більшого розміру. Якщо говорити про піроліз частинок великих розмірів, то високе виробництво оливи досягається якщо вони мають різні такі властивості як об'ємна щільність та вміст кисню в оливі. Підвищений вміст кисню в оливі призводить до меншої кількості здатних до вторинних реакцій речовин, що несе менше енергії. Зменшення розміру частинок призводить до удорожчання процесу піролізу через потребу в обладнанні з подрібнення. Загалом, щоб отримати вищий вихід оливи потрібно узгодити геометричні параметри конструкції реактора з фізико-хімічними властивостями біомаси та підібрати належний температурний режим.

Час перебування біомаси в реакторі є також одним з важливих факторів, від якого залежить вихід оливи. З метою збільшення виробництва оливи оптимальний час перебування біомаси в реакторі має бути менше секунди. Чим менший час піролізу, тим якіснішою є олива. В процесі піролізу вихід рідких продуктів піролізу зростає із зростанням часу перебування біомаси в реакторі через протікання вторинних реакцій. Для повної конверсії біомаси в продукти піролізу потрібно достатньо часу її перебування в реакторі, проте найвищий вихід оливи фіксується в перші секунди процесу. Тиск в реакторі при цьому

повинен бути мінімальним. В роботі [17] досліджено, що при піролізі тирси ялівцю збільшення часу перебування сировини в реакторі з 15 до 40 хвилин змінив відсотковий вихід оливи, газу та біовугілля. Впродовж тридцяти хвилин піролізу вихід рідкої фракції був найвищим і склав 22%. Зростання виходу оливи залежало від ступеню нагрівання біомаси і тривало навіть після 40 секунд тривалості процесу. Фактором, який сигналізував про зменшення якості виробленої оливи, було зростання вмісту кисню у виробленій оливі. Для усунення цього негативного явища рекомендовано застосовувати двоступеневий піроліз, який складається з етапу піролітичного розкладання біомаси та етапу утворення оливи. Отже, головною умовою отримання високоякісних рідких продуктів з високим виходом є оптимізація часу перебування сировини в реакторі. В дослідженні [18] в процесі піролізу необробленого *bagassa guianensis* за температури 525 градусів збільшення часу перебування пари з 0,18 до 0,89 с сприяло зменшенню обсягу виробництва оливи з 75 до 55%, при цьому вихід біовугілля та синтез-газу зріс. Також в роботі [19] під час піролізу солодкої камеді деревини листяних порід за температури 700°C вихід оливи знизився з 22% (мас.) до 15% (мас.) при збільшенні часу перебування пари з 0,67 до 1,75 с. Хоча станом на сьогодні є достатньо робіт щодо впливу тривалості перебування біомаси в реакторі, проте зв'язок між часом перебування пари та температурою піролізу, а також вплив тривалості перебування пари на вихід та якість піролізної оливи, потребує подальшого дослідження.

Тип біомаси (рис. 1.5) [20]. Лігноцелюозна біомаса, залежно від її виду, складається з целюлози, геміцелюлози та лігніну в різних пропорціях. Лігнін розкладається при температурі 550...770°C, целюлоза – 510...770°C, а геміцелюлоза – 470...530°C. Ближче до кінця процесу піролізу від біомаси залишається зола, яка містить такі неорганічні речовини як магній, калій, кальцій, фосфор та натрій. Компоненти, що містяться у вироблених продуктах піролізу, залежать від складу біомаси і етапу процесу піролізу. На початку процесу значна кількість в біомасі целюлози та геміцелюлоза сприяє вищому

виходу оливи. Целюлоза має кристалічну структуру і швидше розкладається порівняно з лігніном, який має вищий ступінь полімеризації [20].

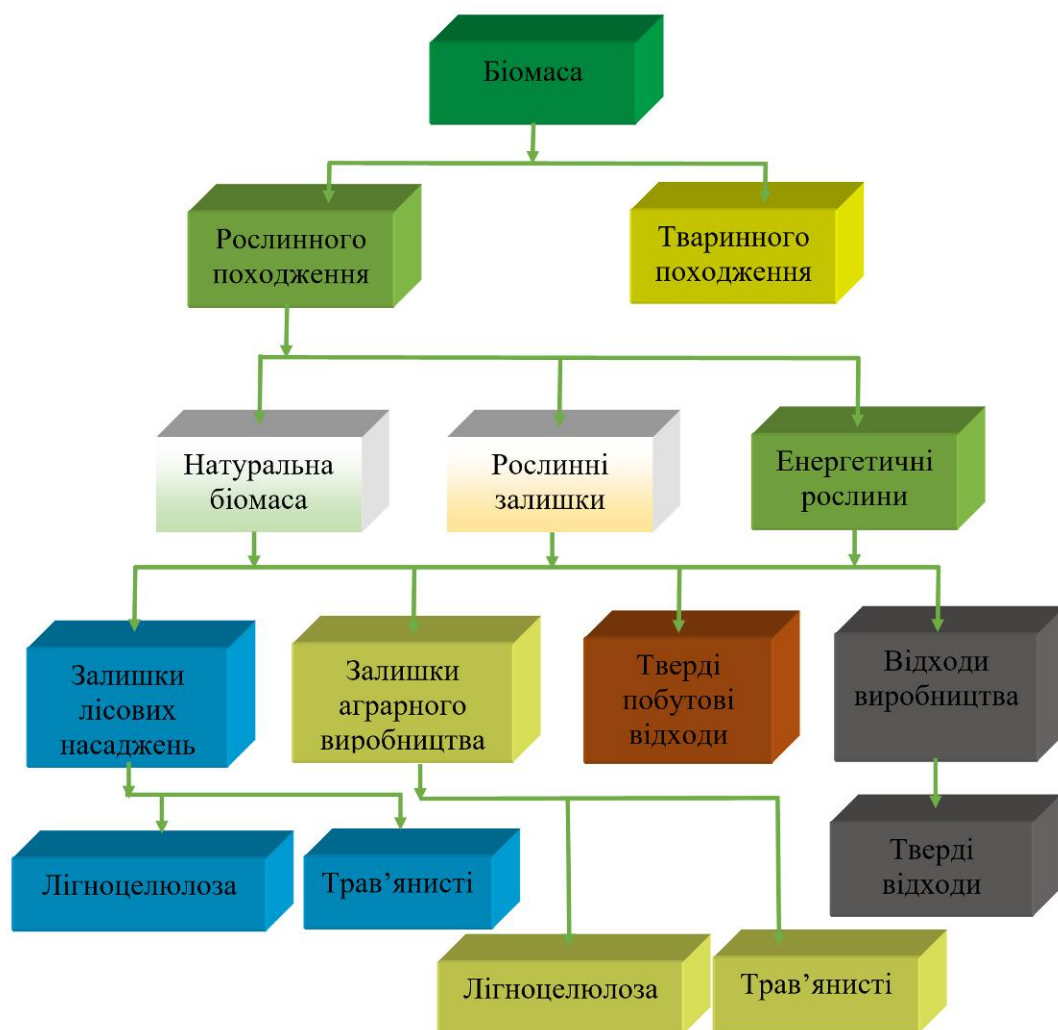


Рис. 1.5. Види біомаси [20]

Вища структурна цілісність лігніну ускладнює його розкладання, проте сприяє вищому вмісту біовугілля в готових продуктах піролізу. Проте ефективно зруйнувати структуру лігніну можна шляхом підвищення швидкості нагрівання, температури, які, в свою чергу, сприяють вищому виходу піролізної оливи, що також залежить від вмісту летючих компонентів в біомасі та її реакційної здатності. За дослідженнями [21] процесу піролізу тирси бамбуку та рисової соломи біомаса з вищим вмістом летких речовин забезпечила вищий вихід оливи. Вміст целюлози, геміцелюлози та лігніну у рослинних відходах аграрного виробництва складає 18% (мас.), 7,5% (мас.) та 17% (мас.) відповідно. Вміст целюлози, геміцелюлози та лігніну у шкарлупі фундука

складає 31% (мас.), 24% (мас.) та 37% (мас.) відповідно. Таким чином збільшення рівня лігніну знижувало вихід оливи, проте збільшувало виробництво біовугілля. В дослідження більший вихід оливи був з аграрних відходів ніж з шкарлупи фундука.

Тип каталізатора. Піроліз біомаси може реалізовуватися як із використанням каталізатора, так і без нього. Каталізатори застосовують для поліпшення характеристик біомаси для можливості її легшого піролізу, а саме: корозійну активність, загальне кислотне число та здатність до реполімеризації. В деяких випадках для реалізації процесу піролізу слід застосовувати спеціальні види каталізаторів. Також каталізатори, які можуть перебувати у твердій чи пароподібній фазі, використовують в реакторах з суцільним та псевдозрідженим шаром. Дослідження з використанням в якості каталізатора ZSM-5 (цеоліт десилікатований) для швидкого піролізу лігноцелюлозної біомаси представлені в роботі [22]. Регулюванням вмісту каталізатора, що вводиться в реактор, можна оптимізувати швидкість конверсії та об'єм небажаного вугілля, особливо при виробництві піролізних олив. Вміст каталізатора призводить до більшого виходу ароматичних сполук. Станом на сьогодні каталізатори поліпшили якість протікання реакцій піролізу, підтримуючи дисоціацію складних молекул біомаси та стимулюючи виробництво заданих продуктів процесу піролізу. Швидкість реакцій зростає при одночасному зниженні робочої температури за рахунок зниження енергії активації, потрібної для протікання реакцій процесу піролізу, що робить перетворення біомаси в потрібні продукти піролізу швидшим та ефективнішим. За потреби каталізатори сприяють більшому виходу оливи, розщеплюючи більші молекули біомаси, що спричиняє вищу ступінь виділення легких вуглеводнів. Також введення в реактор певних видів каталізаторів чинить вплив на розподіл продуктів піролізу, сприяючи утворенню деяких сполук (фенольні сполуки, фурани тощо), які набули широкого застосування в хімічній промисловості. Також, як наслідок процесу піролізу біомаси, є утворення коксу – твердого вугільного залишку. Утворення коксу можна також пригнічувати введенням в реакційну зону каталізатора, який шляхом каталітичного впливу на

протікання вторинних реакцій сприяє інтенсифікації газифікації вуглецевих сполук. Додатковим небажаним продуктом піролізу лігноцелюлозної біомаси є смола – складна суміш високомолекулярних сполук – яка знижує товарну цінність кінцевих продуктів піролізу. Застосування каталізаторів знижує ступінь утворення смоли в процесі піролізу сприяючи протіканню реакцій крекінгу смол, або сприяючи протіканню вторинних реакцій спрямованих на перетворення смоли в бажані продукти. Деякі сучасні види каталізаторів, після регенерації, можна використовувати повторно. Це дозволяє проводити з одним каталізатором кілька циклів піролізу біомаси, що сприяє економічній доцільності такого процесу. За [23] крекінг сполуки з вищою молекулярною масою на прості вуглеводневі сполуки широко застосовують для поліпшення кінетики реакцій процесу. Проте розподіл продуктів, виділених за сприяння деяких каталізаторів, варіюється залежно від параметрів, за яких вони використовувалися. Усі каталізатори, які використовують в процесі піролізу умовно розділені на три класи відповідно до їх цільового використання. Перший клас каталізаторів додають до біомаси перед її безпосереднім введенням у реактор. Другий клас каталізаторів вводять в реактор, що дозволяє взаємодіяти безпосередньо з парами, твердими речовинами та смолами [23]. Третій клас вводять безпосередньо до вторинного реактора, який встановлений після піролізного реактора.

Швидкість нагрівання [24] також має значний вплив на ступінь розкладання біомаси на відповідні продукти піролізу. Високі швидкості нагрівання при швидкому піролізі сприяють швидкому розкладанню біомаси на складові. Також при найвищій швидкості нагрівання біомаси та найменшому часу перебування біомаси в реакторі матимемо найвищий вихід рідких продуктів. Менше виробництво небажаних хімічних речовин усувається скороченням тривалості контакту вторинної реакції. Оптимальною швидкістю нагрівання вважається до 1000 °C/с. В роботі [25] розкладали коксову біомасу методом швидкого піролізу, при якому спостерігалось збільшення виробництва аліфатичних та карбонільних хімічних речовин. Встановлено, що оптимальна температура, що сприяє збільшенню виробництва піролізної оливи залежить від

швидкості нагрівання. Лігноцелюлозну біомасу нагрівали при різних швидкостях (I – 250°C/с, II – 150°C/с, III – 50°C/с), в результаті чого при 500°C вихід рідини становив: 58% мас. для III умови експерименту, 45 мас.% для II умови експерименту та 150°C/хв⁻¹ для III умови експерименту. При швидкості нагрівання 250°C/с оптимальна температура збільшувалася з 500°C до 550°C, що сприяло утворенню летких речовин. Низька швидкість нагрівання спричиняє низьку температуру процесу піролізу, а достатньо висока швидкість піролізу сприятиме зростанню температури до максимальних значень. Високі швидкості нагрівання забезпечують високу якість кінцевих продуктів, оскільки вони зменшують кількість присутньої води, зупиняють виникнення вторинних реакцій та утворюють менше кисню [26].

Тиск в процесі піролізу використовують переважно атмосферний [27]. Багаторічними дослідженнями доведено, що, на відміну початку процесу піролізу, в кінці процесу тиск є вищим за атмосферний, що дозволяє отримувати більший вихід біовугілля. При зростанні тиску починає утворюватися вугілля, оскільки пари триваліший час знаходяться під впливом речовини на основі вуглецю, при цьому вторинний вуглець утворюється розкладанням. Загалом, чим вищим є тиск в реакторі, тим більшим буде вихід біовугілля високої щільності з високим вмістом вуглецю. Як додаткові реагенти в процесі піролізу використовують гази з вмістом аргону, азоту та пари водяної. В дослідженнях [27] наявність такого інертного газу як азот майже не впливало на виробництво піролізної оливи. При збільшенні швидкості газового потоку з п'ятдесяти до ста кубічних сантиметрів на хвилину виробництво піролізної оливи зросло лише на 3% (мас.). Однак ефекту збільшення виходу оливи можна досягти і при мінімальному потоці газу. Чим вища швидкість газового потоку, тим вищою буде кількість виробленого газу через вищий відсоток випаруваних летких речовин. Також пара може бути використана в якості проміжного газу, оскільки сприяє виходу рідкої фракції при процесі піролізу. Зменшення швидкості газового потоку з регульованим вмістом кисню веде до збільшення об'ємної густини газу, і, як наслідок, до більшої кількості піролізної оливи.

1.4. Основні напрямки застосування продуктів процесу піролізу біомаси в енергетиці

Застосування продуктів процесу піролізу (газу, біомаси та біовугілля) в енергетиці наведено на рис. 1.6.

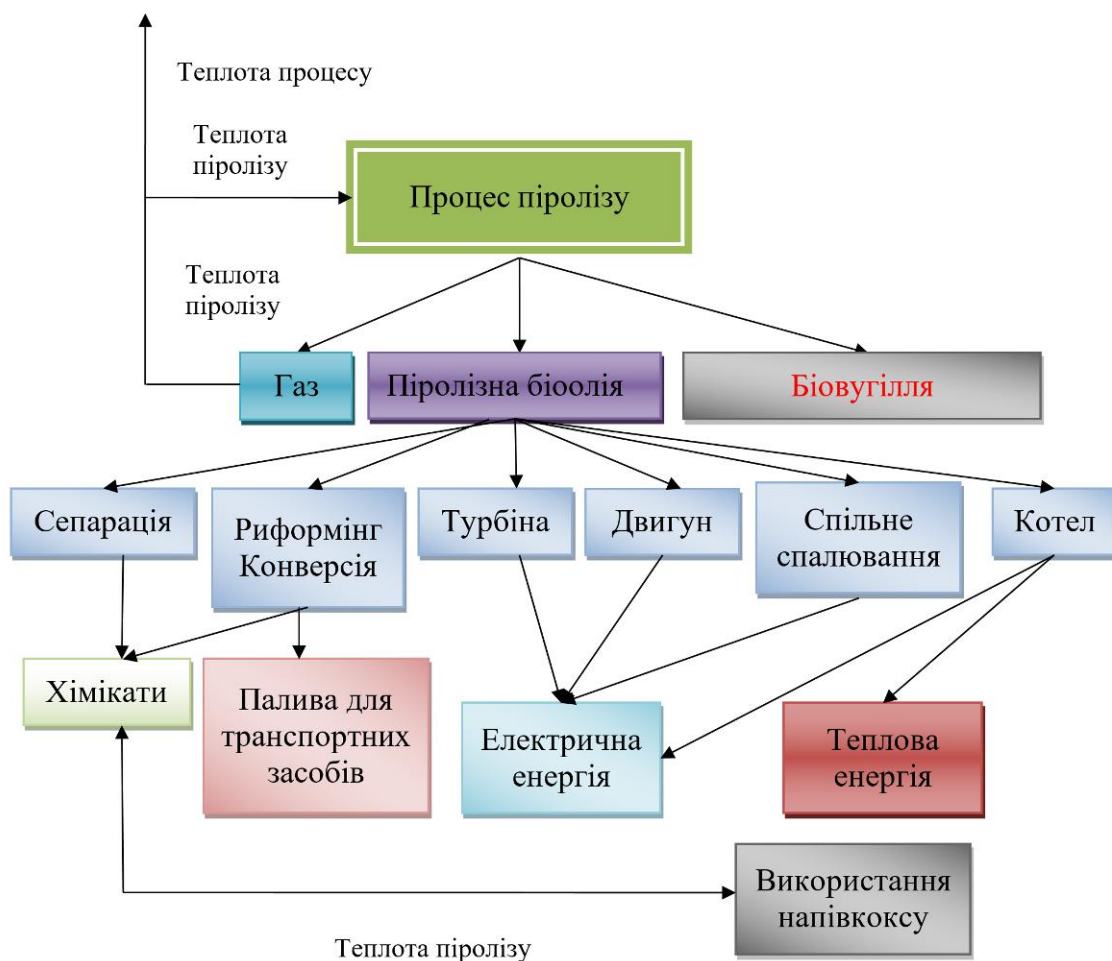


Рис. 1.6 Застосування продуктів процесу піролізу в енергетиці [28]

Як вказано в попередніх розділах проекту продуктами процесу піролізу є газ, олива та біовугілля, які, в свою чергу, використовуються для виробництва енергії. Піролізна олива має найширше використання. Сепарацією оливи можна виробляти різні хімічні продукти. Конверсією та риформінгом піролізної оливи отримують паливо для транспортних засобів. З метою виробництва електричної енергії піролізну оливу використовують як паливо для ДВЗ, турбін та когенераційних установок, які додатково виробляють теплову енергію. Теплову

енергію можна отримати також шляхом прямого спалювання оливи чи біовугілля в котлах.

1.5. Висновки до розділу 1

1. Наведено склад та будову лігноцелюлозної біомаси з метою виробництва палив другого покоління шляхом піролізу. Залежно від виду рослинної біомаси наведено відсотковий вміст в ній лігніну, геміцелюлози та целюлози, які є основними її складовими, що визначають вид і режимні параметри процесу піролізу виходячи із бажаного виду і об'єму кінцевого продукту процесу піролізу.

2. Наведено основні етапи та види попередньої підготовки лігноцелюлозної біомаси до піролітичного розкладання залежно від її вихідного фізико-хімічного складу. Найбільш широко розповсюдженими є методи механічної попередньої обробки біомаси оскільки не потребують значних капітальних вкладень і витрат часу як при методах термічної та біологічної обробки біомаси і є доступними для усіх типів підприємств.

3. Аналіз основних видів процесу піролізу лігноцелюлозної біомаси свідчить, що з метою виробництва високоякісних синтез-газу та піролізної оливи потрібно використовувати повільний піроліз біомаси.

4. Аналіз параметрів, що впливають на ефективність процесу піролізу лігноцелюлозної біомаси свідчить, що регулюванням такими параметрами як розмір частинок, температура, тиск, швидкість нагрівання біомаси можна керувати процесом виробництва основних продуктів процесу піролізу (синтез-газ, біовугілля та олива) в бажаній кількості заданої якості.

РОЗДІЛ 2

ТЕХНОЛОГІЧНА ЧАСТИНА

2.1. Аналіз методів попередньої підготовки лігноцелюлозної біомаси до піролізу

Склад продуктів піролізу в значній мірі залежить від елементарного та хімічного складу лігноцелюлозної біомаси, яка підлягає піролітичному розкладанню. Як зазначено в [29] олігомерні ангідроцукри та левоглюкозани є важливими попередниками при виробництві основних продуктів хімічної та фармацевтичної промисловості. Саме хімічні реакції процесу піролізу забезпечують високий вихід вказаних сполук, сприяючи деполімеризації целюлози, та уникаючи явища її фрагментації. Таким чином, попередня обробка лігноцелюлозної біомаси має вибірково сприяти протіканню бажаних хімічних реакцій піролізу, в результаті чого ми матимемо задані продукти піролізу зазначеної якості. Основна мета попередньої обробки – змінити структуру лігноцелюлозного матеріалу, щоб зробити доступними целюлозну і геміцелюлозну складові біомаси задля їх швидшого розкладання шляхом піролізу. Методи попередньої обробки лігноцелюлозної біомаси можна розділити на фізичні, термічні, хімічні та біологічні.

