

НУБІП України

МАГІСТЕРСЬКА КВАЛІФІКАЦІЙНА РОБОТА

01.08 – МР. 2218 «С» 2021.21.12. 004 ПЗ

СТОВБУН НАДІЯ МИХАЙЛІВНА

2022 р.

НУБІП України

НУБІП України

НУБІП України

НУБІП України

НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ БІОРЕСУРСІВ

НУБІП України

І ПРИРОДОКОРИСТУВАННЯ УКРАЇНИ

Механіко-технологічний факультет

НУБІП України

УДК 662.65

ПОГОДЖЕНО

Декан механіко-технологічного факультету

НУБІП України

В. Братішко

(підпис)

“ ” 2022 р.

ДОПУСКАЄТЬСЯ ДО ЗАХИСТУ

Завідувач кафедри

тракторів, автомобілів та біоенергоресурсів

(назва кафедри)

Калінін Є.І.

(підпис)

(ПІБ)

“ ” 2022 р.

НУБІП України

МАГІСТЕРСЬКА КВАЛІФІКАЦІЙНА РОБОТА

на тему Підвищення ефективності роботи газогенератора, що працює на соломі

Спеціальність: 208 «Агроінженерія»

Освітня програма: «Агроінженерія»

Орієнтація освітньої програми: освітньо-професійна

НУБІП України

Гарант освітньої програми:

Доктор технічних наук, с.н.с

В.В. Братішко

(підпис)

НУБІП України

Керівник магістерської кваліфікаційної роботи:

Кандидат технічних наук, доцент

Н.М. Шивенкова

(науковий ступінь та вчене звання)

(підпис)

(ПІБ)

Виконав

Н.М. Стовбун

(підпис)

(ПІБ студента)

НУБІП України

КИЇВ – 2022

НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ БІОРЕСУРСІВ
І ПРИРОДОКОРИСТУВАННЯ УКРАЇНИ
Механіко-технологічний факультет

ЗАТВЕРДЖУЮ

Завідувач кафедри тракторів
автомобілів та біоенергоресурсів

д.т.н., професор _____ Калінін Є.І.
(науковий ступінь, вчене звання) (підпис) (ПШБ)

2022 року

ЗАВДАННЯ

ДО ВИКОНАННЯ МАГІСТЕРСЬКОЇ КВАЛІФІКАЦІЙНОЇ РОБОТИ СТУДЕНТУ

Стовбун Надії Михайлівні

(прізвище, ім'я, по батькові)

Спеціальність: 208 «Агроінженерія»

Освітня програма: «Агроінженерія»

Орієнтація освітньої програми: освітньо-професійна

Тема магістерської кваліфікаційної роботи: Підвищення ефективності роботи газогенератора, що працює на соломі

затверджена наказом ректора НУБіП України від "21" грудня 2021 р. № 2218 «С»

Термін подання завершеної роботи на кафедру _____ 24 жовтня 2022 року

(рік, місяць, число)

Вихідні дані до магістерської кваліфікаційної роботи: конструкції протипотокових газогенераторів з виробництва горючого синтетичного газу; сучасні дослідження науковців в галузі виробництва горючих синтетичних газів з рослинної біомаси, зокрема з соломи; перелік та конструкції обладнання, яке використовується для очищення та охолодження синтез-газу; вимоги з охорони праці та техніки безпеки під час експлуатації установок, що працюють під тиском; вимоги до безпеки елементів конструкцій газогенераторів.

Перелік питань, що підлягають дослідженню:

1. Науково-технічні передумови до виробництва горючих синтез-газів з соломи зернових;
2. Дослідження конструкційно-технологічних параметрів протипотокового газогенератора на соломі зернових;
3. Встановлення залежності теплотворної здатності горючого синтез-газу з соломи пшениці від порозності шару матеріалу на її основі, коефіцієнту якості перекриття струменями повітря активної зони та кількості повітря, необхідного на процес газифікації.

Перелік графічного матеріалу (за потреби): схема класифікації рослинних залишків за фізико-хімічними параметрами щодо їх енергетичного застосування; схема лабораторної газогенераторної установки; креслення фурм.

Дата видачі завдання "21" грудня 2021 р.

Керівник магістерської кваліфікаційної роботи

(підпис)

Нивенкова Н.М.

(прізвище та ініціали)

Завдання прийняв до виконання

(підпис)

Стовбун Н.М.