Фізичні методи попередньої обробки біомаси

Фізичні методи включають промивання, подрібнення, ущільнення шляхом пелетування, гранулювання чи брикетування. Промивання реалізується з використанням води і основна мета цієї операції технологічного процесу – видалити значну частину лугів, наявних в біомасі, оскільки вони мають високу розчинність у воді. Промивання забезпечує високий вихід оливи [30].

Наступною операцією процесу попередньої обробки біомаси є дроблення. Ця операція дозволяє зменшити розмір частинок біомаси. За необхідністю, процес дроблення може реалізовуватися в два етапи для

досягнення заданої фракції помелу. Також, якщо це передбачено технологічним процесом, то для поділу частинок біомаси на різні фракції, їх просіюють через сита.

Гарно подрібнена біомаса, має більшу площу поверхні на одиницю її маси, що сприяє кращому тепло- та масообміну. З метою підвищення насипної щільності біомаси її пелетують, гранулюють чи брикерують. Такі технічні прийоми застосовують майже до усіх видів рослинних матеріалів (солома, тріска, тирса, лузга соняшника, кукурудзиння тощо). Також пелетування, гранулювання та брикетування покращує фізичні властивості біомаси, а саме міцність, стійкість до зберігання та транспортування, а в подальшому – спрощує процес її піролізу.

Попередня хімічна обробка

На протікання процесу піролізу і, як наслідок, вихід готової продукції також впливає і вміст в біомасі неорганічних мінералів. Попередня хімічна обробка сприяє легкому видаленню лігніну та геміцелюлози і є причиною отриманні більшої кількості глюкози. Основні методи попередньої хімічної обробки зазначені в наступних розділах проєкту [31].

Попередня термічна обробка

До найбільш поширених методів попередньої термічної обробки можна віднести сушіння, розрідження та паровий вибух. З перерахованих трьох методів попередньої термічної обробки сушіння найбільш часто використовують, оскільки значна частина сировини на основі біомаси містить вологу в різній кількості. Сушіння сприяє зменшенню вмісту цієї води в біомасі, що призводить до підвищення ефективності процесу її піролізу щодо енергетичних витрат на процес. Також сушіння сировини перед її піролітичним розкладанням допомагає уникнути засмічення систем подачі палива в камеру піролізу та підвищенню теплотворної здатності палива. Процес сушіння, який ґрунтується на використанні теплоти, застосованої до біомаси, за відсутності кисню в температурному діапазоні 195–310°C називається торрефікацією [32].

В результаті енергетичного ущільнення енергетична цінність готової продукції складає близько 85% початкової енергії та до 70% початкової ваги. Як приклад можна навести торф. Після тореффікації (обробки) модифікований торф, порівняно з його початковим станом, є більш стійким до біологічної деградації, має менші розміри та вищу теплотворну здатність в одиниці об'єму, його легше подавати в камеру піролізу.

Технологічна операція, яка здійснюється паровим вибухом, доволі часто застосовується в якості попередньої обробки лігноцелюлозної біомаси через її низьке енергоспоживання та мінімальне використання різних хімічних добавок. Упродовж короткого терміну дії (від кількох секунд до кількох хвилин) насичена пара під високим тиском в реакторі вступає в контакт з біомасою, після чого тиск різко падає, створюючи в біомасі вибухонебезпечну декомпресію в результаті чого відбувається деградація геміцелюлози з втручанням в матрицю лігніну [33]. Режимні параметри, які впливають на хід протікання процесу термічної обробки наступні: вміст вологи, температура, час витримки біомаси в реакторі, розмір частинок біомаси. Перевагою цього методу є можливість обробляти біомасу з відносно великими розмірами частинок (довжиною 30...60 мм) та відсутності потреби у використанні кислотного каталізатора. Винятком є випадки промислових масштабів виробництва та обробка деревини хвойних порід. Недоліком даного методу є те, що деякі продукти, що утворилися в результаті парового вибуху, можуть заважати протіканню певних хімічних реакцій процесу піролізу біомаси.

Попередня біологічна обробка

Для здійснення попередньої біологічної обробки використовують мікроорганізми, які розкладають біомасу на різні складові. З цією метою використовують гнойовик білий, гнойовик чорнильний, гриб *Trichoderma*, ін. Гриби – природні мікроорганізми, які здійснюють деградацію лігніну завдяки їх позаклітинній оксидазі, яка допомагає розщеплювати лігнін до води та вуглекислого газу. Целюлоза, в свою чергу, розкладається, переважно, буро-зеленими грибами, а лігнін – гнойовиком білим. Здатність

гноювика білого розкласти лігнін обумовлена наявністю лаккази та пероксидази, які діють як ферменти під час його деградації. Недоліком попередньої біологічної обробки біомаси є значна тривалість. Перевагою – низькі витрати енергії та високі екологічні показники [33].

2.2. Аналіз технологій піролізу рослинної біомаси

Технології піролізу рослинної біомаси залежать від обраного виду кінцевого продукту та типу біомаси, яка термічно розкладатиметься в камері піролізу. Зручною до використання є схема рис. 2.1 згідно з якою лігноцелюозна біомаса піролітично розкладається на три основні види продуктів, які взаємодіючи один з одним, створюють вторинні продукти розпаду.

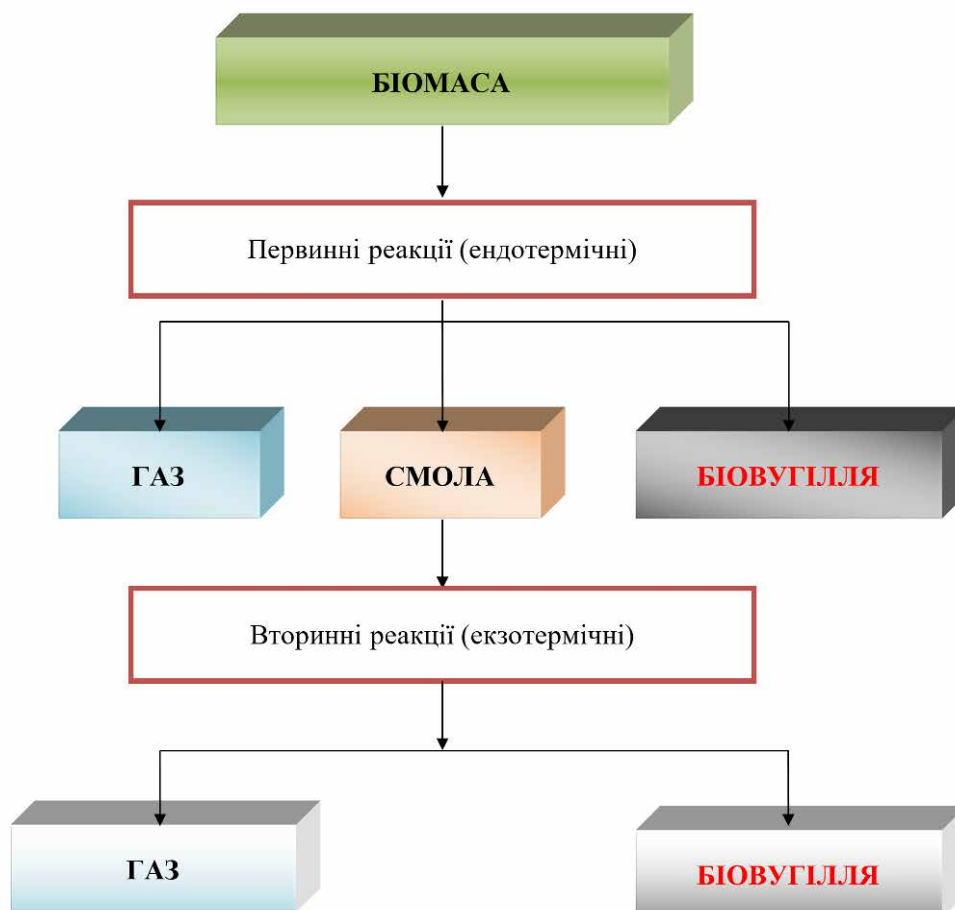


Рис. 2.1. Схема піролітичного розкладання лігноцелюозної біомаси [34]

Первинні реакції є ендотермічними (протікають зі значним виділенням енергії), і в результаті цих реакцій утворюються газ, смола та біовугілля. Вторинні реакції є екзотермічними (протікають з поглинанням енергії) на їх реалізацію. Результатом вторинних реакцій є газ і біовугілля.

Як зразок реалізації схеми піролітичного розкладання лігноцелюлозної біомаси наведемо схему піролізу деревини із зазначенням кількості вироблених основних продуктів піролізу та матеріального балансу усього процесу (рис. 2.3).

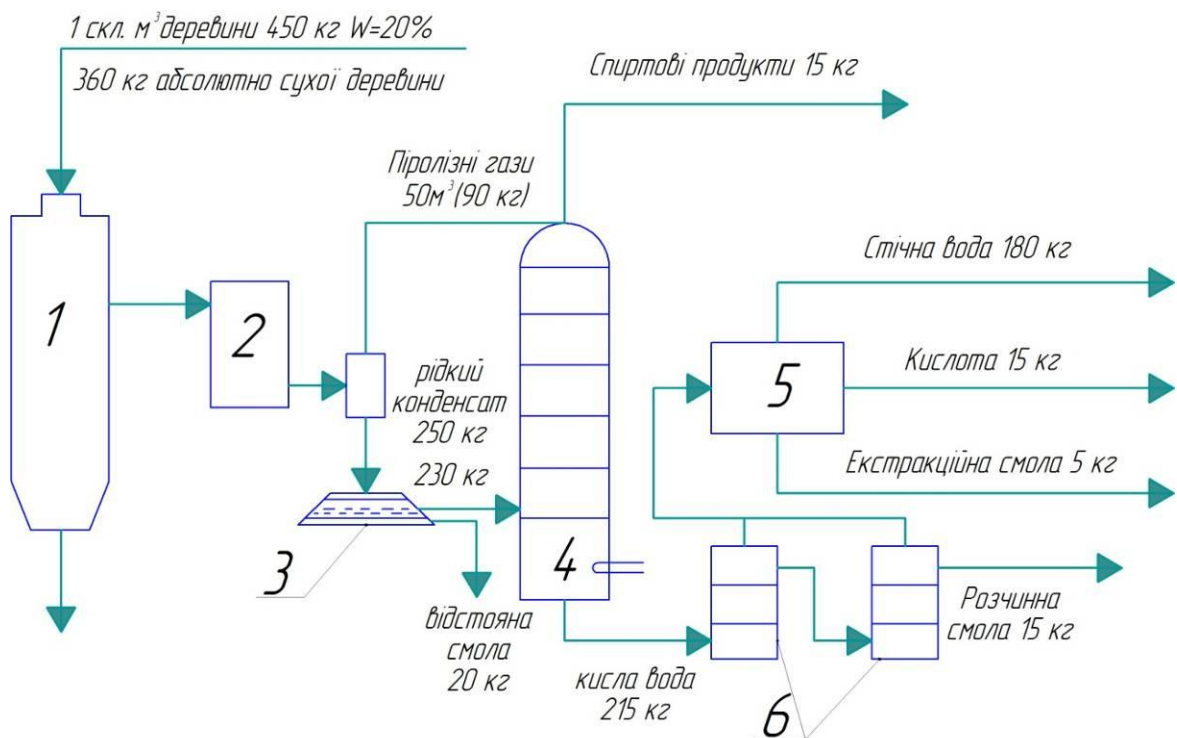


Рис. 2.3 Схема технологічного процесу піролізу деревини [35]: 6 – камера випаровування; 5 – екстрактор; 4 – колона ректифікаційна; 3 – відстійник рідкого конденсату; 2 – конденсатор охолодження парогазової суміші; 1 – реторта піролізна.

Парогазову суміш та біовугілля, як готові продукти процесу піролізу лігноцелюлозної біомаси (деревини) в реторті, отримуємо в діапазоні температур 400...500 градусів. Неконденсовані газы та рідкий конденсат є результатом охолодження парогазової суміші в конденсаторі 2. В схемі рис. 2.3 відстійник 3 слугує для збирання конденсату (рідкого). В ньому рідкий

конденсат вилучається із відстояної смоли та спрямовується до колони 4 ректифікаційного призначення для розділення на кислу воду та спиртові продукти. З метою виділення з кислої води оцтової кислоти кислу воду подають у камеру випарювання 6 для вилучення з неї розчинної смоли, а далі у екстрактор 5. Температура процесу піролітичного розкладання біомаси, тривалість, метод нагрівання біомаси та тип біомаси є факторами, від яких залежить кількість та склад кінцевих продуктів процесу піролізу.

Процес піролізу лігноцелюлозної біомаси (деревини) складається з чотирьох стадій [35]:

- стадія сушіння біомаси при температурах 115...158°C підведенням теплоти ззовні для вилучення надлишкової вологи та подальшою зміною структури цієї біомаси для надання біомасі характеристик, потрібних для її подальшого піролітичного розкладання;

- початкова стадія розкладання целюлози та лігноцелюлози біомаси (155...280°C). Характеризується продовженням підведення теплоти ззовні і виділенням CO_2 , CO , CH_3COOH та ін;

- при температурах 275...460°C утворюється та випаровується близько 72% від усієї кількості продуктів розпаду сировини. В результаті ендотермічної реакції виділяється значна кількість метанолу, CH_4 , CO , CO_2 , карбонільних сполук, складних вуглеводнів, оцтової кислоти та її гомологів, ефірів. Виділення смол фіксується наприкінці цієї стадії.

- при температурах 460 до 570°C протікає етап проколювання вугільного залишку. Процес є екзотермічним та протікає з поглинанням зовнішньої теплоти у значній кількості, що сприяє виділенню важкої смоли CO , H_2 , CO_2 , та складних вуглеводнів. Коли зазначені компоненти перестали виділятися можна вважати, що процес завершився. Все, що зостається після завершення процесу піролізу – це біовугілля.

Чіткого поділу між зазначеними стадіями піролізу лігноцелюлозної біомаси на практиці немає. Одна стадія плавно перетікає в іншу. З к продукти піролітичного розкладання біомаси усуваються як парогазова суміш. Кінцевим

етапом процесу піролізу біомаси є охолодження цієї парогазової суміші в конденсаторах. Неконденсовані гази та рідкий конденсат є продуктами поділу зазначеної парогазової суміші. Синтез-газ, рідина піролізна та біовугілля є кінцевими продуктами процесу піролізу деревини. Далі рідку фракцію відстоюють. В процесі відстоювання рідка фракція поділяється на смолу та водяну пару. Залежно від вологості та розмірів деревини, температури тривалості процесу та швидкості нагрівання деревини матимемо різну кількість кінцевих продуктів піролізу.

2.3. Розробка технологічної схеми попередньої підготовки деревної біомаси до піролізу

Підготовку деревини до піролізу будемо виконувати фізичним методом.

1) Обдирка деревини. Для виконання цієї операції обираємо машину для обдирки деревини XING YUAN WOOD потужністю 15 кВт та продуктивністю 3 т/год. Обробляється щойно зрубана деревина дубу та інших дерев широколистяних порід.

2) Розколювання деревини. Ця операція здійснюється на дровоколі з гідравлічним принципом роботи продуктивністю 3 т/год (потужність 7,5 кВт) з метою розколювання великих за розміром гілок дерев, сегментів колод та твердої деревини для підготовки до другого етапу подрібнення та очищення.

3) Перший етап подрібнення деревини реалізується з використанням подрібнювача барабанного типу W-Drum-215 продуктивністю 3 т/год (потужністю 45 кВт), рис. 2.4. Спосіб подачі деревини в подрібнювач барабанного типу є примусовим (шнекова подача / конвеєрна стрічка). Шнек (стрічка) можуть бути як горизонтальними, так і встановленими під кутом. Завантажувальний жолоб для сировини має прямокутну форму та розміщений вздовж барабану з ножами. Основними елементами конструкції подрібнювача барабанного типу є: гідравлічна система, електронна система, корпус, шнек (стрічка конвеєрна), фрези, стійка.

Плита, на якій встановлюється подрібнювач, виготовлена зі сталі і має зварну конструкцію. Ножовий валик оснащений двома ножами, зафіксованими ножовими болтами та притискними блоками.



Рис. 2.4. Подрібнювач деревини W-Drum-215 [36]

До масляного циліндру масло закачується гідравлічною системою з ручним масляним насосом. Під час ТО вузол подавального валика (верхнього) піднімається, що полегшує регулювання зазору між нижнім ножом та різальним інструментом. Корпус є несучою частиною усього пристрою, будучи звареним зі сталевих високоміцних частин. Завдяки гідравлічній системі верхній вузол подавального валика, залежно від товщини деревини, яку потрібно подрібнити, може підніматися та опускати на задану висоту. Нарізані частинки деревини просіюються через сита. Частинки, які є більшими за заданий розмір повертаються до подрібнювача, а потрібного розміру – спрямовуються на відбирання з барабану для другого етапу подрібнення. Кінцева довжина частинок деревини може регулюватися. Подрібнювач має свої обмеження. Не можна обробляти деревину діаметром понад 350 мм, або, навпаки меншу за 30 мм, коротку – меншу за 250 мм і надто тонку (>5 мм), а також деревину з нерівною поверхнею. Обладнання є економічно доступним, має високу продуктивність та ефективність і низьке споживання енергії.

Технічні характеристики: розмір сировини – до 160×400 мм; потужність масляного насоса – 1,5 кВт; швидкість обертання – 590 об/хв; потужність подачі – 3×2 двигуни, кВт; вага – 2990 кг; габарити – 1470×1550×970 мм. Розмір дроблення – менше за 4 мм.

4. Сушіння деревини в сушарці роторного типу з метою зниження вихідної вологості сировини до вологості, рівної 10–12%. Це дозволить оптимізувати виробництво пелет без непотрібних витрат на усунення зайвої вологи з матеріалу під час виробництва пелет, рис. 2.5.



Рис. 2.5. Сушарка роторного типу для сушіння біомаси моделі Ф1200×120000, оснащена двома циклонами Ф800 [36]

Технологічні схеми виробництва пелет приблизно подібні. В технологічній схемі передбачено наявність роторної сушарки, після якої встановлено один або два сушильні циклони (первинної та вторинної сушки), залежно від вимог до ступеня очищення сировини. Рівень домішок в сировині після очищення не перевищує 30 мг/м³ (за нормальних умов). Для підігрівання роторної сушарки застосовують тепло, отримане від спалювання біомаси в печі. Частина повітря, після участі в циклі роботи, проходить очищення і зневоднення і в підігрітому стані повертається до сушарки для підтримання процесу сушіння іншої порції біомаси. Переміщення біомаси в барабан сушарки здійснюється потоком повітря, створеним вентилятором сушарки. Біомаса сушиться в кілька етапів. На механічному рівні це різні секції сушарки, об'єднані в один блок, для забезпечення однакової швидкості обертання. При

обертанні барабану біомаса переміщується з секції в секцію, за рахунок чого кілька разів обробляється потоком гарячого повітря. Сушарка має високий тепловий ККД, рівний 80–90%, оскільки значна частина теплоти, що надходить до барабану, витрачається на випаровування вологи. При цьому швидкість сушіння біомаси складає 28...75 кг/(м²·год). Якість та кількість висушеної біомаси в часі є стабільною, що забезпечується рівномірною швидкістю руху шнека, керованого безступінчастим регулюванням. Кількість біомаси, що подається в сушарку, регулюється її вологістю. Подачу гарячого повітря в барабан регулюють автоматичним клапаном управління. Загалом, сушарка рис. 2.5 дозволяє регулювати температуру сушіння, швидкість, об'єм, температуру та вологість агенту сушіння тощо. Основні технічні характеристики сушарки наступні: знімає вологість з 55 до 10% Кількість секцій (етапів сушіння) – до 3 шт; температура на вході в сушарку – до 700 градусів; швидкість обертання – 3...8 об/хв. До складу сушарки входять двигун, редуктор, вентилятор, барабан, сепаратор, циклони, подавальний шнек / стрічка конвеєрна, піч для формування гарячого повітря. Кут встановлення барабану складає 1,5°, що дозволяє біомасі під дією сили тяжіння рухатися від точки входження в сушарку до її хвостової частини (точки відбирання висушеного продукту). Додатково цей рух забезпечується вентилятором всмоктувальної дії.