(прізвище та ініціали студента)

ЗМІСТ

НУВБІП України	ПЕРЕЛІК УМОВНИХ ПОЗНАЧЕНЬ.....	4
	ВСТУП.....	7
	РОЗДІЛ 1. ТЕОРЕТИЧНІ ОСНОВИ ПРОЦЕСУ ТА ОБЛАДНАННЯ З	
НУВБІП України	ВИРОБНИЦТВА СИНТЕЗ-ГАЗУ З СОЛОМИ ПІПЕНИЦІ...	10
	1.1. Аналіз сировинної бази виробництва горючого синтез-газу...	10
	1.2. Аналіз конструкцій камер та дослідження впливу режиму	
	дутьтя повітрям на ефективність виробництва синтез-газу.....	17
	1.3. Аналіз досліджень впливу фізико-хімічних властивостей	
НУВБІП України	біомаси та конструкційно-технологічних параметрів	
	газогенератора на теплотворну здатність синтез-газу.....	24
	1.4. Висновки до розділу 1.....	29
	РОЗДІЛ 2. ТЕОРЕТИЧНЕ ДОСЛІДЖЕННЯ ЕФЕКТИВНОСТІ	
НУВБІП України	ПРОЦЕСУ ВИРОБНИЦТВА СИНТЕЗ-ГАЗУ З СОЛОМИ	
	ПІПЕНИЦІ.....	30
	2.1. Теоретичне обґрунтування конструкції камери газифікації	
	виходячи з режиму газоповітряного дутьтя.....	30
	2.2. Складання матеріального та теплового балансів процесу	
НУВБІП України	виробництва синтез-газу з соломи.....	34
	2.3. Висновки за розділом 2.....	38
	РОЗДІЛ 3. ПРОГРАМА, МЕТОДИКА ТА РЕЗУЛЬТАТИ	
	ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНИХ ДОСЛІДЖЕНЬ.....	39
НУВБІП України	3.1. Матеріали та методика виконання експериментальних	
	досліджень.....	39
	3.2. Результати експериментальних досліджень	46
	3.3. Висновки за розділом 3.....	55
	ВИСНОВКИ.....	56
НУВБІП України	СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ.....	58
	ДОДАТКИ.....	65

ПЕРЕЛІК УМОВНИХ ПОЗНАЧЕНЬ

$\lambda_{ш.с.}$ – коефіцієнт опору шару соломи пшениці;

$P_{газ}$ – вага газу, кг/м³;

d_c – діаметр частинок соломи пшениці, мм;

$v_{ф}$ – швидкість фільтрації газу крізь шар соломи пшениці, м/с;

$h_{ш.с.}$ – висота шару соломи пшениці, мм;

$\rho_{ш.с.}$ – опір шару соломи пшениці (динамічний напір), Па;

ν – кінематична в'язкість, м²/с;

$d_{ф}$ – внутрішній діаметр фурми, м;

x – відстань від горловини фурми, м;

v_0 – початкова швидкість потоків повітря в горловині фурми, м/с;

μ – коефіцієнт структури газового (повітряного) потоку в початковому перерізі

струменя ($\mu=0,075-0,09$);

V_0 – початкова швидкість потоку повітря на виході з фурми, м/с;

x – відстань, яку пройшов потік газу (повітря), м;

$r_{ф}$ – радіус фурми, м;

V_x – швидкість потоку газу (повітря) на віддалі x від торця фурми, м/с;

n – кількість фурм, шт;

γ – коефіцієнт стискання струменя газу (повітря);

$Q_{пов}$ – витрати повітря, що надходить в на процес газифікації, м³/год;

$Q_{НТЗ}^{соломи}$ – нижча теплотворна здатність соломи, кДж/кг;

$\rho_{пов}$ – питома вага повітря, кг/м³;

P_d – динамічний напір на виході з фурми, Па;

$F_{ф}$ – площа поперечного перерізу фурми, м²;

v_c – об'єм сухого газу, виробленого з кілограма соломи пшениці, м³/кг;

N_p^2 – вміст азоту в соломі пшениці, %;

N_2^2 – вміст азоту в горючому синтез-газі, %;

$V_{газ}$ – об'єм виробленого синтез-газу, м³/год;

$P_{\text{сінт.}}$ – продуктивність установки за горючим синтез-газом, м³/год;

$L_{\text{с}}$ – годинні витрати соломи пшениці газогенератором, кг/год;

B – теплове напруження камери, кДж/м²·год;

$F_{\text{ф.п.}}$ – площа поперечного перерізу фурменого поясу, м²;

W^{P} – вологість палива, %;