Для отримання ступеню подрібнення біомаси до борошно-подібного помелу використовують молотковий млин, рис. 2.6 потужністю основного двигуна 30...160 кВт та продуктивністю до 3...25 т/год. Розмір частинок біомаси після обробки в молотковому млині складає до 0,2 мм.

Для виробництва паливних гранул використовують машину для виробництва пелет моделі MZLN768 (з основною серією двигунів 8P), рис. 2.7.

MZLN768 – це спеціальна машина для виготовлення паливних гранул, як правило циліндричної форми, діаметром 10...25 мм та довжиною, яка до 4 разів є більшою за діаметр. Основні характеристики: наявність системи автоматичного впорскування мастила з можливістю її налагоджування; наявність пружинної муфти, вбудований механічний захист від перевантаження двигуна; підшипники валів мод. SKF; коробка передач – двоступенева;

передача обертового моменту – через черв'ячний редуктор; дверцята камери виробництва пелет – 6 мм / SUS304; дозуючий бункер виготовлений з нержавіючої сталі з передбаченою функцією запобігання злежуванню біомаси; живильник; кільцева матриця виготовлена з матеріалу 42CrMo.



Рис. 2.6. Молотковий млин [36]

Ефективність машини для виготовлення паливних гранул на деревині складає 98% за рахунок використання високоточних евольвентних передач. Для забезпечення плавної передачі зубці зубчатих коліс після термічної обробки охолоджуються в воді для підвищення твердості їх поверхні. Також поверхня зуба цементується на глибину 2,4 мм. Це збільшує зносостійкість деталей, подовжує термін їх служби. Додатково поверхня зубів шліфується та полірується, що забезпечує вищий рівень ковзання поверхонь коліс одна по одній, і робить роботу зубчатої пари безшумною. Вали виготовлені з легованої сталі, термічно оброблені та шліфовані. Деталі машини мають високу твердість, що покращує стійкість його деталей до втоми та забезпечує високу зносостійкість та безпеку експлуатації. Секція пресування гранул складається з

матриці та двох роликів, що забезпечує рівномірний розподіл зусилля пресування.



Рис. 2.6. Машина з виробництва паливних гранул моделі MZLN768 [36]

Діаметр кільцевої матриці 762 мм. Вона виготовлена відливкою в піщану форму. Це забезпечує суцільність конструкції, можливість витримувати вищі динамічні навантаження та працювати при вищих швидкостях пресування. Для виготовлення пелет з деревини використовується синхронна робота основних робочих органів – циліндричного притискного ролика та кільцевої матриці. В дозуючому бункері біомаса перемішується, змішується за потреби з клеями, гартується, відпускається і надходить через дозуючий пристрій шнекового живильника в камеру грануляції електричного гранулятора. Розподільна плита гранулятора розподіляє рівномірно нагріті загартовані матеріали на кільцеву матрицю, через яку пресувальні ролики обертливим рухом за рахунок сил тертя відпресовують з матричного отвору (у вигляді колони) вермішелеподібну гранулу, яка на гранули розрізається в розмір за допомогою ножа. Готові гарячі

гранули спрямовуються на охолодження. Гранули пресуються з високою швидкістю, мають високу міцність та гарну поверхневу якість.

З метою запобігання перегріванню підшипники SKF охолоджуються та змащуються оливою, яка постійно циркулює в системі. Загалом використання оригінальних запасних частин забезпечує безперебійність роботи, тривалий термін роботи обладнання, можливість виконання миттєвих замін зламаних одиниць обладнання.

В сучасній сфері виробництва пелет охолоджувач є ключовою одиницею обладнання, яка формує товарну цінність готової продукції. З цією метою в технологічному процесі виготовлення пелет використовують охолоджувач моделі СКЛН14×14 продуктивністю 3 т/год, потужністю 0,75 кВт, рис. 2.7.



Рис. 2.7. Охолоджувач пелет моделі СКЛН14×14 [36]

Охолоджувач пелет моделі СКЛН14×14 має протипотоковий принцип роботи, так як напрямок агенту охолодження (повітря) є зустрічним напрямку подачі пелет. Пелета подається зверху, а агент охолодження знизу і,

піднімаючись догори, охолоджує їх. Спочатку агент охолодження контактує вже з охолодженими пелетами, а потім, в підігрітому стані, вже з гарячими. Це дозволяє поступово підвищувати температуру пелет. Описаний принцип роботи охолоджувача забезпечує рівномірну швидкість подачі агенту охолодження у великому обсязі, незначну різницю температур між пелетами та агентом охолодження. Готові пелети, як правило, мають температуру на 3...5 градусів вищу за кімнатну. Відсоток сміття в пелетах не перевищує 4%.

До основних вузлів охолоджувача пелет відносяться: живильник, об'ємний бункер з дозатором, ємність для охолодження пелет та механізм розвантажування. Функція живильника полягає в рівномірній подачі гранул в установку, при цьому блокуючи потрапляння зовнішнього повітря, щоб забезпечити стабільність потоку в охолоджувачі між пелетами. Для цього використовують крильчатку простої конструкції та високим ступенем ущільнення з низьким енергоспоживанням. Так як вологість пелет сягає 14...17%, а температура пелет складає 74...89°, то елементи конструкції живильника виготовляють з нержавіючої сталі. Об'ємний бункер з дозатором забезпечує рівномірне розподілення та подачу агенту охолодження до пелет, що забезпечує їх високу якість. Ємність для охолодження пелет має форму восьмикутника, що дозволяє уникнути мертвих зон з необробленими пелетами, як в прямокутнику. Потік агенту охолодження є стабільним і більш рівномірним. Для уникнення корозії поверхонь ємності для охолодження пелет її виготовляють з нержавіючої сталі. Механізм розвантаження забезпечує плавне впускання/випускання агенту охолодження, рівномірне зусилля вивантаження матеріалу тощо.

Для пакування пелет використовується автоматична ваго-пакувальна машина моделі DCS-C50/D: швидкість пакування 6...8 мішків/хв; потужність двигуна – 1,1 кВт; статична точність $\pm 0,1\%$, динамічна $\pm 0,2\%$; тиск повітря 0,4...0,6 МПа, швидкість повітря – 1,5 м/с ; вага мішка – 10...50 кг. Основні вузли ваго-пакувальної машини: стрічковий конвеєр, що приводиться в рух двошвидкісним двигуном; повітряні циліндри, що відкривають та закривають дозувальний пристрій; ваговий ківш, датчики зважування; зважувальний

пристрій; бункер мішкоприймальний з 2 передніми та 2 задніми затискними важелями; електронний пристрій керування з контролером ваги.

Під час автоматичного режиму роботи ваго-пакувальної машини система управління процесом зважування подає імпульс на заслінку подачі і розпочинається робота. Встановлюється швидкість подачі і розпочинається двоетапне завантаження пелет в бункер. Впродовж першого етапу завантажування пелети зсипаються в бункер з високою швидкістю до заданої проміжної ваги. Впродовж другого етапу швидкість подачі в бункер падає і подача пелет припиняється, коли вага пелет досягла бажаного значення. Заслінка закривається і процес динамічного зважування зупиняється. Система керування встановлює, чи перебуває затискний пристрій мішка в заданому положенні і коли він в заданому положенні, надсилається відповідний сигнал системі керування машиною. Розвантажувальні дверцята вагового бункера відкриваються і пелети надходять в пакувальний мішок. Заслінка вагового бункера закривається, затискний пристрій мішка відпускається і запаяний пакувальний мішок падає, після чого транспортується конвеєрною стрічкою в

2.4. Розробка технологічної схеми піролізу деревної біомаси

Для виробництва піролізного газу та оливи вирішено обрати повільний метод піролізу з періодичним завантаженням біомаси. З цією метою прийнято рішення модернізувати газогенераторну установку, розроблену в НУБіП під керівництвом професора Голуба Г.А. шляхом заміни камери газифікації на піролізну камеру. Це дозволить виробляти з біомаси не лише синтетичний газ, але також піролізну оливу та мати, в якості побічного продукту, біовугілля. Загальний вигляд та технологічна схема піролізу деревної біомаси, яку обрано в якості прототипу, наведена на рис. 2.8.

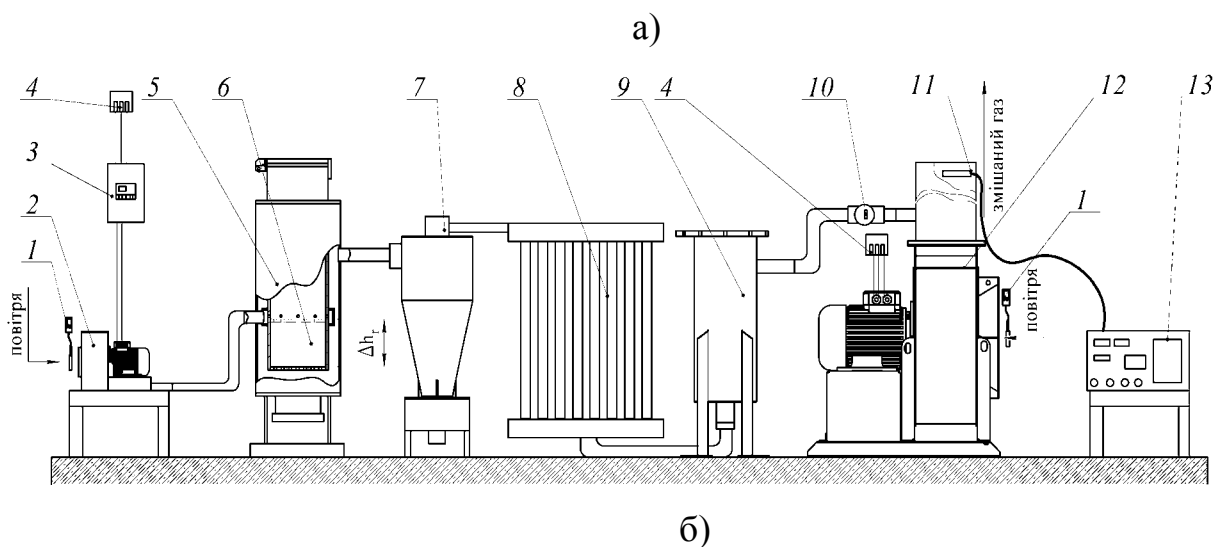


Рис. 2.8. Загальний вигляд та технологічна схема піролізу деревної біомаси [37]: а) загальний вигляд; б) технологічна схема.

Установка рис. 2.8 може працювати як в режимі виробництва синтез-газу, так і в режимі піролізу біомаси. Якщо установка працює в режимі піролізу, то вузол забезпечення повітряного режиму, до якого входить повітрорудка 2 з анемометром 1 для контролю швидкості дуття, що підключаються через розетку 0,4 кВт поз. 4 через частотний перетворювач 3, перебувають у відключеному стані. Вузол забезпечення повітряного режиму підключається лише у випадку роботи установки в режимі газифікації.

Основним вузлом піролізної установки 6 є камера піролізу, яка працює за схемою повільного піролізу. Відпрацьована деревина при виробництві газу у

вигляді попелу збирається в нижній частині установки і усувається механічним методом. Синтез-газ відбирається у верхній частині установки. При виробництві піролізної оливи вироблений синтез-газ спрямовується на підтримання процесу піролізу як зовнішнє джерело енергії. Піролізна олива відбирається з верхнього патрубку і спрямовується на систему охолодження 8 і очищення 7. У випадку виробництва піролізної оливи система охолодження є проточної дії, де агентом охолодження слугує вода, яка після виконання циклу роботи, очищується та повертається в систему подачі агенту охолодження до охолоджувача. Коли бажаним продуктом є не піролізна олива а синтез-газ, то після його виробництва газ проходить очищення від механічних домішок в циклоні 7 та охолоджується в охолоджувачі скрубєрного типу 8 до температури 40...45°C. Скрубер містить вузол подачі води (насос циркуляційного типу) та вузол очищення води. Рух води та продуктів піролізу в охолоджувачі є зустрічним, що дозволяє видаляти з продуктів піролізу окисли важких металів, сажу тощо. При потребі доочищення газу та оливи від дрібних домішок та складних хімічних сполук в схемі передбачено фільтр тонкого очищення 9 з каталізатором, який виконує функцію хімічної нейтралізації шкідливих компонентів та сполук в готовому продукті. Фільтр 9 може видаляти залишкову вологу з продуктів піролізу. Також в технологічній схемі присутній роторний лічильник виробленого синтез-газу 10, датчик вмісту в синтез-газу CO 11. При потребі встановлення хімічного складу виробленого газу використовується газоаналізатор 13. Якщо потрібно встановити фракційний склад піролізної оливи замість газоаналізатора 13 установка оснащується апаратом для визначення фракційного складу оливи K45090 (для проведення розгонки).

Установка містить змішувач синтез-газу з повітря, яка слугує для формування паливної суміші.

Для реалізації повільного піролізу розмір частинок деревини повинен складати до 50 мм. Тривалість перебування частинки деревини в камері піролізу складає 450 с при середній швидкості їх нагрівання 1°C/с. Температура

в камері піролізу при виробництві олив складає 550°C , при виробництві синтез-газу – 1150°C .

Установка рис. 2.8 може працювати в різних циклах: основний продукт – олива, біовугілля та синтез-газ є побічними продуктами піролізу; основний продукт – синтез-газ, а побічні продукти процесу – піролізна олива та біовугілля.

Процес піролізу деревини передбачає чотири стадії:

– сушіння деревини в бункері установки при температурі $115\dots158^{\circ}\text{C}$. Теплота підводиться ззовні від нагрівальних тенів по периметру камери піролізу, щоб зневоднити сировину та змінити структуру волокон для надання характеристик, потрібних для її подальшого піролітичного розкладання.

– початок розкладання целюлози та лігноцелюлози деревини ($155\dots280^{\circ}\text{C}$). Результатом протікання цієї стадії є виділення CO_2 , CO , CH_3COOH та ін;

– при $275\dots460^{\circ}\text{C}$ випаровується близько 72% від усієї кількості продуктів розпаду деревини. Виділяється значна кількість метанолу, CH_4 , CO , CO_2 , карбонільних сполук, складних вуглеводнів, оцтової кислоти та її гомологів, ефірів, а також смол (наприкінці стадії).

– при 460 до 570°C проколюється вугільний залишок. Виділяються важкі смоли, CO , H_2 , CO_2 , та складні вуглеводні. Коли ці компоненти перестали виділятися – процес є завершеним. Після завершення процесу піролізу залишається тільки біовугілля.

Чіткого поділу між стадіями піролізу немає, одна стадія плавно перетікає в іншу. З камери продукти піролітичного розкладання усуваються як парогазова суміш. Кінцевим етапом піролізу деревини є охолодження парогазової суміші (рідкий конденсат, неконденсовані гази) в конденсаторах. Синтез-газ, рідина піролізна та біовугілля є кінцевими продуктами процесу піролізу деревини. Далі рідку фракцію відстоюють. В процесі відстоювання рідка фракція поділяється на смолу та водяну пару.

2.5. Висновки до розділу 2

1. Проведення аналізу методів попередньої підготовки лігноцелюлозної біомаси до піролізу дозволило встановити, що фізичні методи її підготовки є простими, економічно доступними і забезпечують задану якість біомаси в підготовленому стані.

2. Аналіз технологій піролізу рослинної біомаси дозволив встановити, що саме повільний метод піролізу з періодичним завантаженням біомаси в піролізну установку дозволить отримати задані кінцеві продукти (синтез-газ та піролізну оливу) в бажаній кількості та заданої якості.

3. Розроблено технологічну схему попередньої підготовки деревної біомаси до піролізу, а саме – виробництво пелет з деревини. Ця технологія дозволить отримати високоякісну сировину (пелети) з високою насипною щільністю та теплотворною здатністю, що дозволяє їх легко піролітично розкласти, програмуючи заданий склад вироблених продуктів піролізу в заданій кількості.

4. Розроблено технологічну схему повільного піролізу деревної біомаси. В якості прототипу обрано установку, розроблену в НУБіП України під керівництвом проф. Голуба Г.А. Модернізація установки полягала в розробці піролізної установки. Це дозволило виробляти з біомаси не лише піролізний газ, але також піролізну оливу та мати, в якості побічного продукту, біовугілля.

РОЗДІЛ 3

КОНСТРУКТОРСЬКА ЧАСТИНА

3.1. Аналіз конструкцій камер піролізу лігноцелюлозної біомаси

Камери піролізу (реактори) біомаси поділяються: за способом подачі сировини в зону реакцій; за типом процесу піролізу; за величиною тиску газу (атмосферного, вакуумного та надлишкового тиску); за природою зовнішнього джерела теплоти, що надходить на процес (сонячна енергія, мікрохвильове нагрівання, електричне нагрівання, інертне середовище та димові газу); за режимом роботи (безперервної та періодичної дії).

Залежно від способу переміщення біомаси в зону реакцій камери піролізу поділяються на: механічні камери; камери зі стаціонарним шаром; гравітаційні камери; камери з пневматичним шаром.

3.1.1. Гравітаційні камери піролізу [38]

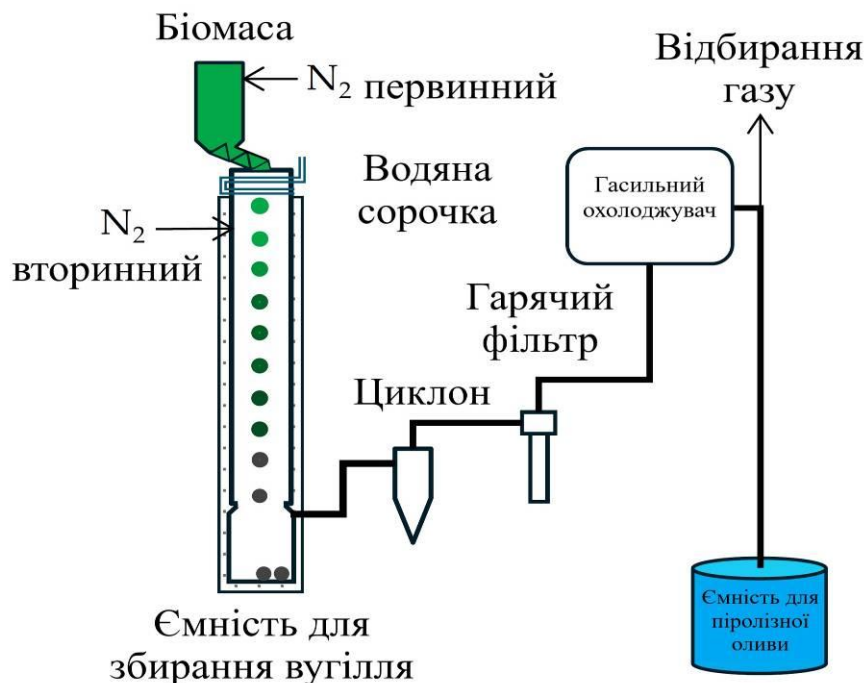


Рис. 3.1. Схема роботи піролізної установки з гравітаційною камерою піролізу [38]

Використання сили тяжіння з метою забезпечення безперервного руху продуктів, які термічно розкладаються в камері піролізу, є простим та економічно доступним методом виробництва палив II покоління. В камері піролізної установки безперервної дії гравітація забезпечує низхідний рух частинок біомаси з бункера для сировини через камеру до ємності збирання прореагованого вугілля. Щільність та розмір частинок біомаси задають швидкість їх осідання в камері піролізу. З високою щільністю частинки осідають швидше, особливо при високотемпературному методі піролізу, коли гравітаційним силам протидіють конвективні теплові потоки. Найбільш поширеними серед установок з гравітаційними камерами піролізу є трубчасті гравітаційні камери та камери вільного падіння частинок біомаси, які конструкційно мало чим відрізняються між собою. Установки з гравітаційними камерами піролізу біомаси найчастіше застосовують при проміжному та швидкому методах піролізу. До камери піролізу з бункера сировини біомаса надходить за допомогою шнека чи транспортера, верхня частина яких оснащена водяним охолоджувачем для уникнення перегрівання. Як правило азот використовують двома типами потоків: первинним і вторинним. Первинний потік протікає через шнек (транспортер) і є холодним. Вторинний потік подається нагрітим до потрібної за технологічним процесом температури. Під дією сили тяжіння частинки біомаси опускаються (проходять) через камеру піролізу. В нижній частині піролізної установки рис. 3.1 закріплено ємність для збирання вугілля. Перевагою вказаної конструкції установки є перебування в камері піролізу до 72% за масою біомаси. Недоліком представленої піролізної установки є обмежена потужність через відносно невеликі габарити, наявність температурних градієнтів, мала швидкість подачі сировини – до 2,5 кг/год. Трубчаста гравітаційна камера (камера витіснення) іноді інтегрується в інші конструкції установок, наприклад з нерухомим шаром, з метою підвищення їх ефективності піролітичного розкладання сировини.

3.1.2. Камера з пневматичним перемішуванням шару [38]

В камерах з пневматичним перемішуванням шару рух біомаси забезпечується або рециркулюючим газом, або попередньо стиснутим нагрітим

інертним газом (наприклад азотом). Камери з пневматичним перемішуванням шару призначені для реалізації швидкого піролізу попередньо підготовленої (подрібненої і посушеної) біомаси. До зазначеного типу установок можна віднести установки з: камерами із захоплюваним потоком; камери з циркулюючим псевдозрідженим шаром; камери з конічним жолобчастим шаром; камери з барботажем псевдозрідженим шаром, (рис. 3.2 а – д).

Камери піролізу з барботажем псевдозрідженим шаром (рис. 3.2а) мають просту та надійну конструкцію і є зручними в експлуатації [38]. Вказані камери широко використовують як для лабораторних досліджень, так і в комерційних цілях, оскільки конструкція забезпечує точний контроль температури та ефективну теплопередачу. Щоб забезпечити високу ступінь нагрівання попередньо подрібненої до 2...3 мм і висушеної біомаси в камері реалізовано високий рівень теплопередачі та ефективне псевдозрідження шляхом використання суміші азоту з піском.

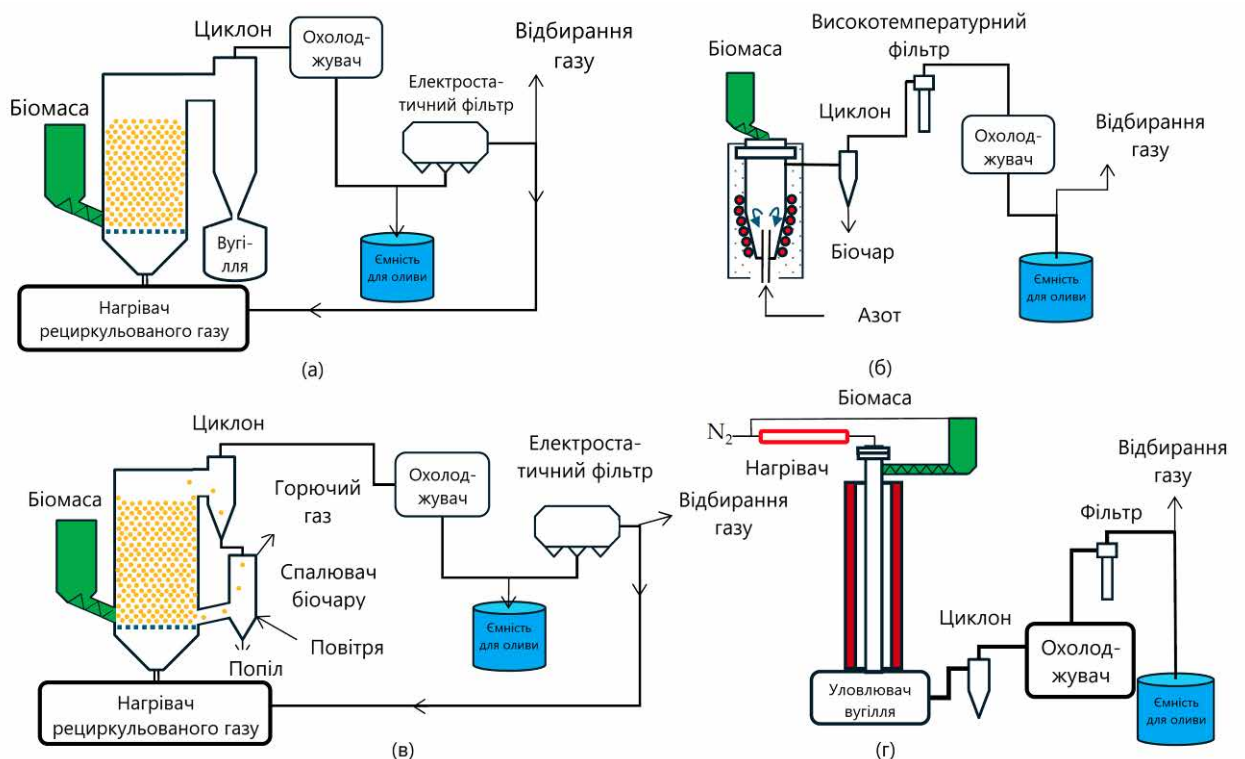


Рис. 3.2. Схеми роботи камер піролізу з пневматичним перемішуванням шару [38]: а) камера піролізу з барботажем псевдозрідженим шаром; б) камера

з конічним жолобчастим шаром; в) камери з циркулюючим псевдозрідженим шаром; г) камера піролізу із захоплюваним потоком

Такі камери підтримують частинки біомаси в наполовину суспендованому стані, створюючи псевдозріджений шар з рівномірним перемішуванням та розподілом температури та застосовуючи газ зі швидкістю, що є вищою за мінімальну швидкість псевдозрідження. Проте, максимальна ефективна швидкість газу є верхньою межею його швидкості, при якій оптимізовано виробництво піролізної оливи. Вихід кінцевого продукту в камері піролізу суттєво залежить від якості перемішування частинок біомаси з піском та ступеню флюїдизації усього шару. Камера піролізу рис. 3.2а при роботі на сухій деревині забезпечує високий рівень виробництва піролізної оливи (50...70% за масою). Недоліком є можливість забруднення рідкої фракції кінцевого продукту дрібним вугіллям, що потребує використання додаткових апаратів її очищення (циклонів). Описані камери піролізу, особливо високопродуктивні промислових масштабів, потребують якісного управління явищем теплопередачі щоб забезпечувати високий вихід піролізної оливи в умовах безперервної роботи. Також недоліком використання таких камер є високі вимоги до швидкості газу та виду і розмірів частинок біомаси, щоб забезпечити належний рівень псевдозрідження.

Камера з конічним жолобчастим шаром (рис. 3.2б) є чудовою альтернативою камерам з псевдозрідженим шаром в умовах швидкого та миттєвого видів піролітичного розкладання біомаси [38]. У верхній частині камери виготовлено отвір для подачі біомаси. Інертним газом, що бере участь в процесі піролізу є азот, надходження якого в камеру регулюється контролером потоку. Піч з примусовою конвекцією слугує для спрямування летких речовин, що виходять з камери, до циклону та фільтру, де видаляються дрібні частинки вугілля. Безперервне видалення вугілля та подача твердих речовин забезпечується конічною конструкцією камери, яка надає ефективну обробку великих та нерівномірних частинок сировини, підвищуючи швидкість тепло- та масообмінних процесів. Оптимізація виходу піролізної оливи (до 80% за масою

біомаси) відбувається за рахунок зменшення вторинних реакцій крекінгу через меншу тривалість перебування газу в камері. Камери з конічним жолобчастим шаром призначені для оснащення піролізних установок безперервної дії промислових масштабів (25 кг/год) з високою здатністю камери розкласти біомасу з широким діапазоном розмірів та щільності її частинок.

Камери з циркулюючим псевдозрідженим шаром (КЦПШ) (рис. 3.2в) – це вдосконалені системи піролізу біомаси з операційною подібністю до установок, оснащених камерами з псевдозрідженим шаром [38]. Від класичних камер піролізу із псевдозрідженим шаром, де використовується одна камера нагрівання, КЦПШ мають два блоки, взаємопов'язані між собою: один слугує для піролітичного розкладання сировини, інший – для спалювання біовугілля для теплових потреб. Завдяки описаній конструкції реалізовано безперервну циркуляцію теплоносія (неорганічного матеріалу на зразок піску, кремнію), нагрітого у другому блоці, який у нагрітому стані надходить до першого блоку для піролітичного розкладання біомаси. Біомаса в КЦПШ перебуває короткий проміжок часу через можливість використовувати в технологічному процесі газів з високими швидкостями. При цьому досягається ефективний контакт теплоносія з частинками біомаси та їх ретельне перемішування, а також забезпечується контроль режимних параметрів в камері (тиск, температура) та повнота протікання хімічних реакцій. КЦПШ попри складну конструкцію та вищі потреби в енергії для піролітичного розкладання біомаси мають ряд переваг: високу ефективність розкладання біомаси для виробництва кінцевих продуктів процесу (оливи, біовугілля та синтез-газу); можливість використання неконденсованих газів та біовугілля з метою рекуперації енергії тощо. За [38] сучасні КЦПШ набули широкого використання в нафтопереробній промисловості, проте легко переналагоджуються для термічного розкладання біомаси з метою виробництва піролізної оливи в обсязі 79% (мас.).

Камера піролізу із захоплюваним потоком, далі КПЗП (рис. 3.2.д) – використовують для піролізу попередньо підготовленої (подрібненої та підсушеної) біомаси [38]. В камеру піролізу сировина подається завдяки системі подачі з регульованою швидкістю надходження її частинок. Газ, який

транспортує частинки біомаси в камеру піролізу, називається первинним або транспортуючим. Зазначений газ попередньо нагрівається в камері нагрівання (нагрівач на рис. 3.2д) і в нагрітому стані захоплює частинки біомаси доставляючи їх в камеру піролізу. Швидкість частинок біомаси дорівнює швидкості первинного газу. В момент надходження в камеру піролізу частинки сировини проходять через зону високих температур, де протікають реакції процесу піролізу. Щоб контакт між частинками сировини та гарячими газами камери не був передчасним через шнек в бункер піролізної установки вводиться азот (вторинний газ). Для забезпечення оптимальних робочих умов КПЗП містить механізм контролю тиску. КПЗП, в порівнянні з камерами піролізу з псевдозрідженим шаром, працює в діапазоні температур до 1500°C. Також відомі конструкції камери піролізу із захоплюваним потоком демонструють високу працездатність при швидкостях нагрівання до 10 000°C/с. Час нагнітання високої температури в КПЗП становить близько 5 секунд.

3.1.3. Камери піролізу з суцільним шаром біомаси стаціонарного типу КПСШСТ [38]

Установки з КПСШСТ використовується, переважно, для проведення лабораторних досліджень. Швидкість потоку інертного газу в установці не перевищує 50 до 300 мл/хв для утримання шару біомаси в камері піролізу нерухомим. Конструкційно передбачено, що зразок сировини може або поміщатися в камері піролізу безпосередньо (рис. 3.3а – в), або як показано на рис 3.3г на металевій чи керамічній підставці, або в шарі мінеральної вати. Такі установки можуть реалізовувати повільний, проміжний чи швидкий типи розкладання біомаси, а КПСШСТ бувають періодичної і безперервної дії [38].

Установки з камерами періодичної дії реалізують закритий цикл замкнутої системи (надходження біомаси чи відбирання продуктів піролізу під час піролізу відсутні). Об'єм таких камер не перевищує 1 дм³ щоб забезпечити рівномірний розподіл температури. Перевагою є висока ступінь конверсії вуглецю біомаси в готові продукти піролізу (повний піроліз), оскільки сировина може перебувати в камері тривалий час (впродовж годин). Проте дана технологія має ряд недоліків: можливість розкласти обмежену кількість

біомаси, що стримує збільшення продуктивності установки за потреби; ручне обслуговування установки; неможливість станом на сьогодні зменшити експлуатаційні витрати та вивести установку на промисловий рівень.

Камери напівперіодичної дії (рис. 3.3б) [38] отримали широке застосування завдяки можливості розділення продуктів та мають достатньо високий рівень контролю за технологічним процесом. Їх використовують для здійснення повільного та проміжного видів піролізу. В цій установці сировина або періодично видаляється, або перебуває в КПСШТ упродовж усього циклу. Сировина, що підлягає розкладанню, є відокремленою від неконденсованих газів за рахунок того, що вироблені гази постійно видаляються з КПСШТ. Це забезпечує чистоту та високий вихід готових продуктів.

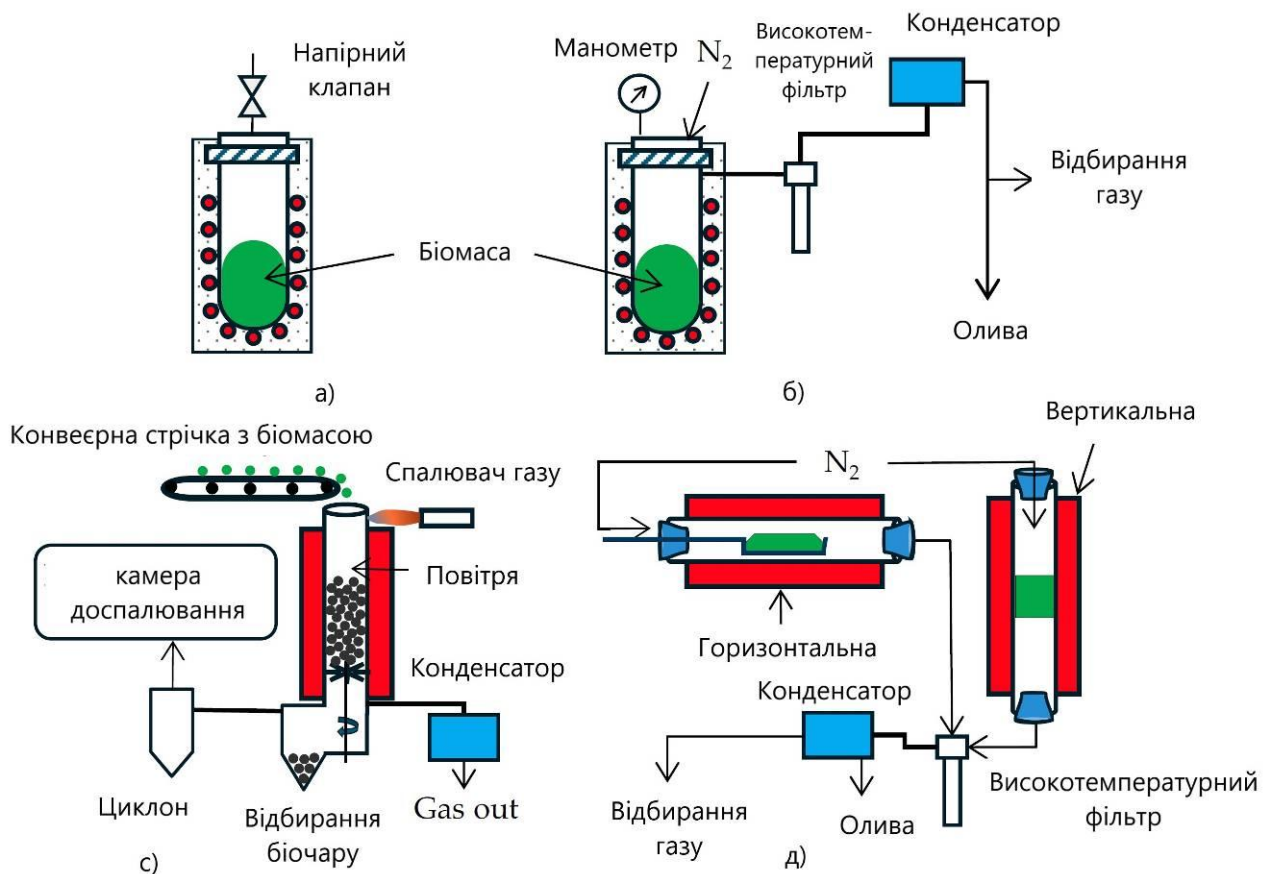


Рис. 3.3. Схеми роботи камер піролізу з суцільним шаром біомаси стаціонарного типу [38]: а) камера піролізу періодичної дії; б) камера піролізу напівперіодичної дії; в) камера піролізу безперервної дії; г) камера піролізу безперервної дії у вертикальному та горизонтальному виконанні

Камера піролізу безперервної дії представлена на рис. 3.3в [38]. Основна перевага представленої конструкції є безперервнi видалення біочару та подача сировини. Вироблені неконденсовані гази в цій конструкції камери спрямовуються через електричним чином нагріту трубу до камери догорання блоку доспалювання, проходячи через систему фільтрації (циклон) для видалення механічних домішок. Перевагою даної конструкції є її простота та можливість термічно розкласти біомасу довільного розміру.

Установки піролізу безперервної дії, що працюють циклічно, можуть містити вертикально чи горизонтально встановлену камеру, рис. 3.3г. Ефективність реалізації одного циклу залежить від температурного режиму, розмірів сировини, параметрів камери, методу охолодження і збирання вугілля. Типовий цикл піролізу в установці з горизонтальною камерою для розкладання зразка біомаси масою 1,5 г з при температурі 500 градусів триває до 30 хвилин: насичення азотом – 5 хв.; процес піролізу – 7 хв.; охолодження зразка – 17 хв.

Установка двоступеневої дії з камерою піролізу безперервної дії (рис. 3.3д) є вдосконаленою версією традиційної установки рис. 3.3в. Піроліз протікає у два етапи: одночасний піроліз біомаси з іншими матеріалами в окремих шарах та каталітичний піроліз, коли біомаса і каталізатор не змішуються. Кілька зон нагрівання в межах однієї конструкції дозволяють для кожного з шарів задавати різні температури [38].

3.1.4. Камери піролізу механічного принципу роботи є окремим класом камер, де контакт між агентом нагрівання та частинками біомаси реалізується механічними засобами (рис. 3.4): з обертовим конусом (а); з мішалкою (б); шнековий (в); абляційний (з обертовим диском, г); ротаційний (д) [39].

Камера з обертовим конусом (рис. 3.4а) для рівномірного нагрівання біомаси змішує її з піском. Створена суміш в процесі піролізу по спіралі піднімається до верхньої частини камери, звідки, по закінченню циклу піролізу, виводиться. Пісок, після очищення, знову нагрівається і повертається в камеру. Тривалість процесу розкладання є незначною за рахунок швидкого нагрівання біомаси. Вихід піролізної оливи сягає до 70% (мас.).

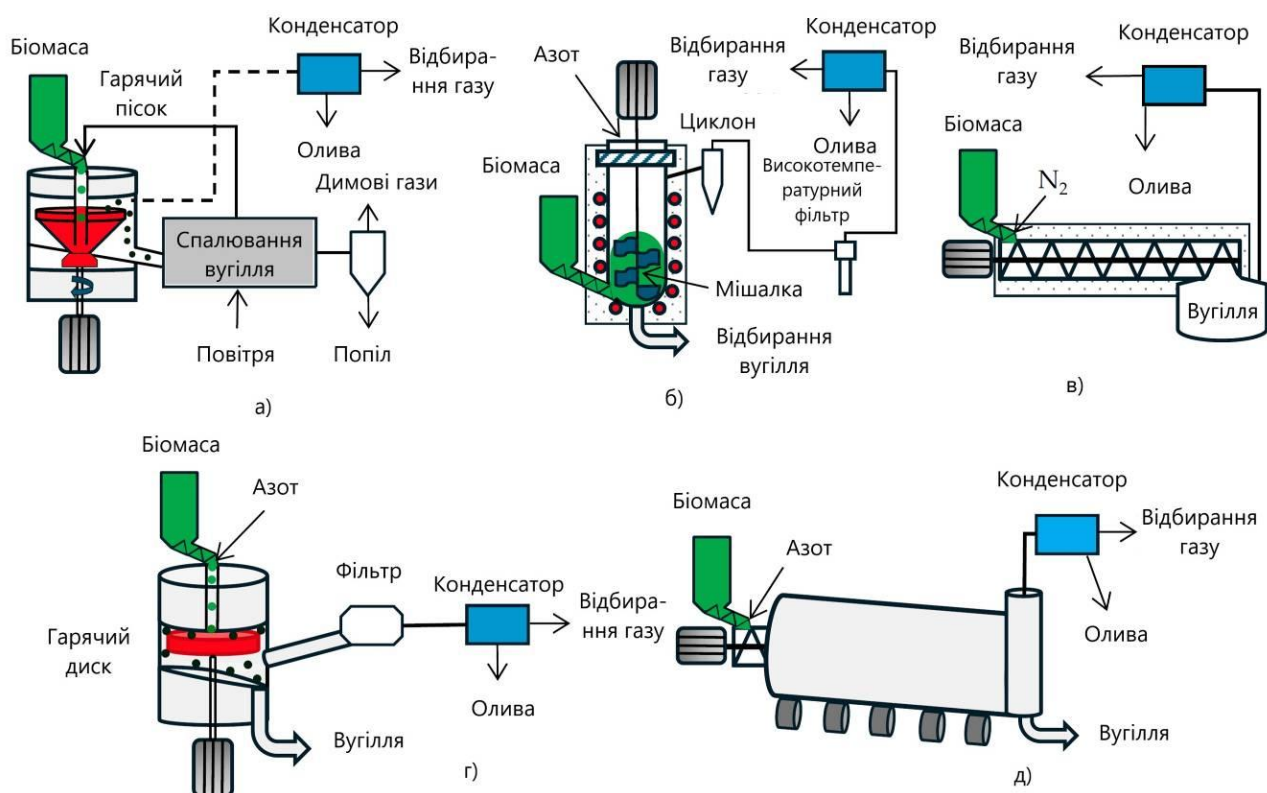


Рис. 3.4. Механічні реактори [39]: а) з обертвовим конусом; б) з мішалкою; в) шнековий; г) абляційний; д) ротаційний.