$C^{\text{C}}, H^{\text{P}}, O^{\text{P}}, S^{\text{P}}$ – масові частки вуглецю, водню, кисню, сірки у робочій масі палива, %;

$d_{\text{с}}$ – діаметр горловини камери газоутворення, м;

$h_{\text{прям.кон.}}$ – висота прямого конуса камери, м;

$D_{\text{ф.п.}}$ – діаметр фурменого поясу камери, м;

$H_{\text{реак.шар.}}$ – висота реакційного шару соломи, м;

$h_{\text{фурм.}}$ – відстань від горловини до фурменого поясу, м;

m – коефіцієнт пропорційності площ (4 – 5);

ω – швидкість дуття (15 – 22 м/с);

l_{f} – крок становлення фурм, м;

n – число фурм, шт;

τ – періодичність подачі соломи в бункер, год;

ξ – коефіцієнт витікання потоків газів дуття з фурм;

$\rho, \rho_{\text{золи}}$ – насипна щільність соломи та золи пшениці відповідно, кг/м³;

$\tau_{\text{р}}$ – час роботи установки без очищення зольника, год (7 – 12 годин);

A – зольність соломи пшениці, % (по вазі);

$D_{\text{корп}}$ – діаметр корпусу, м;

$\rho_{\text{сінтез-газ}}$ – густина сухого синтез-газу за нормальних умов, кг/(нм³);

$C^{\text{вал}}, W^{\text{вал}}, O^{\text{вал}}, N^{\text{вал}}, H^{\text{вал}}, A^{\text{вал}}$ – вміст в робочій масі соломи пшениці вуглецю, вологи, кисню, азоту, водню та золи, мас. частки;

$C_{\text{парі}}$ – середня теплоємність пари між $t_{\text{т.р.}}$ до $t_{\text{сінтез-газ}}$, Дж/(кг·°С);

$V_{\text{вал}}^{\text{сінтез-газ}}$ – об'єм вологого газу, що виробляється з кілограму робочої маси соломи, нм³/кг;

$d_{\text{вог.}}$ – вологість повітря та синтез-газу відповідно, кг/кг;

$h_{\text{смоли}}$ – вміст водню в смолі, мас. частка;

$i_{т.р.}$ – теплоємність кілограма насиченої пари в точці роси, яка відповідає насиченню синтез-газу, Дж/кг водяної пари;
 m_c – маса коксового залишку;
 $m^{сол}$ – робоча маса палива еквівалентна 1 кг;

$m_{пов}$ – кількість повітря, необхідна на газифікацію 1 кг соломи;

$m_{синтез-газ}$ – маса сухого газу, вироблена з кг соломи;
 $m_{смола}$, $m_{волога}$, $m_{пара}$ – маса смоли, вологи та пари відповідно, кг;
 m_c – маса вуглецю в коксовому залишку непрореагованої соломи, мас. частка;

$Q_{ВТЗ}^{синтез-газ}$ – вища теплотворна здатність синтез-газу Q_V , Дж;

$Q_{ВТЗ}^{соломи}$ – вища теплотворна здатність газифікованої соломи, Дж/кг;
 $q_{смола}$ – вміст вуглецю в смолі, мас. частка;
 $Q_{смола}^{ВТЗ}$ – вища теплотворна здатність смоли в синтез-газі, Дж/кг;
 $t_{синтез-газ}$ – температура виробленого синтез-газу, °С;

$t_{соломи}$ – температура соломи, з якою вона надходить в газогенератор, °С;

$t_{т.р.}$ – температура точки роси за показани психрометра, °С;
 $V_{газ}$ – вихід сухого газу з одного кілограма робочої маси палива, $лм^3/кг$;
 $V_{пов}$ – подача повітря на газифікацію 1 кг робочої маси соломи, $лм^3/кг$;

X – коефіцієнт стану сухої насиченої пари, %;

$i_{т.р.}$ – теплоємність насиченої пари при $t_{т.р.}$, Дж/кг;
 CO_2 , CO , $C_m H_n$ – вміст вуглецевих газів в синтез-газі, частка за об'ємом;
 $C_{пов}$ – середня теплоємність повітря в діапазоні температур від 0 до $t_{соломи}$, Дж/(кг·°С);

$C_{синтез-газ}$ – середня теплоємність сухого синтез-газу від 0 до $t_{синтез-газ}$, °С, Дж/(кг·°С);
 $C_{смола}$, C_c – кількість вуглецю в золи та смолі, яка не прореагувала під час протікання реакцій окислення і відновлення, в розрахунку на 1 кг соломи;