Камера з механічною мішалкою (рис. 3.4б) працює в температурному режимі 500°C і забезпечує безперервну подачу біомаси. Безкисневе середовище створюється шляхом подачі в камеру піролізу азоту. В цій технологічній схемі для нагрівання біомаси використовують, залежно від потреби, або каталізатор, або пісок. Конструкційно установки можуть бути як горизонтальними, так і вертикальними. Горизонтальні камери піролізу працюють з широким спектром біомаси з різними за розмірами частинками і дозволяють проводити точний контроль параметрів технологічного процесу.

Шнекова камера піролізу (рис. 3.4в) працює наступним чином. Шнек здійснює транспортування біомаси вздовж нагрітої осі, об яку вона нагрівається і розкладається. Умови протікання процесу піролізу задаються швидкістю руху шнека. Щоб зменшити час перебування парів в камері піролізу використовують додаткові теплоносії та газові виходи. Вказану технологію піролізу використовують і для лабораторних досліджень, і для промислових потреб.

Камера піролізу абляційного типу (рис. 3.4г) розкладає біомасу шляхом її притискання до гарячої поверхні. Це дозволяє піролізувати частинки біомаси великих розмірів за рахунок високої теплопередачі. Виробництво оливи може сягати 81%, проте за потреби зазначену технологію масштабувати, потрібно вкласти значні кошти і технологічно зазначене реалізувати також складно.

Камери – печі ротаційного типу (рис. 3.4д) здійснюють піроліз біомаси шляхом її зовнішнього та внутрішнього нагрівання. Прикладом є камера Haloclean, оснащена шнеком та металевими сферами. Рівномірне нагрівання біомаси та безперервна робота камери здійснюється завдяки нахилу печі. Дані камери застосовують для здійснення повільного піролізу в промислових масштабах. Мають високу ефективність та є простими у керуванні.

3.2. Вибір прототипу установки піролізу деревини та розробка методики розрахунку

В якості прототипу візьмемо установку [40], яка працює в двох режимах – піролізу та газифікації, рис. 3.5 і будемо модернізувати основний вузол – камеру піролізу. Установка рис. 3.5 містить: нагнітальну камеру для рівномірного розподілу агенту дуття між фурмами; паливний бункер; зольник для попелу з вивантажувальним гвинтом; камеру, виготовлену з плоских пластин прямокутної форми з отворами подачі агенту дуття в зону горіння біомаси, які розташовані на одній з діагоналей кожної з пластин; патрубків відбирання піролізного/синтетичного газу та подачі агенту дуття; камеру піролізу; камеру відновлення.

Прямокутні пластини реакційної камери в місцях їх з'єднання забезпечують рознесення фурм для подачі агенту дуття кожної з пластин по висоті. Камера піролізу установки з патрубком відбирання піролізного газу розміщена між бункером для палива та реакційною камерою. Камера піролізу відокремлена від бункера та реакційної камери двома дозаторами дискового типу – відповідно верхнім та нижнім. Дозатори змонтовані на одному валу та мають дозуючі отвори. Установка в місцях встановлення камери піролізу,

реакційної камери, камери відновлення оснащена подвійною стінкою. Внутрішній простір подвійної стінки містить патрубок відбирання синтез-газу.

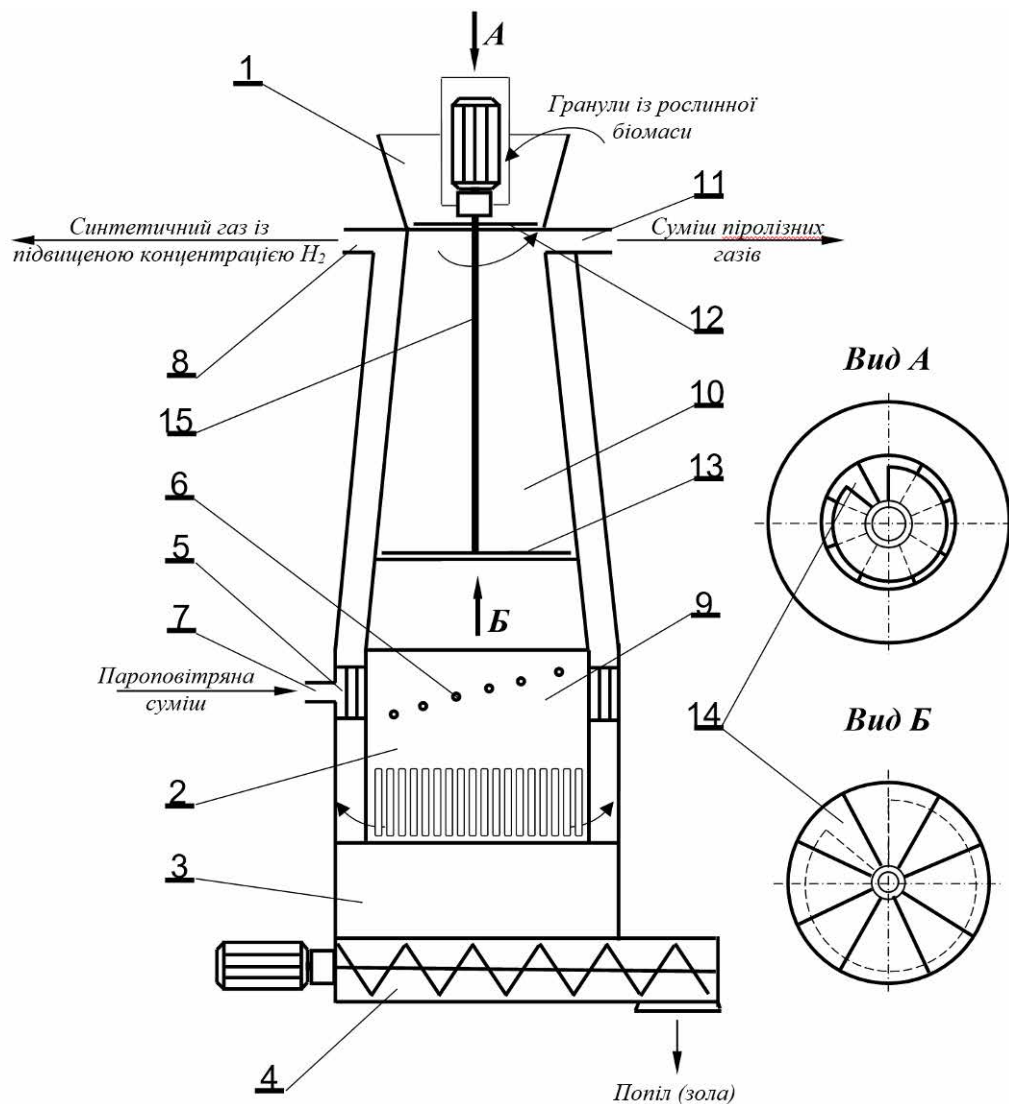


Рис. 3.5 Установа хіміко-термічного розкладання біомаси в режимах піролізу та газифікації (УХТРБ) [40]

Установа рис. 3.5 ефективно розподіляє гази дуття в реакційній камері, що забезпечує рівномірне горіння біомаси при роботі в режимі газифікації. Недоліком є низьке виробництво піролізної оливи в режимі піролізу, а також піролізний чи генераторний газ (залежно від режиму роботи) містять низьку концентрацію водню, отримувану при хіміко-термічному розкладанні сировини.

Метою дипломного проекту є розробити конструкцію камери піролізу установки, що забезпечить високу ефективність виробництва піролізного газу з

підвищеним вмістом водню та високоякісної піролізної оливи з деревинної біомаси. Поставлена задача вирішується шляхом модернізації камери піролізу установки для хіміко-термічного розкладання біомаси. Зазначене забезпечується встановленням камери піролізу між завантажувальним бункером сировини та реакційною камерою, що дозволяє теплом синтетичного газу забезпечувати піроліз деревних гранул перед їх газифікацією. Використання установки рис. 3.5 забезпечує отримання технічного результату через зростання вмісту вуглецю в продуктах розпаду біомаси під час піролізу і, в подальшому, при надходженні в реакційну камеру агенту дуття (пароповітряної суміші), отримати газ із підвищеним вмістом водню.

На рис. 3.5 приведено схематичне зображення установки хіміко-термічного розкладання біомаси в режимах піролізу та газифікації. Установка містить бункер для деревних гранул 1, камеру відновлення 2 газу синтетичного, зольник 3 для попелу та гвинт 4 вивантажувальний, нагнітальну камеру 5 для рівномірного розподілу газів дуття між фурмами 6, патрубок 7 для подачі газів дуття в установку, патрубок 8 відбирання виробленого синтетичного газу, реакційну камеру 9, виготовлену з плоских пластин прямокутної форми з отворами подачі агенту дуття в зону горіння деревинних гранул, які розташовані на одній з діагоналей кожної з пластин. Установка рис. 3.5 відрізняється від аналогів тим, що між бункером для деревинних гранул 1 та реакційною камерою 9 розміщено камеру піролізу 10, оснащену патрубком 11 для відбирання піролізного газу. Камера піролізу 10 від реакційної камери 9 та бункера для деревинних гранул 1 відокремлена верхнім 12 та нижнім 13 дозаторами дискового типу з дозуючими отворами 14. Дозатори дискового типу 12 та 13 встановлені на одному валу 15. Установка в місцях встановлення камер 2, 9 та 10 має подвійну стінку, внутрішній простір якої містить патрубок 11 відбирання синтетичного газу, поєднаний з камерою 2.

Установка працює наступним чином. Деревинні пелети завантажуються в бункер 1. Через дозуючі отвори 14 дозатора дискового типу 12, що розташований у верхній частині установки, пелети просипаються в камеру піролізу 10. Після піролітичного розкладання продукти розпаду через отвори 14

нижнього дозатора 13 дискового типу просипаються в реакційну камеру 9 де протікає їх хіміко-термічна конверсія в синтетичний газ. Дозатори дискового типу 12 та 13 встановлені на одному валу 15. Для формування агенту дуття повітря закачується в установку через патрубок 7, бере участь в стійкому горінні, після чого агент дуття (в даному випадку пароповітряна суміш) надходить у нагнітальну камеру 5 і подається через отвори 6 на процес. Вироблений синтетичний газ в камері 2 накопичується в порожнині між подвійною стінкою і з порожнини через патрубок 8, поєднаний із камерою 2 відновлення синтетичного газу відбирається з установки. Піроліз деревинних пелет, через їх інтенсивне нагрівання, протікає в камері піролізу 10. Суміш продуктів піролізу, в тому числі піролізних газів, видаляється через патрубок 11, після чого вони спрямовуються до охолоджувача (окремий агрегат, на рис. 3.5 не зазначений) для подальшої конденсації та використання.

Обвуглені пелети з камери 10 просипаються в реакційну камеру 9, а потім у камеру 2, де за рахунок хіміко-термічної конверсії утворюється синтетичний газ, який містить більше H_2 ніж при класичній газифікації пелет. Зола, утворена в процесі розкладання пелет вивантажувальним гвинтом 4 усувається із зольника 3. Поєднання процесів газифікації та піролізу деревинних пелет сприяє утворенню височайшої піролізної оливи та піролізного газу із підвищеним вмістом H_2 , з високою теплотою згорання порівняно із CO , який має місце при класичному методі газифікації необвуглених пелет.

Представимо методичку розрахунку основних вузлів установки рис. 3.5:

Витрати агенту дуття, необхідного для термічного розкладання деревинних пелет, за умови нехтування N_2 через низький вміст в пелетах при роботі піролізної установки в режимі виробництва газу [41]:

$$V_{\text{аген.дут.}} = 1,266 \cdot N_2^{\text{пірол.газ.}} \cdot V_{\text{піроліз.газ.}} \quad (3.1)$$

Об'ємне виробництво продуктів піролізу (в нашому випадку це, переважно, піролізний газ, $m^3/\text{год}$) УХТРБ є ключовою величиною для обґрунтування складових деталей та вузлів УХТРБ, а також їх розмірів.

Задавшись величиною об'ємного виробництва продуктів піролізу (піролізний газ, м³/год) $V_{\text{піроліз.газ}}$, встановимо витрати деревини $V_{\text{деревини}}$ на продукування піролізного газу, кг/год (в розрахунку на метр кубічний) [41]:

$$V_{\text{деревини}} = \frac{V_{\text{піроліз.газ}}}{n_{\text{прод.сух.перегонки}}} . \quad (3.2)$$

Визначимо параметри піролізної установки.

Площа перерізу піролізної камери, м² [41]:

$$S_{\text{пірол.камери}} = \frac{Q_H^{\text{деревини}} \cdot V_{\text{деревини}}}{U} \zeta . \quad (3.3)$$

Згідно [41] нижча теплота згорання деревини, кДж/кг:

$$Q_H^{\text{деревини}} = 17,476 - 0,2745 \cdot W_{\text{деревини}} . \quad (3.4)$$

Діаметр секції подачі агенту дугтя до камери [41], м:

$$D_{\text{сек.под.аг.дугт.}} = 1,17 \sqrt{D_{\text{камери}}} . \quad (3.5)$$

Місця нарізання отворів мають бути обраними таким чином, щоб температура в камері становила 950 – 1150 °С (робота в режимі газифікації).

Висота від місця нарізання отворів в камері піролізу до камери нагнітання, м [41]:

$$h_{\text{пірол.камери}} = 0,435 \cdot D_{\text{камери}} . \quad (3.6)$$

Висота шару деревини, яка підлягає термічному розкладанню [41]:

$$H_{\text{деревини}} = 0,7 \cdot D_{\text{камери}} . \quad (3.7)$$

Висота $h_{\text{камери.відновл.}}$ камери відновлення, м:

$$h_{\text{пірол.віднов}} = 0,72 \cdot h_{\text{нагніт.камери}} . \quad (3.8)$$

Щоб забезпечити потрібний температурний режим в камері відновлення слід встановити відстань від колосникової решітки до торця камери відновлення $h_{\text{к.в.-к.р.}}$ не менше за 55 мм.

Щоб деревину насичить окисником камеру виготовляють з плоских пластин прямокутної форми з отворами подачі агенту дугтя в зону горіння біомаси, які розташовані на одній з діагоналей кожної з пластин. Прямокутні

пластини камери пфролізу в місцях їх з'єднання забезпечують рознесення отворів для подачі агенту дуття кожної з пластин по висоті.

Кількість нарізаних отворів визначається як:

$$m_{отв} = \frac{3,14 \cdot D_{камери}}{r_{отв}}. \quad (3.9)$$

За [41] стандартні значення $r_{отв}$ лежать в діапазоні 0,1–0,2 м.

Діаметр фурм для постачання агенту дуття в камеру [41]:

$$d_{отв} = 20 \sqrt{\frac{V_{аген.дут}}{m_{отв} \cdot v_{аген.дут} \cdot \xi_{отв}}}. \quad (3.10)$$

Об'єм бункера установки термічної переробки деревини $V_{б.}$, м³ [41]:

$$V_{б.} = V_{деревини} \cdot \frac{\mu}{\rho_{деревини}}. \quad (3.11)$$

Для стабільності процесу піролізу деревини об'єм бункера установки хіміко-термічного розкладання біомаси в режимах піролізу та газифікації, визначений за формулою 3.11, помножимо на коефіцієнт запасу ($\gamma=1,18\dots1,32$). Такий технологічний прийом унеможливить повне використання деревини і зупинку процесу піролізу. В прототипі, який було обрано для установки хіміко-термічного розкладання біомаси в режимах піролізу та газифікації період завантаження бункера деревиною становив до 3 годин. Це дозволило забезпечити потрібну кількість деревини для піролітичного розкладання і не перетнути межу допустимих розмірів установки при її проектуванні. Надлишкова кількість деревини споживатиме додаткову енергію на сушіння та її піролітичне розкладання. Також можуть бути порушені усі етапи піролізу деревини, що може викликати падіння температури в камері піролізу, коливання тиску, нерівномірне перетворення вуглецю палива в продукти піролізу та спричинити зупинку установки. Верхня частина камери піролізу поєднана з нагнітальною камерою. Вона має циліндричну форму. За рахунок суміщення процесів піролізу та газифікації явище зависання палива відсутнє, оскільки в камеру надходить вугілля.

Об'єм частини корпусу, де накопичується біовугілля $V_{корп.біовуг.}$, м³ [41]:

$$V_{\text{корп.біовуг}} = 0,01 \cdot \frac{V_{\text{корп.біовуг}} \cdot A \cdot \mu_{\text{біовуг}}}{\rho_{\text{біовуг}}} \quad (3.12)$$

Частина корпусу, де накопичується біовугілля не лише збирає біовугілля, але основною її функцією є встановлення температури 475...550°C в шарі біовугілля. Періодичність вивантаження біовугілля приймаємо рівною 3 годин. Шар біовугілля має бути рівним третині відстані від торця камери до днища частини корпусу для біовугілля установки хіміко-термічного розкладання біомаси в режимах піролізу та газифікації. Температура біовугілля має забезпечувати стабілізацію складу продуктів піролізу (піролізного газу).

Висота частини корпусу, де накопичується біовугілля а $h_{\text{корп.біовуг}}$, м [41]:

$$h_{\text{корп.біовуг}} = 1,3 \cdot \frac{V_{\text{корп.біовуг}}}{D_{\text{установ}}^2} \quad (3.13)$$

Раціональні пропорції основних вузлів газогенератора забезпечують оптимальний режим газифікації і підвищують якісний та кількісний склад газу.

Розрахунок колосників.

З метою визначення параметрів колосників представимо методику їх визначення, користуючись рівняннями [42]. Форму колосників згідно [42] описує коефіцієнт χ , який є рівним 0,48.

Просвіт між колосниками розрахуємо як:

$$S = \frac{\sum S_{\text{просвіт}}}{S_{\text{колосн}}} = \frac{1 - (z_1 \cdot z_2^{-1})}{1 + (b_1 \cdot \beta_1^{-1})} \quad (3.14)$$

Коефіцієнт гідравлічного опору колосників:

$$\lambda_1'' = S^{-1} \cdot (\lambda + h_1 \cdot \theta \cdot d_{\text{зідр}}^{-1}) \quad (3.15)$$

$$\lambda' = \psi \cdot \lambda_1'' \quad (3.16)$$

Гідравлічний діаметр колосників:

$$d_{\text{зідр}} = 4P_{\text{просвіт}} \cdot \sum S_{\text{просвіт}} = \frac{4 \cdot (z_1 - z_2) \beta_1}{2[(z_1 - z_2) + \beta_1]} \approx 2\beta_1 \quad (3.17)$$

Опір просвітів колосника:

$$\Delta p_1 = 0,48 \cdot \rho_{\text{пірол.газ}} \cdot \lambda' \cdot v_{\text{пірол.газ}}^2 \cdot d_{\text{зідр}}^{-1} \cdot p_2 \cdot l_1 \cdot p_1^{-1} \cdot l_2^{-1} \quad (3.18)$$

3.3. Розрахунок параметрів установки з терміко-хімічної конверсії деревини в піролізний газ і оливу

Розрахунок параметрів установки з терміко-хімічної конверсії деревних пелет в піролізний газ і оливу виконуємо за формулами п. 3.2. Для цього потрібно знати хімічний склад деревних пелет, які підлягають піролітичному розкладанню в установці з метою виробництва піролізного газу та оливи. Хімічний склад деревних пелет [43]: азот – 0,3 %; кисень – 42,3 %; сірка – 0,04 %; вуглець – 50,34 %; хлор – 0,02 %; водень – 4,5 %; зола – 0,5%; допоміжні компоненти – до 2%. Діаметр пелет – 6 мм; довжина – 30 мм; щільність $>1,12 \text{ кг/дм}^3$; вміст води – 10%; теплота згорання нижча 21,5 МДж/кг; стирання (пил) – 2,3%, температура плавлення золи – 1250°C. Результати розрахунків параметрів установки з терміко-хімічної конверсії деревних пелет в піролізний газ і оливу представлені в таблиці 3.1.

Таблиця 3.1

Результати розрахунку параметрів установки з терміко-хімічної конверсії деревини в піролізний газ і оливу

Назва	Джерело	Величина	Розмірність	Позначення
Характеристики агенту дуття				
Густина	[41–43]	1,205	$\text{кг} \cdot \text{м}^{-3}$	$\rho_{аген.дут}$
Вологовміст	[41–43]	0,012	кг/кг	d_0
Температура	[41–43]	18	$^{\circ}\text{C}$	$T_{аген.дут}$
Тиск	[41–43]	атмосферний	МПа	$p_{аген.дут}$
Характеристики водяної пари				
Питома енергія утворення пари	[41–43]	2260 (p=const)	$\text{кг}^{-1} \cdot \text{кДж}$	r_n
Питома теплоємність пари	[41–43]	2,2 (p=const)	$(\text{кг} \cdot \text{К})^{-1} \cdot \text{кДж}$	c_n

Елементарний склад деревних пелет				
Теплота згорання нижча	рівняння 3.4	21,5 (в розрахунку на суху частину)	МДж/кг	$Q_H^{деревини}$
Насипна щільність деревних пелет	[41–43]	650±6	кг/м ³	$\rho_{деревини}$
Зольність	[41–43]	%	0,5	A^P
Склад сухої частини кукурудзиння	[41–43]	50,34	%	C^P
	[41–43]	0,04	%	S^P
	[41–43]	4,50	%	H^P
	[41–43]	0,30	%	N^P
	[41–43]	42,30	%	O^P
Вологість	[41–43]	%	до 10	W^P

В додатку А наведено розрахунок хімічного складу сухого піролізного газу з деревних пелет. Виходячи з цих розрахунків піролізний газ містить: окис вуглецю – 16,42%; метан – 6,31%; двоокис вуглецю – 15,14%; азот – 38,11%; водень – 24,02%. З кілограму деревних пелет вологістю до 10% (стандартизованих відповідно до ONorm M 7135) установкою з терміко-хімічної конверсії деревних пелет в піролізний газ отримуємо 2,4 м³ піролізного газу густиною 0,986 кг/м³. Теплоємність виробленого в установці піролізного газу складає 1,52 кДж/(м³·°C). Під час відбирання з установки температура піролізного газу сягає 470 градусів і містить механічні домішки та складні вуглеводні. Тому його обов'язково потрібно очищувати в циклонах (інерційних фільтраційних установках) та охолоджувати в скруберах з проточною системою подачі води. Вища теплотворна здатність піролізного газу, виробленого з деревних пелет, складає $Q_g^{пірол.газ} = 16,49$ МДж/м³.

Результати розрахунку витрат газів дуття та деревних пелет на продукування піролізного газу, внесені в табл. 3.2. Зокрема, написано скільки газів дуття слід підвести в установку для підтримання хімічних реакцій процесу піролізу та скільки потрібно витратити деревних пелет на продукування 65 м³ піролізного газу за годину тощо.

Таблиця 3.2

Встановлення витрат деревних пелет при роботі установки в режимах піролізу і газифікації

Назва	Джерело	Величина	Розмірність	Позначення
Витрати деревних пелет на виробництво продуктів піролізу і газифікації				
Об'єм агенту дуття на продукування синтетичного газу	формула 3.1, п. 3.2	36	м ³	$V_{аген.дуть.}$
Потрібна кількість повітря для горіння синтетичного газу	[41–43]	1,84	кг/кг	$V_{повіт.сух}$
Витрати деревних пелет	формула 3.2, п. 3.2	2,48	кг/год	$V_{деревини}$
Об'єм виділеного піролізного газу	[41–43]	65	м ³ /год	$V_{піроліз.газ}$
Теплота, витрачена на усунення зайвої вологи	[41–43]	268	кДж/кг	E

Геометричні та конструкційні параметри установки з терміко-хімічної конверсії деревини в піролізний газ і оливу розраховуються на основі даних таблиць 3.1 та 3.2. Розраховані величини потрібно округлювати до найближчого більшого значення за відповідним стандартом. При розрахунку слід користуватися рекомендаціями щодо проектування теплотехнічного обладнання та витримувати усі вимоги щодо безпечної експлуатації такого виду обладнання, яка закладається ще на конструктивному рівні. Результати розрахунків камери піролізу/газифікації (залежно від режиму роботи установки) представлено в таблиці 3.3. Результати розрахунку інших вузлів установки з терміко-хімічної конверсії деревини в піролізний газ і оливу наведені в таблиці 3.4.

Результати розрахунку параметрів камери піролізу

Назва	Джерело	Величина	Розмірність	Позначення
Результати розрахунків параметрів конвертера				
Швидкість надходження агенту дуття	[41]	23,5	м/с	$V_{агент.дуть}$
Діаметр отворів для постачання агенту дуття в камеру в режимі газифікації	формула 3.10, п. 3.2	0,008	м	$d_{отв}$
Відстань між центрами отворів	[42]	0,125	м	$r_{отв}$
Кількість отворів	формула 3.9 п. 3.2	4	шт	$m_{отв}$
Діаметр секції подачі агенту дуття до камери	формула 3.5, п. 3.2	164	мм	$D_{сек.под.аг.дуть}$
Площа перерізу камери піролізу	п. 3.2	$2,54 \cdot 10^{-2}$	м ²	$S_{камери}$
Діаметр камери	формула 3.3, п. 3.2	160	мм	$D_{камери}$
Висота верхньої секції камери піролізу	п. 3.2	160	мм	$h_{верх.секції}$
Висота нижньої секції камери піролізу	п. 3.2	150	мм	$h_{нижн.секції}$
Висота від місця нарізання отворів в камері піролізу до камери нагнітання, м	формула 3.6, п. 3.2	45	мм	$h_{пірол.камери}$
Відстань від колосникової решітки до торця камери піролізу	[42]	6	мм	$h_{к.в.-к.р.}$
Висота камери відновлення	формула 3.8, п. 3.2	55	мм	$h_{камер.віднов.}$

Результати розрахунку інших вузлів установки з терміко-хімічної конверсії деревини в піролізний газ і оливу наведені в таблиці 3.4.

Таблиця 3.4

Результати розрахунку установки з терміко-хімічної конверсії деревини в піролізний газ і оливу

Назва	Джерело	Величина	Розмірність	Позначення
Характеристики попелу від терміко-хімічної переробки деревних пелет				
Кількість біовугілля, після процесу піролізу деревних пелет	[42]	12	%	
Насипна щільність біовугілля	[42]	$3001 \pm 5,5$	кг/м ³	$\rho_{\text{біовугіл}}$
Результати розрахунків установки з терміко-хімічної конверсії деревини в піролізний газ і оливу				
Висота бункера установки термічної переробки деревини	п. 3.2	0,683	м	$H_{\text{бункер}}$
Діаметр корпусу установки термічної переробки деревини	п. 3.2	0,315	м	$D_{\text{устан}}$
Об'єм бункера установки термічної переробки деревини	формула 3.11 п. 3.2	0,350	м ³	$V_{\text{б}}$
Періодичність засипання бункера деревними пелетами	[41]	3,0	год	μ
Висота частини корпусу, де накопичується біовугілля	формула 3.13 п. 3.2	0,138	м	$h_{\text{корп.біовуг.}}$
Об'єм частини корпусу, де накопичується біовугілля	формула 3.12 п. 3.2	0,042	м ³	$V_{\text{корп.біовуг.}}$
Періодичність вивантаження біовугілля	[41]	3,0	год	$\mu_{\text{біовуг}}$

Отримані розрахункові значення діаметрів бункера, корпусу установки, крок нарізання отворів для подачі газів дуття при роботі установки в режимі газифікації, висоти корпусу, бункера, частини корпусу для накопичення біовугілля були округлені до стандартних значень за рекомендованими рядами.

Отже, діаметр корпусу установки з конструкційних міркувань було збільшено до 315 мм, діаметр секції подачі агенту дуття до камери збільшено на

4 мм для полегшення висвердлювання чотирьох отворів зі стандартним кроком 0,125 м для подачі окисника. Діаметр камери піролізу та камери відновлення прийнято 160 мм для зручності їх розміщення в циліндричному корпусі. При роботі установки в режимі газифікації слід, щоб кількість газів дуття постачалася зі сталою швидкістю 23,5 м/с і їх кількість була достатньою. Зазначене можна реалізувати вирізавши отвори для постачання агенту дуття потрібного діаметру. З конструктивних міркувань діаметр отворів прийнято 8 мм.

При проектуванні піролізної та відновлювальної камер установки, а також бункерів для біовугілля та частини корпусу, де накопичується біовугілля враховано, що слід підтримувати в активній зоні температуру в межах 1100 – 1250°C. Частина корпусу, де накопичується біовугілля, забезпечує підтримування температури 475...550°C в шарі біовугілля. Періодичність вивантаження біовугілля приймаємо рівною 3 години. Температура біовугілля має забезпечувати стабілізацію складу продуктів піролізу (піролізного газу).

Результати розрахунків колосників

Форму колосників згідно [42] описує коефіцієнт χ , який є рівним 0,48.

Просвіт між колосниками розрахуємо як:

$$S = \frac{1 - 0,071/0,27}{1 + 0,036/0,0049} = \frac{1 - 0,263}{1 + 7,346} = \frac{0,737}{8,346} = 0,088 \text{ м}^2$$

Гідравлічний діаметр колосників:

$$d_{\text{гидр.}} \approx 2\beta_1 = 2 \cdot 0,0049 = 0,0098 \text{ м}$$

При $S = 0,088 \text{ м}^2$ коефіцієнт $\lambda = 1,62$.

Коефіцієнт гідравлічного опору колосників:

$$\lambda_1'' = (1,62 + 0,036 \cdot 0,049 \cdot 0,0098) / 0,088 = 186$$

$$\lambda' = 0,48 \cdot 186 = 85$$

Опір просвітів колосника:

$$\Delta p_{\text{колос}} = 3,8 \text{ кгс} / \text{м}^2$$

3.4. Обґрунтування конструкції установки з терміко-хімічної конверсії деревини в піролізний газ і оливу

Установка з терміко-хімічної конверсії деревини (деревних пелет) в піролізний газ і оливу представлена на рис. 3.6.

На початку роботи прецензійні жалюзі 1 (клиноподібної форми) колосникової решітки 2 камери піролізу 3 герметично закриваються. Герметизація забезпечується шляхом закручування різьбової ручки приводу 4 прецензійних жалюзей до упору. Далі деревні пелети, які планується піролізувати, завантажуються через люк 5 в бункер установки. Після завантаження бункера люк 5 герметично закривається. Наступним кроком подається напруга на вольфрамову електроди 6, які майже миттєво нагріваються до 1500°C. Нагрів електродів спричиняє нагрівання деревних пелет, з яких починає випаровуватися волога (перша стадія процесу піролізу). Випаровування вологи з пелет триває до температури 100°C, при цьому нагріті пари вологи видаляються із камери 3 через відповідний патрубок для газів 7, обладнаний датчиком 8 вимірювання тиску та температури. Під час початкової фази піролізу (нагрівання до 100°C) при низьких температурах в деревних пелетах починає виділяється вільна волога, а пари з температурою до 50°C спрямовуються в навколишнє середовище.

Пройшовши крізь усю камеру піролізу 3 і досягши на виході камери 3 температури 500°C пари спрямовуються на конденсатор смол та піролізної оливи, після чого газова фаза перенаправляється до газової форсунки 9, та через газову форсунку подається у простір між зовнішнім корпусом і камерою 3, періодично запалюючись.

Пари прогрівають корпус піролізної камери 3 із зовнішньої сторони та покидають міжкорпусний простір через верхній патрубок 10 для газів, що відбираються. Під час нагрівання деревних пелет до температури вищої за 100°C починається процес їх розкладання із виділенням горючих газів і піролізної оливи.

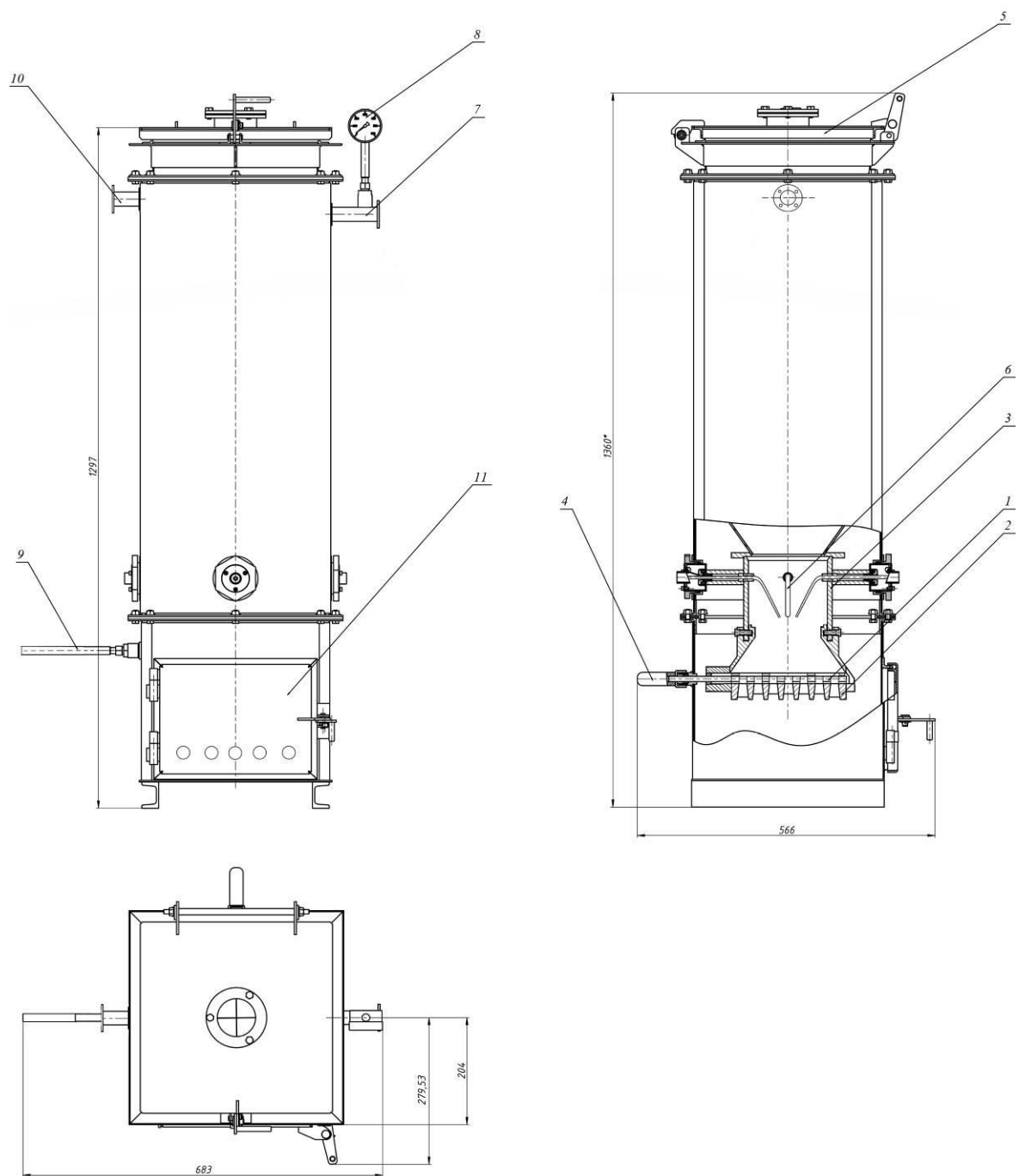


Рис. 3.6. Установа з терміко-хімічної конверсії деревних пелет в піролізний газ і оливу

Коли зростає вміст горючих газів, що не конденсуються, вони, попадаючи в міжкорпусний простір, змішуються з повітрям, який засмоктується інжекцією через отвори вивантажувального люка 11. Згораючи гази починають виділяти теплоту, яка інтенсивно нагріває стінки камери піролізу 3 із зовнішньої сторони, при цьому процес піролізу починає інтенсифікуватися та відбувається

термічне розкладання сировини (первинний піроліз), після чого вольфрамові електроди 6 вимикаються.

Первинний піроліз протікає в інтервалі температур 200–600°C. На цій стадії утворюється більша частина пари або прекурсору піролізної оливи. Великі молекули частинок сировини розкладаються на вугілля, газу, що конденсуються (пари і прекурсори рідкої фази), і неконденсовані газу.

Після виходу установки на стабільний процес, частина неконденсованих газів може подаватися на газову електростанцію для отримання електричної енергії або в газгольдер з метою накопичення.

Коли температура піролізних газів на виході установки досягає 650°C подачу газу через форсунку 9 у міжкорпусний простір зменшують і спостерігають за виходом рідкої фракції. Як тільки рідка фракція перестає виділятися, подачу газу на форсунку 9 закривають і нагрівання та процес піролізу зупиняються.

Коли установка охолоне до 50°C, вивантажувальний люк 11 відкривається, відкриваються колосники та вивантажується біовугілля, яке є побічним продуктом процесу піролізу.

Основні елементи конструкції установки рис. 3.6 виготовлено зварюванням. Камера піролізу використано листи з легованої конструкційної сталі. Для виготовлення колосників обрано ковкий чавун марки 65-45-12. Метод виготовлення – відливка в піщану форму. Конструкція рис. 3.6 передбачає ручне завантаження деревних пелет. При потребі автоматизувати процес завантаження сировини, люк 5 можна замінити на жалюзійну заслінку з автоматичним керуванням від спрацювання датчика.

Розроблена конструкція бункера установки представлена на рис. 3.7. Бункер установки слугує для накопичення деревних пелет. До його нижньої частини кріпиться камера піролізу. Бункер також виготовлений шляхом зварювання чотирьох сталевих листів довжиною 683 мм. Верхня частина бункера виготовлена у вигляді квадрата зі стороною 404 мм. До верхньої частини кріпиться люк 5. Висота бункера разом з камерою піролізу складає 1038 мм.

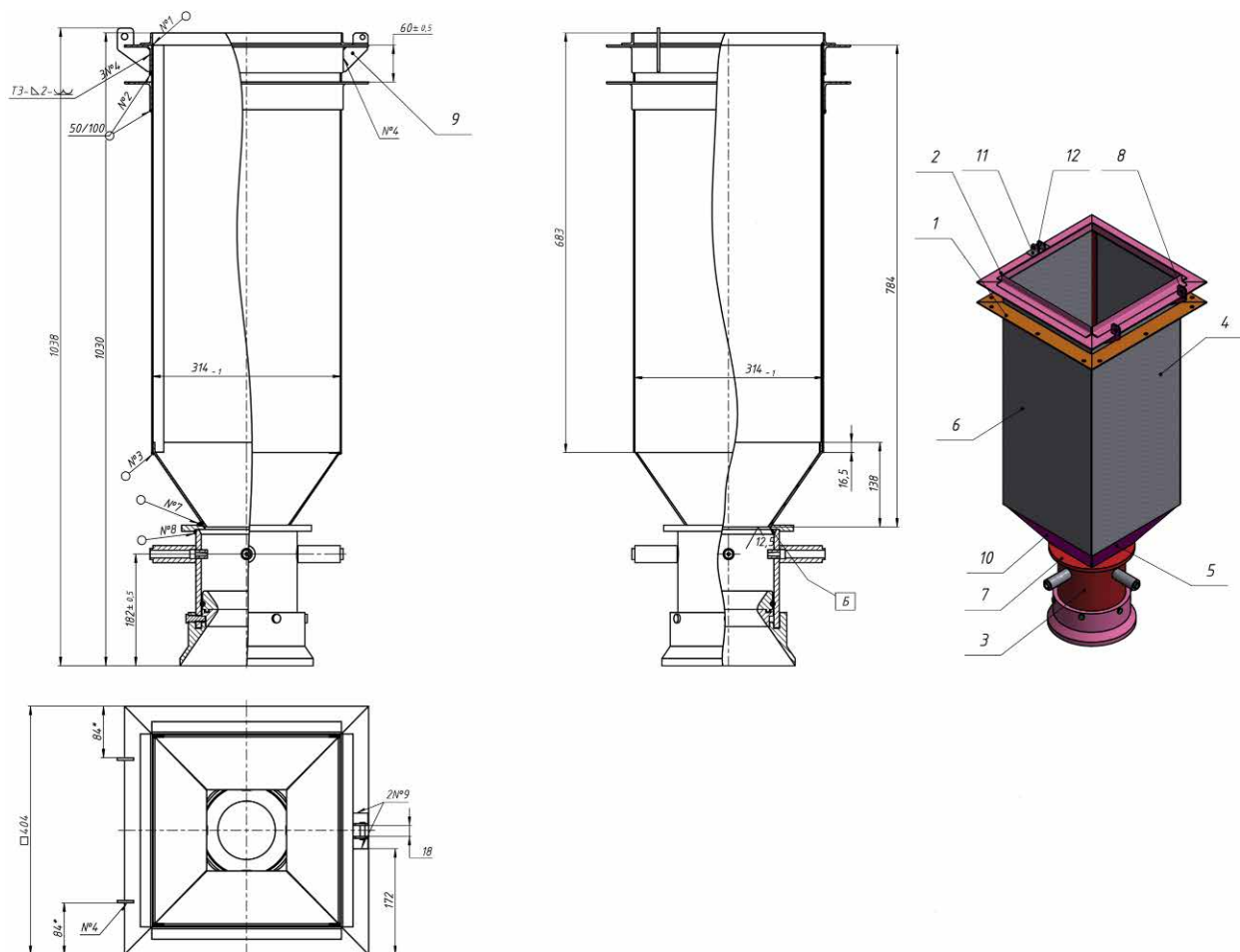


Рис. 3.7. Бункер: 1, 2 – фланець; 3 – камера піролізу; 4, 6 – стінка циліндрична; 5, 10 – стінка конічна; 7 – фланець; 8 – ребро; 9 – кронштейн; 11, 12 – кріплення.

В якості матеріалу бункера обираємо корозійностійку сталь AISI 304 (аналог 08X18H10). Хімічний склад сталі наступний: $C \leq 0,8$; $Mn \leq 0,2$; $Si \leq 0,8$; $Cu \leq 0,3$; $P \leq 0,035$; $S \leq 0,02$; $Ni = 9 \dots 11$; $Cr = 17 \dots 19$; $Ti \leq 0,5$; $Fe = 69$; $\delta_s = 45\%$; $\sigma_B = 510 \text{ Н/мм}^2$ [44].

До квадратної частини бункеру зі стороною 404 мм та висотою 683 мм приварена верхня секція камери піролізу рис. 3.8. Камера піролізу є основним вузлом установки з терміко-хімічної конверсії деревних пелет в піролізний газ і оливу. В камері піролізу протікають основні реакції процесу піролізу. Коли установка працює в режимі газифікації, то в циліндричній частині камери (поз. 1, рис. 3.8) протікають, переважно, окислювальні реакції, тоді як в нижній частині у вигляді трапеції (поз. 5, рис. 3.8) протікають реакції відновлення.

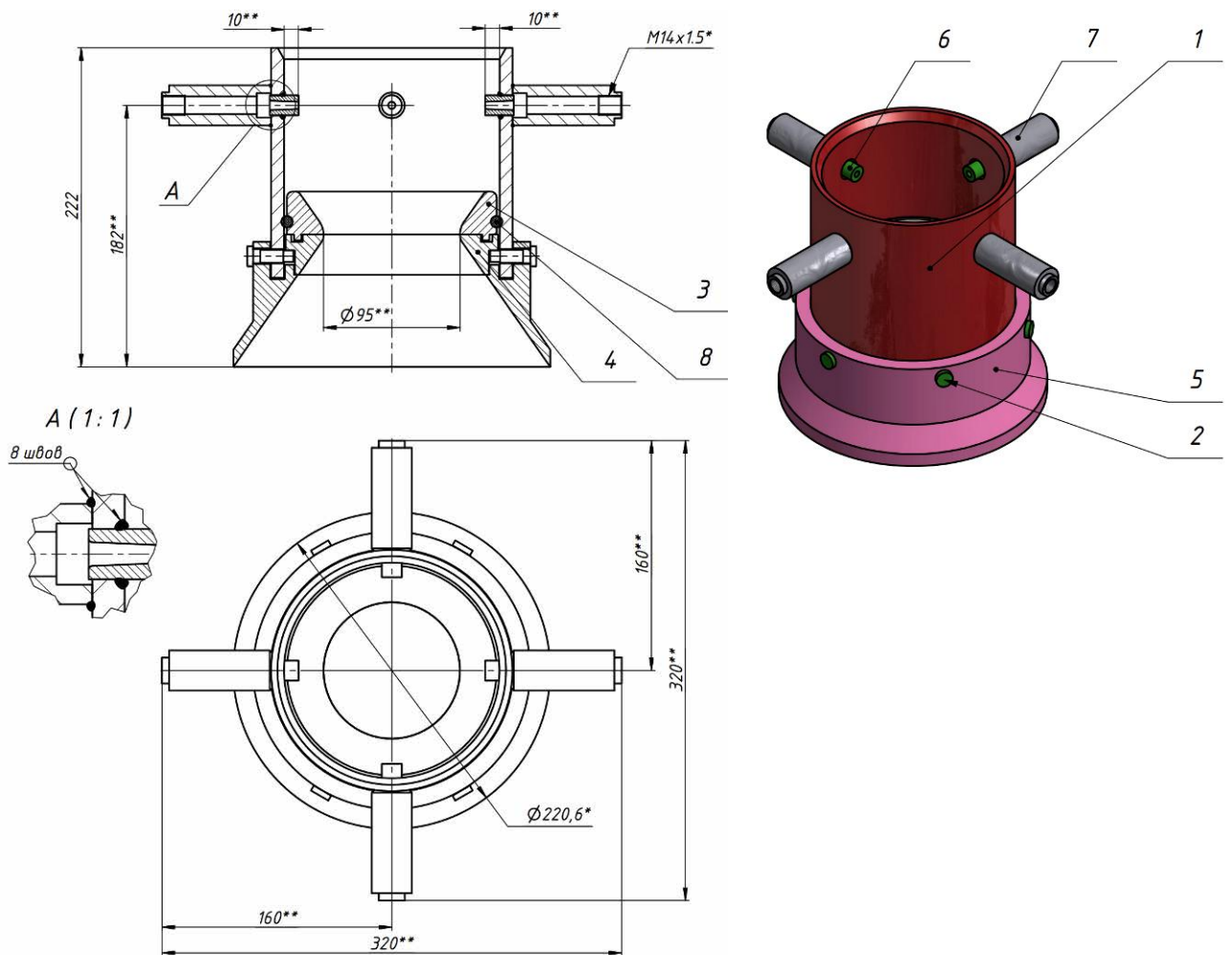


Рис. 3.8. Камера піролізу: 1 – верхня секція камери піролізу (труба 170×12, сталь 321, аналог 12X18Н9Т); 2 – палець; 3 – горловина (сталь 446, аналог 15X28); 4 – кільце (сталь 446, аналог 15X28); 5 – конус з круга Ø225 мм (сталь 321, аналог 12X18Н9Т); 6 – фурма (сталь 446, аналог 15X28); 7 – трубка (сталь 321, аналог 12X18Н9Т); 8 – кільце ущільнююче

Верхня циліндрична секція 1 камери піролізу виготовлена з труби 170×12 з високолегованого конструкційного сплаву 12X18Н9Т ($\text{Si} \leq 0,8\%$; $\text{Cr} = 17 \dots 19\%$; $\text{P} \leq 0,035\%$; $\text{Ni} = 8 \dots 9,5\%$; $\text{S} \leq 0,02\%$; $\text{C} \leq 0,12\%$; $\text{Mn} \leq 0,2\%$; $\text{Cu} \leq 0,3$; $\text{Fe} = 67$; $\sigma_{\text{в}} = 610 \text{ Н/мм}^2$) [44]. Нижня секція камери 5 виготовлена із конуса Ø225 мм, матеріал – сплав 12X18Н9Т. Вказаний сплав має високу стійкість до корозії, міцність, зразкову теплопровідність і є легкою в обробці.

Між верхньою та нижньою секцією камери піролізу розташовані горловина та опорне кільце зі сталі 15X28. Горловина та кільце в цій

конструкції є знімними, оскільки працюють у високотемпературному режимі в агресивному середовищі та піддаються високотемпературній корозії і потребують кожні 100 тис. годин роботи заміни. Для забезпечення щільності прилягання горловини 3 до верхньої секції камери 1 між ними встановлено ущільнююче кільце 8. Нижня секція камери 5 до опорного кільця кріпиться за допомогою пальців 2. В нагнітальній частині камери вмонтовано чотири трубки 7 до торців яких прикріплено різьбові фурми 6.

Камера піролізу рис. 3.8 є високотехнологічною, має помірну вартість, легко виготовляється та є зручною в експлуатації.

3.5. Висновки до розділу 3

1. Проведено аналіз конструкцій установок піролізу рослинної біомаси і в якості прототипу обрано установку рис. 3.5.

2. Наведено методику та виконано розрахунки параметрів розробленої установки з терміко-хімічної конверсії деревини в піролізний газ і оливу, наведені в таблицях 3.1 – 3.4.

3. Обґрунтовано конструкцію установки з терміко-хімічної конверсії деревини в піролізний газ і оливу і наведено креслення розроблених вузлів, а саме: камери піролізу та бункера з відповідними деталями. Основним удосконаленням є можливість роботи установки як в режимі піролізу, так і в режимі газифікації. Це дозволяє, залежно від потреб, виробляти як синтетичний газ, так і піролізну оливу. Розробка нової конструкції та заміна матеріалу деталей камери та бункера дозволило подовжити термін їх роботи до 100 тис. годин без суттєвих капітальних вкладень, що майже у 10 разів більше ніж в класичних конструкціях зазначених вузлів.

РОЗДІЛ 4

ТЕХНІКА БЕЗПЕКИ ТА ПОЖЕЖНА БЕЗПЕКА

4.1. Вимоги техніки безпеки, які висуваються до установки піролізу деревинних пелет

Коректна технічна експлуатація установки для піролізу деревинних пелет є ключовою вимогою її тривалої експлуатації. Вимоги щодо техніки безпеки та пожежної безпеки, які ставляться до установки для піролізу деревинних пелет будуть комплексними і складатимуться з окремих документів з вимогами до усіх вузлів цієї установки: безпосередньо реактора, скрубєрів, циклонів, ДВЗ, апаратів розгонки піролізної оливи тощо.

Підготовка установки до термічного розкладання деревних пелет

На початку робіт контролюють поточний технічний стан як усієї установки піролізу деревних пелет, так і окремих її складових одиниць. Спочатку відкривається кришка люка реактора установки для перевірки відсутності залишків пелет попереднього завантаження, невибраного біовугілля, попелу, залишків оливи чи суміші конденсованих і неконденсованих газів, конденсату на стінках тощо. Слід встановити поточний технічний стан ущільнювачів, ступінь прилягання кришок, справність фланцевих та різьбових з'єднань, засувок, патрубків, вентилів, шліцьове з'єднання колосників при роботі установки в режимі піролізу. Окремі вимоги ставляться до камери піролізу, а саме до нагнітальної секції (забезпечується подача агенту дуття), окислювальної та відновлювальної секцій. На поверхні отворів, трубок, фурм, стінках камер не повинно бути слідів дії високотемпературної корозії. Також перевіряють підлягають циклони, скрубєр, насосні системи, мережа трубопроводів, вентилів ДВЗ ін. Вважається, що установка почала працювати і вийшла на стабільний робочий режим, коли завершився її запуск тривалістю до 25 хв. Під час запуску піролізної установки, окрім герметичності з'єднань, перевіряють труби та патрубки відбирання піролізного газу та оливи на

наявність сажового осаду, мінеральних та смолистих відкладень на їх стінках. Вказане може бути причиною займань, підвищеного опору в піролізній установці та системах очищення і охолодження продуктів піролізу (перевіряється за показами водяного манометру), що неминуче веде до виходу з ладу усієї установки. На доданок потрібно перевірити паливний бункер, систему вивантаження біовугілля (гвинтову передачу).

Завантаження піролізної установки деревними гранулами

Завантаження залежить від того, в якому стані була піролізна установка в момент простою. Якщо під час простою в піролізній установці перебували деревні пелети, то слід перевірити чи вони не накопичили зайву вологу з навколишнього середовища (оскільки такий вид сировини є гігроскопічним) і можна в установці залишати лише третину пелет, а решту бункера заповнити свіжими пелетами. Якщо бункер піролізної установки тривалий час був порожнім, то його заповнюють сухими деревними пелетами. В установці рис. 3.6 бункер рис. 3.7 на першу експлуатацію установки заповнюється наполовину. В процесі роботи установки він поступово заповнюється повністю. Далі подається напруга на вольфрамову електроди 6 (рис. 3.6), які майже миттєво нагріваються до 1500°C. Нагрів електродів спричиняє нагрівання деревних пелет. Кожне наступне довантаження піролізної установки відбувається, коли рівень палива падає до третини від початкового рівня. Через 25 хвилин роботи піролізної установки, коли процес піролізу встановився, має місце виділення продуктів піролізу: синтетичного газу та піролізної оливи, якість яких можна діагностувати як візуально, так і за допомогою приладів. При роботі з відволоженими пелетами час, доки піролізна установка вийде на стабільний режим роботи може складати до 2 годин і на цей час інше обладнання слід відключити

Робота установки піролізу деревинних пелет

Операції технологічного процесу піролізу деревних пелет передбачають:

- завантаження пелет в бункер піролізної установки;
- підключення вольфрамових електродів і нагрівання пелет;

- перевірка тиску, температури в камері піролізу, вологості сировини тощо;

- відбирати синтетичний газ примусово (розрідженням в системі) та збирати піролізну оливу, яка самопоотоком тече в ємність, з якої спрямовується на систему охолодження та очищення.

Оскільки в нашому випадку завантаження установки є періодичним і механічним, то потрібно слідкувати, щоб під час довантаження паливом установки гарячі пари піролізних газів не спричинили опіки та отруєння. Тиск та температура в робочих зонах піролізної установки має відповідати значенням, передбаченим технологічним процесом (п. 2.4). Біовугілля є побічним продуктом процесу піролізу, проте в зольнику воно упродовж 3 годин повинне лежати товстим шаром, щоб прокалитися та набути потрібних якісних характеристик та забезпечити підтримку температури в нижній секції камери піролізу на рівні 400...500°C. Термопари та манометри використовують для контролю температури та тиску в різних зонах піролізної установки, за показами яких роблять висновки про належність протікання усіх термохімічних реакцій процесу. В патрубку для газової фракції процесу піролізу температура має складати близько 450°C. Інші значення температури свідчать про порушення протікання процесу піролізу деревних пелет. Також після виходу установки на стабільний процес, частина неконденсованих газів може подаватися у міжкорпусний простір для підтримання температурного режиму процесу піролізу. Потрібно слідкувати за герметичністю зварювальних швів, якими скріплено стінки, щоб уникнути прориву цих газів в навколишнє середовищу. Коли температура піролізних газів на виході установки досягає 650°C подачу газу через форсунку у міжкорпусний простір зменшують і спостерігають за виходом рідкої фракції. Як тільки рідка фракція перестає виділятися, подачу газу на форсунку закривають і нагрівання та процес піролізу зупиняються. В процесі роботи установки потрібно слідкувати за станом розрідження. Порушення режиму розрідження призводить до зупинки процесу піролізу. Основні причини: невчасне видалення біовугілля із зольника,

наявність в трубах відкладення (смола, сажа, рідкі продукти піролізу), фільтр та скруббер в неробочому стані, які кожні 300...350 годин повинні проходити ТО2.

Зупинка піролізної установки

Після закінчення роботи піролізну установку потрібно відключити, при цьому потрібно з установки вивантажують біовугілля, зливають залишки піролізної оливи та на факелі спалюють залишки піролізних газів. Після цього люк, що закриває бункер потрібно залишити відкритим, патрубки також залишають відкритими, зупиняється робота ДВЗ, насосів, скрубера, циклона, труба змішувача перекривається вентилем. Перед консервацією усі стикові поверхні піролізної установки змащують солідолом. В пази люків закладають герметик, зливають з системи охолодження воду, з циклона – накопичене в нижній частині конуса сміття, а з труб – залишки конденсату. Зберігати установку в холодні пори року бажано в закритих приміщеннях.

Персонал, який працює з установкою повинен пройти навчання і раз на півроку проходити повторний інструктаж. Піролізна установка має комплектуватися інструкціями з обслуговування, а місця її встановлення мають передбачати заходи колективного захисту обслуговуючого персоналу.

4.2. Вимоги пожежної безпеки до установки піролізу деревних пелет

До піролізної установки ставляться вимоги як до обладнання, що працює під тиском. Заходи з пожежної безпеки при експлуатації піролізної установки наведені в таблиці 4.1. Вони передбачають розробку організаційних заходів, використання протипожежного оснащення, наявність засобів колективного та індивідуального захисту, а також засобів пожежогасіння. Одним з найбільш дієвих заходів є передчасне виключення джерел потенційної пожежної небезпеки.

Заходи з пожежної безпеки при експлуатації установки піролізу деревних

пелет

№	Назва заходу	Нормативний документ	Негативні наслідки від недотримання вимог пожежної безпеки	Практичні рекомендації
	1	2	3	4
1.	Запуск піролізної установки	НАПБ А.01.001-2004, ДСТУ 2272:2021	Вибух, неконтрольоване займання, опіки.	Перевірити справність системи автоматичного запуску. Ручний запуск здійснювати лише на відкритому повітрі.
2.	Отруєння піролізними газами	ДСанПіН 2.2.4-171-10, НАПБ А.01.001-2004	Отруєння, втрата свідомості, летальний випадок.	Експлуатація на відкритому повітрі. При експлуатації в приміщенні забезпечити наявність припливної та витяжної вентиляції. Контролювати установку на витік газів.
3.	Ураження від дії високих температур	ДБН В.1.1-7:2016, ДСТУ EN 13501-1:2019	Опіки, деформація обладнання, пожежа.	Ізолювати корпус термоматеріалами, перевірити герметичність.
4.	Термічні вибухові ураження	НАПБ Б.07.005-86, ДСТУ 2272:2021	Вибух, термічні опіки, травмування.	Автоматичне завантаження, дотримання правил безпеки при ручному завантаженні установки.
5.	Ремонтні роботи технічне обслуговування	НАПБ А.01.001-2004, ДБН В.1.2-14:2009	Вибух залишкового піролізного газу, травмування персоналу.	Здійснювати після повного охолодження установки, провітрювати трубопроводи.
6.	Очищення та обслуговування установки	НАПБ А.01.001-2004, ДСТУ	Пожежа, опіки від залишків палива.	Виконувати після охолодження, у спеціально відведених

№	Назва заходу	Нормативний документ	Негативні наслідки від недотримання вимог пожежної безпеки	Практичні рекомендації
	1	2	3	4
		2272:2021		місцях.
7.	Зупинка піролізної установки	НАПБ А.01.001-2004	Витік газу, вибух, отруєння.	Повністю зупинити процес, перекрити подачу повітря.
8.	Виключення джерел займання	НАПБ Б.03.001-2004, ДСТУ 4373:2005	Вибухи, займання, ураження.	Не зберігати ЛЗР поруч, уникати іскроутворення.
9.	Системи пожежної безпеки	ДСТУ 8828:2019, ДБН В.1.1-7:2016	Пожежа, займання залишків, пошкодження.	Системи виявлення, контейнери, інвентар для гасіння.
10.	Протипожежне оснащення	ДСТУ EN 3-7:2005, НАПБ А.01.001-2004	Поширення пожежі, травми.	Вогнегасники у доступних місцях на безпечній відстані.
11.	Організаційні заходи	СНіП 2.09.02-85*, ДБН В.1.1-7:2016	Нездатність до евакуації, дезорієнтація.	Інструкції, евакуаційні плани, ЗІЗ
12.	Медична безпека	Наказ МОЗ №400 від 05.06.2019	Відсутність медичної допомоги в критичний момент.	Аптечка, підготовлений персонал.

Дотримання правил і вживання заходів, наведених в табл. 4.1 дозволить тривалий час експлуатувати піролізну установку без травмування персоналу.

4.3. Висновки до розділу 4

Представлено заходи з техніки безпеки та пожежної безпеки при експлуатації установки піролізу деревних пелет. Дотримання наведених правил і вживання відповідних заходів дозволить безпечно тривалий час експлуатувати піролізну установку.

РОЗДІЛ 5

ЕКОНОМІЧНА ЧАСТИНА

5.1. Економічні розрахунки за проектом

Техніко-економічна оцінка проектних рішень виконується з метою підтвердження доцільності пропонуванних заходів. В дипломному проекті запропоновано модернізацію конструкції установки піролізу біомаси при роботі на деревних пелетах. Зокрема змінено конструкцію камери піролізу, бункера піролізної установки. Пропонується виконати економічне порівняння двох установок піролізу біомаси (проектованої та прототипу) лише виходячи з конструкції модернізованих вузлів. Витрати на створення усієї конструкції піролізних установок, їх монтаж та експлуатацією не враховано.

Економічні розрахунки проведемо за методикою [44].

Кошти, витрачені на розробку піролізної установки (камери піролізу, бункера піролізної установки):

$$K_{\text{мод.пір.уст.}} = ПВ_{\text{пір.уст.}} + ВТ_{\text{нак.}} \quad (5.1)$$

Прямі витрати на конструювання камери піролізу, бункеру піролізної установки та їх виготовлення:

$$ПВ_{\text{пір.уст.}} = ВР_{\text{опл.пр.}} + \sum ВОП + МВ + ВЗЧ \quad (5.2)$$

Оплата праці персоналу:

$$П_{\text{опл.пр.}} = 1,701 \cdot 10^{-3} \cdot ТО_{\text{н.ч.}} \cdot ПО_{\text{ст.}} \quad (5.3)$$

Додаткові капітальні витрати на конструювання камери піролізу, бункеру піролізної установки та їх виготовлення (табл. 5.1).

Оплата праці персоналу з нарахуваннями:

$$ВР_{\text{опл.пр.}} = 1,701 \cdot 10^{-3} \cdot t_{\text{ум(к)}} \cdot ПО_{\text{(вир. за .окл.)}} \cdot \tau(1 + \epsilon_{\text{СВ}}). \quad (5.4)$$

Річні амортизаційні відрахування, грн:

$$A = 1,701 \cdot 10^{-3} \cdot t_{\text{ум(к)}} \cdot БВ_{\text{пір.уст.}} \cdot A_{\text{р.н.}} / (\Phi \cdot \zeta_1). \quad (5.5)$$

Таблиця 5.1.

Додаткові витрати на конструювання камери піролізу та бункеру піролізної
установки

№	Витрати	Сума, тис. грн.
1	Конструкторські та проектувальні роботи	7,93
2	Матеріал та комплектуючі на розробку камери піролізу та бункеру піролізної установки	58,24
3	Оплату праці за монтаж камери піролізу та бункеру піролізної установки	2,18
4	Закупки, доставку та запуск конструйованих камери піролізу та бункеру піролізної установки	5,11
5	Основних фондів на експлуатацію базового та удосконаленого варіанту піролізної установки (1,12 тис. грн. / рік – витрати на утримання 1м ² виробничої площі, потрібно під піролізну установку – 4 м ²)	4,48
6	Засоби індивідуального та колективного захисту, заходи на ОП, ТБ і захист довкілля	2,96
	РАЗОМ	80,9

Для розрахунку економічної ефективності від поліпшення піролізної установки в табл. 5.2 наведено відповідні цифрові дані.

Витрати на придбання деревних пелет:

$$\Sigma BT_{\text{нел}} = 1,701 \cdot 10^3 \cdot V_{\text{піроліз.газ}} \cdot \lambda \cdot BT_{\text{нел}} \cdot \eta_{\text{пір.уст.}}^{-1}, \quad (5.6)$$

Загально-технічні витрати на виробництво піролізного газу та оливи, грн:

$$BT_{\text{пір.газ}} = (BP_{\text{оп.пр.}} + A + BT_{\text{рем.}} + \Sigma BT_{\text{нел}}) \cdot 10^3 / V_{\text{піроліз.газ}} \quad (5.7)$$

Річний економічний ефект:

$$E = (ПВ_{\text{мод.н.у.}} - ПВ_{\text{баз.н.у.}}) \cdot V_{\text{піроліз.газ}} / \text{рік}, \quad (5.8)$$

Приведені витрати:

$$ПВ = BT_{\text{пір.газ}} + КЕЕ \cdot ПКВ_{\text{пір.газ.}}, \quad (5.9)$$

Дані для розрахунку економічної ефективності від поліпшенні конструкції піролізної установки

Показник	Розмірність	Піролізна установка	
		базова	модернізована
Сировина, що піролітично розкладається		Деревні пелети	Деревні пелети
Витрати деревних пелет	кг/год	3,55	2,48
Кількість виробленого піролізного газу	м ³ /год	65	65
Теплотворна здатність газу (вища)	МДж/м ³	6,98	9,03
Час обслуговування піролізної установки	хв/зміну	54	37
Вартість допоміжного обладнання	тис. грн	-	80,9

Річний економічний ефект від впровадження в дію в організації установки піролізу деревних пелет, грн/рік:

$$E = (ВПГ_{\delta} + KEE_{\delta} \cdot ПКВ_{\delta}) \cdot \frac{КР_{\delta}}{КР_{\delta}} \cdot \left(\frac{ЧВ_{\delta} + KEE_{\delta}}{ЧВ_{\delta} + KEE_{\delta}} \right) + \frac{(ЧВ_{\delta}^1 - ЧВ_{\delta}^1) - KEE_{\delta} \cdot (PEB_{\delta}^1 - PEB_{\delta}^1)}{ЧВ_{\delta} + KEE_{\delta}} - (5.10)$$

$$- V_{\text{піроліз.газ/рік}} \cdot (ВПГ_{\delta} + KEE_{\delta} \cdot ПКВ_{\delta}).$$

Термін окупності капітальних вкладень:

$$T = (ПКВ_{\delta} - ПКВ_{\delta}) / (ВПГ_{\delta} - ВПГ_{\delta}) \quad (5.11)$$

Коефіцієнт економічної ефективності:

$$K_E = 1 / T \quad (5.12)$$

Зниження собівартості виробництва продуктів піролізу:

$$L = 100 \cdot (1 - ВПГ_{\delta} / ВПГ_{\delta}) \quad (5.13)$$

Результати розрахунків віднесені на виробництво тисячі кубічних метрів піролізного газу представлені в таблиці 5.3.

Результати економічних розрахунків

№ п/п	Показник	Значення показників	
		базовий	розроблений
1	Вартість кілограму деревних пелет, грн	7,9	7,9
2	Підвищення теплотвор. здат. піролізного газу, %	-	29,36
3	Сукупні витрати на придбання деревних пелет, грн	5177,54	3616,98
4	Витрати на ЗП та відрахування, грн	1203,18	1011,38
5	Амортизаційні витрати (15% від вартості ПУ), грн	693,46	745,18
6	Відрахування на ТО та ПР (8%), грн	298,19	316,43
7	Інші експлуатаційні витрати (10)%, грн	398,51	423,16
8	Сумарні витрати, грн	7778,78	6150,39
9	Відносне зниження собівартості,%	-	20,94%
10	Додаткові капітальні вкладення, грн	-	80900
11	Річна програма виробництва тисячі кубічних метрів газу	120	120
12	Річний економічний ефект, грн	-	48374,0
13	Коефіцієнт економічної ефективності	-	0,573
14	Термін окупності додаткових капітальних вкладень, років	-	1,75

5.2. Висновки до розділу 5

1. Із врахуванням зростання теплотворної здатності піролізного газу на 29,36% собівартість виробництва газу, за умови роботи на удосконаленій піролізній установці, знизилась на 20,94%.

2. При програмі виробництва піролізного газу 120 тис. м³/рік річний економічний ефект за умови використання удосконаленої піролізної установки на деревних пелетах склав 48374 грн.

3. Додаткові капітальні вкладення у розмірі 80900 грн окупаються за 1,75 років при коефіцієнті економічної ефективності рівному 0,573.

ВИСНОВКИ

1. Наведено склад, будову, основні етапи та види попередньої підготовки лігноцелюлозної біомаси для виробництва палив другого покоління шляхом піролізу. Зазначено, що з метою виробництва високоякісних синтез-газу та піролізної оливи потрібно використовувати повільний піроліз біомаси.

2. Аналіз параметрів, що впливають на ефективність процесу піролізу лігноцелюлозної біомаси свідчить, що регулювання розміром частинок, температурою, тиском, швидкістю нагрівання біомаси можна контролювано виробляти продукти піролізу в бажаній кількості та заданої якості.

3. Розроблено технологічну схему повільного піролізу деревної біомаси. В якості прототипу обрано установку, розроблену в НУБіП України під керівництвом проф. Голуба Г.А. Модернізація установки полягала в розробці піролізної установки. Це дозволило виробляти з біомаси не лише піролізний газ, але також піролізну оливу та мати, в якості побічного продукту, біовугілля.

4. Наведено креслення та конструкторські розрахунки камери піролізу та бункера з відповідними деталями. Розробка нової конструкції та заміна матеріалу деталей камери піролізу та бункера дозволило подовжити термін їх роботи до 100 тис. годин без суттєвих капітальних вкладень, що майже у 10 разів більше ніж в класичних конструкціях зазначених вузлів.

5. Представлено заходи з техніки безпеки та пожежної безпеки при експлуатації установки піролізу деревних пелет, дотримання яких дозволить безпечно тривалий час експлуатувати піролізну установку.

6. Із врахуванням зростання теплотворної здатності піролізного газу на 29,36% собівартість виробництва газу, за умови роботи на удосконаленій піролізній установці, знизилась на 20,94%. При програмі виробництва піролізного газу 120 тис. м³/рік річний економічний ефект за умови використання удосконаленої піролізної установки на деревних пелетах склав 48374 грн. Додаткові капітальні вкладення у розмірі 80900 грн окупаються за 1,75 років при коефіцієнті економічної ефективності рівному 0,573.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Aboelela, D., Saleh, H., Attia, A. M., Elhenawy, Y., Majozi, T., & Bassyouni, M. (2023). Recent Advances in Biomass Pyrolysis Processes for Bioenergy Production: Optimization of Operating Conditions. *Sustainability*, 15(14), 11238. <https://doi.org/10.3390/su151411238>
2. Akubo, K., Nahil, M. A., & Williams, P. T. (2018). Pyrolysis-catalytic steam reforming of agricultural biomass wastes and biomass components for production of hydrogen/syngas. *Journal of the Energy Institute*. doi:10.1016/j.joei.2018.10.013
3. Alvarez, J., Amutio, M., Lopez, G., Santamaria, L., Bilbao, J., & Olazar, M. (2019). Improving bio-oil properties through the fast co-pyrolysis of lignocellulosic biomass and waste tyres. *Waste Management*, 85, 385–395. doi:10.1016/j.wasman.2019.01.003
4. Amenaghawon, A.N., Anyalewechi, C.L., Okieimen, C.O. et al. Biomass pyrolysis technologies for value-added products: a state-of-the-art review. *Environ Dev Sustain* 23, 14324–14378 (2021). <https://doi.org/10.1007/s10668-021-01276-5>
5. An experimental study on biomass air-steam gasification effectiveness in a downdraft gasifier / Pavlenko M., Chuba V., Tsyvenkova N., Tereshchuk M. *Engineering for rural development*. 2020. Vol. 19. P. 1831–1839. DOI:10.22616/ERDev.2020.19.TF495
6. Asif, F. C., & Saha, G. C. (2023). Graphene-like Carbon Structure Synthesis from Biomass Pyrolysis: A Critical Review on Feedstock–Process–Properties Relationship. *C*, 9(1), 31. <https://doi.org/10.3390/c9010031>
7. Bulk density of chopped wheat straw – influence of moisture content, fine fraction content and coefficient of compaction / Golub G., Tsyvenkova N., Chuba V., Yarosh Ya. *Engineering for rural development*. 2020. Vol. 19. P. 1892–1899. DOI:10.22616/ERDev.2020.19.TF527

8. Carvalho, M.; Oliveira, A.P.; Mayer, F.; Virgens, C.; Rangel, M.D.C. Thermokinetic and thermodynamic parameters for catalytic pyrolysis of medium density fiber over Ni/beta zeolite. *Catal. Res.* 2022, 2, 1–20.
9. Chio, C.; Sain, M.; Qin, W. Lignin utilization: A review of lignin depolymerization from various aspects. *Renew. Sustain. Energy Rev.* 2019, 107, 232–249.
10. Demiral, İ.; Şensöz, S. Fixed-bed pyrolysis of hazelnut (*Corylus avellana* L.) bagasse: Influence of pyrolysis parameters on product yields. *Energy Sources Part A Recovery Util. Environ. Eff.* 2006, 28, 1149–1158
11. Experimental study into the influence of straw content in fuel on parameters of generator gas / Golub G., Kukharets S., Tsyvenkova N., Yarosh Ya., Chuba V. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies.* 2018. № 5/8 (95). P. 76–86. DOI: 10.15587/1729-4061.2018.142159.
12. Gahane, D., Biswal, D. & Mandavgane, S.A. Life Cycle Assessment of Biomass Pyrolysis. *Bioenerg. Res.* 15, 1387–1406 (2022). <https://doi.org/10.1007/s12155-022-10390-9>
13. Hoang, A. T., Ong, H. C., Fattah, I. M. R., Chong, C. T., Cheng, C. K., Sakthivel, R., & Ok, Y. S. (2021). Progress on the lignocellulosic biomass pyrolysis for biofuel production toward environmental sustainability. *Fuel Processing Technology*, 223, 106997. doi:10.1016/j.fuproc.2021.106997
14. Investigation of technical and technological parameters of syngas combined purifying equipment / Rashchenko A., Les' A., Tsyvenkova N., Holubenko A. *Engineering for rural development.* 2020. Vol. 19. P. 1214–1223. DOI:10.22616/ERDev.2020.19.TF290
15. Jeong, J.Y.; Yang, C.W.; Lee, U.D.; Jeong, S.H. Characteristics of the pyrolytic products from the fast pyrolysis of palm kernel cake in a bench-scale fluidized bed reactor. *J. Anal. Appl. Pyrolysis* 2020, 145, 104708.
16. Krerkkaiwan, S., Fushimi, C., Tsutsumi, A., & Kuchonthara, P. (2013). Synergetic effect during co-pyrolysis/gasification of biomass and sub-bituminous coal. *Fuel Processing Technology*, 115, 11–18. doi:10.1016/j.fuproc.2013.03.044

17. Li, S.; Xu, S.; Liu, S.; Yang, C.; Lu, Q. Fast pyrolysis of biomass in free-fall reactor for hydrogen-rich gas. *Fuel Process. Technol.* 2004, 85, 1201–1211.
18. Ong, H.C.; Chen, W.; Farooq, A.; Gan, Y.Y.; Lee, K.T.; Ashokkumar, V. Catalytic thermochemical conversion of biomass for biofuel production: A comprehensive review. *Renew. Sustain. Energy Rev.* 2019, 113, 109266.
19. Osman, A.I., Farghali, M., Ihara, I. et al. Materials, fuels, upgrading, economy, and life cycle assessment of the pyrolysis of algal and lignocellulosic biomass: a review. *Environ Chem Lett* 21, 1419–1476 (2023). <https://doi.org/10.1007/s10311-023-01573-7>
20. Rangel, M. d. C., Mayer, F. M., Carvalho, M. d. S., Saboia, G., & de Andrade, A. M. (2023). Selecting Catalysts for Pyrolysis of Lignocellulosic Biomass. *Biomass*, 3(1), 31-63. <https://doi.org/10.3390/biomass3010003>
21. Rangel, M.C.; Carvalho, M.d.S.; Mayer, F.M.; Saboia, G.; de Andrade, A.M.; de Oliveira, A.P.S.; dos Santos, P.L. Improving Fast Pyrolysis by Tailoring High-Quality Products Using Catalysts. In *Advances in Chemistry Research*, 1st ed.; Taylor, J., Ed.; Nova Publishers: New York, USA, 2022; Volume 75, pp. 119–169
22. Substantiation of the method of integrated group unification of machine and appliance designs / Golub, G., Tsyvenkova, N., Chuba, V., Golubenko, A., Tereshchuk, M. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies.* 2019. № 6/1 (102). P. 51–59. DOI: 10.15587/1729-4061.2019.183844
23. Sun, R., Shao, Y., Kong, L., Zhang, Sh., Hu, X. (2025). Preparation of anhydrate sugars from biomass via pyrolysis. *Chemical Engineering Science*, 314, 121786. <https://doi.org/10.1016/j.ces.2025.121786>.
24. Sutrisno, B.; Hidayat, A. Upgrading of bio-oil from the pyrolysis of biomass over the rice husk ash catalysts. *IOP Conf. Ser. Mater. Sci. Eng.* 2016, 162, 012014.
25. The results of study into the effect of airsteam blast on the lowgrade fuel gasification process / Kukharets S., Tsyvenkova N., Yarosh Ya., Grabar I., Holubenko A. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies.* 2018. № 6/8 (96). P. 86–96. DOI: 10.15587/1729-4061.2018.147545

26. Tripathi, M.; Sahu, J.N.; Ganesan, P. Effect of process parameters on production of biochar from biomass waste through pyrolysis: A review. *Renew. Sustain. Energy Rev.* 2016, 55, 467–481.
27. Vuppaladadiyam AK, Vuppaladadiyam SSV, Awasthi A, Sahoo A, Rehman S, Pant KK, Murugavelh S, Huang Q, Anthony E, Fennel P, Bhattacharya S, Leu SY. Biomass pyrolysis: A review on recent advancements and green hydrogen production. *Bioresour Technol.* 2022 Nov;364:128087. doi: 10.1016/j.biortech.2022.128087. Epub 2022 Oct 7. PMID: 36216287.
28. Wang, S., Dai, G., Yang, H., & Luo, Z. (2017). Lignocellulosic biomass pyrolysis mechanism: A state-of-the-art review. *Progress in Energy and Combustion Science*, 62, 33–86. doi:10.1016/j.pecs.2017.05.004
29. Wei, J., Gao, Y., Wang, Y., Li, B., Chen, D., Wu, Z., Song, X., Liu, X., Jiao, Y., Yu, G., Ding, K., Huang, A. (2025). Influence of volatiles-char interaction during torrefied biomass and coal co-pyrolysis on char structure: Comparison of different decoupling studies. *Journal of Analytical and Applied Pyrolysis*, 190, 107150. <https://doi.org/10.1016/j.jaap.2025.107150>.
30. Yang, C., Li, R., Zhang, B., Qiu, Q., Wang, B., Yang, H., ... Wang, C. (2019). Pyrolysis of microalgae: A critical review. *Fuel Processing Technology*, 186, 53–72. doi:10.1016/j.fuproc.2018.12.012
31. Yang, Q., Zhou, H., Bartocci, P., Fantozzi, F., Mašek, O., Agblevor, F. A., ... McElroy, M. B. (2021). Prospective contributions of biomass pyrolysis to China's 2050 carbon reduction and renewable energy goals. *Nature Communications*, 12(1). doi:10.1038/s41467-021-21868-z
32. Yorgun, S.A.İ.T.; Şensöz, S.; Koçkar, Ö.M. Flash pyrolysis of sunflower oil cake for production of liquid fuels. *J. Anal. Appl. Pyrolysis* 2001, 60, 1–12.
33. Відновлювана енергетика в аграрному виробництві : навч. посіб. За ред. О. В. Скидна і Г. А. Голуба / О.В. Скидан, Г.А. Голуб, О.Д. Ярош, В.В. Чуба, О.В. Медведський, Н.М. Цивенкова, О.Ф. Соколовський, В.В. Кухарець – Київ : Вид-во НУБіП, 2018. – 338 с.
34. Якість енергоресурсів і енергоносіїв : навч. посіб. / А. П. Войцицький та ін. – Житомир : Вид-во ЖНАЕУ, 2017. – 219 с.

35. <https://www.richipelletmachine.com/uk/wood-pellet-making-equipment/>
36. Pecchi, M., & Baratieri, M. (2019). Coupling anaerobic digestion with gasification, pyrolysis or hydrothermal carbonization: A review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 105, 462–475. doi:10.1016/j.rser.2019.02.003
37. Kumar, R., Strezov, V., Lovell, E., Kan, T., Weldekidan, H., He, J., ... Scott, J. (2019). Enhanced bio-oil deoxygenation activity by Cu/zeolite and Ni/zeolite catalysts in combined in-situ and ex-situ biomass pyrolysis. *Journal of Analytical and Applied Pyrolysis*. doi:10.1016/j.jaap.2019.03.008
38. Soria, J., Li, R., Flamant, G., & Mazza, G. D. (2019). Influence of pellet size on product yields and syngas composition during solar-driven high temperature fast pyrolysis of biomass. *Journal of Analytical and Applied Pyrolysis*. doi:10.1016/j.jaap.2019.04.007
39. Polin, J. P., Peterson, C. A., Whitmer, L. E., Smith, R. G., & Brown, R. C. (2019). Process intensification of biomass fast pyrolysis through autothermal operation of a fluidized bed reactor. *Applied Energy*, 249, 276–285.
40. Al- Haj Ibrahim, H. (Ed.). (2020). *Recent Advances in Pyrolysis*. IntechOpen. doi: 10.5772/intechopen.77528
41. *Renewable energy in agriculture: підручник* / Г. Голуб, О. Скидан, С. Кухарець, Н. Цивенкова, О. Марус, Я. Ярош, В. Чуба, М. Павленко. – К.: НУБіП України, 2023. – 400 с.
42. *Машини та обладнання для біоенергетики: навчальний посібник* / Голуб Г. А., Цивенкова Н. М., Марус О. А., Павленко М. Ю., Яременко О. А.; за ред. Г. А. Голуба. – К.: НУБіП України, 2022. – 203 с.
43. *Виробництво і використання генераторного газу з сільськогосподарської рослинної сировини* / Я.Д. Ярош, Г.А. Голуб, Н.М. Цивенкова, С.М. Кухарець, О.В. Медведський, В.В. Чуба. – Житомир : ЖНАЕУ, 2020. 224 с.
44. *Економічні розрахунки при проектуванні технічної продукції. Методичні вказівки до виконання розрахункових робіт з навчальної дисципліни «Економіка підприємства» для студентів спеціальностей 051 «Економіка»* / Укл. І.В. Журило. Кропивницький: ЦНТУ, 2023. 44 с.