$C_{соломи}$ – середня теплоємність соломи в діапазоні температур від 0 до $t_{соломи}$, Дж/(кг·°С);

ВСТУП

НУБІП України

Світова наукова думка зосереджена на питанні підвищення ефективності процесу виробництва горючого синтез-газу з некондиційних видів палива,

НУБІП України

зокрема з таких як соломка пшениці. Проте, є перелік питань, які через відсутність зв'язку аналітичних досліджень з експериментальними, не дозволяють отримати бажаних результатів від застосування вище зазначених технологій. Зокрема, зазначені питання стосуються пошуку шляхів підвищення вмісту горючих компонентів в складі газу, від чого залежить теплотворна здатність виробленого газу, та створення універсальної конструкції багатопаливного газогенератора.

НУБІП України

Відомі шляхи розв'язання зазначених питань наступні: розробка нових конструкцій вузлів газогенераторів; використання нових методів подачі окисника в зону горіння та методи формування цього окисника; досягнення високих температур в активній зоні камери газифікації; усунення таких явищ як зависання палива та «мертвих зон» з відсутністю процесу горіння.

НУБІП України

Проте, хоча існує велика кількість наукових робіт в галузі виробництва горючих газів, невивченими залишаються питання підвищення інтенсивності процесу газифікації соломи зернових, особливо соломи з різними хімічними і фізичними властивостями, в протипотокових газогенераторах.

НУБІП України

Розробка принципово нової конструкції протипотокового газогенератора, яка забезпечує оптимальний об'єм газів дуття відповідно до порозності шару соломи пшениці дозволяє досягти найвищого ступеню перекриття потоками повітря горловини камери газифікації за рахунок чого є можливим виробництво синтез-газу найвищої теплотворної здатності.

НУБІП України

Отже, розробка технологічного процесу виробництва енергії шляхом хіміко-термічної конверсії соломи пшениці є актуальною задачею, а проектування принципово нової конструкції газогенератора і його основних вузлів сприятиме підвищенню ефективності процесу виробництва синтез-газу, забезпечивши при цьому високу його якість та теплотворну здатність.

Актуальність теми дослідження. Сучасні прямопотоківі газогенераторні установки, на жаль, не забезпечують виробництво якісного синтез-газу з соломи зернових з високою теплотворною здатністю та низьким вмістом смол і механічних домішок. Такі газогенераторні установки характеризуються високою питомою матеріалоемністю та низьким енергетичним ККД [2, 16].

Гідною альтернативою таким конструкціям газогенераторів є протипотокові газогенератори з суцільним шаром [36]. Особливо актуальним є встановлення таких установок на фермерських та малих сільськогосподарських підприємствах із надлишком рослинної біомаси для живлення силових установок, виробництва електричної та теплової видів енергії. Використання таких установок забезпечить енергетичну самодостатність підприємства, а також сприятиме зменшенню антропогенного навантаження на довкілля завдяки заміні традиційних викопних видів палива на альтернативне паливо (солому пшениці).

Однак, пропонована технологія експлуатації протипотокових газогенераторів, що працюють на соломі пшениці, має ряд недоліків: має місце явище зависання палива та утворення золонлакових агломератів; для вигорання смол та важких вуглеводнів потрібно підтримувати високий температурний режим в межах 1100... 1200°C, слідкуючи при цьому, щоб не почалося плавлення золи; потрібно попередньо підготувати паливо до газифікації [6]. Отже, виникає потреба в роботах з підвищення ефективності процесу виробництва синтез-газу з соломи пшениці з врахуванням сучасних досягнень науки і техніки.

Мета роботи – підвищення ефективності технологічного процесу виробництва синтез-газу з соломи зернових шляхом обґрунтування параметрів та режимів роботи газогенератора.

Завдання роботи:

- проаналізувати відомі способи і засоби виробництва горючих газів з соломи пшениці та обґрунтувати технологічний процес та конструкційні параметри протипотокового газогенератора;
- шляхом проведення багатофакторного експерименту встановити вплив коефіцієнта якості дуттьового перекриття перерізу горловини камери

струменями повітря, об'єму повітряного дуття та порозності шару матеріалу з соломи пшениці на теплоту згорання виробленого синтез-газу;

– виконати відповідні експериментальні дослідження та обґрунтувати раціональні конструкційно-технологічні параметри та режими роботи протипотокового газогенератора, що працює на соломі пшениці та підтвердити відповідність аналітичних розрахунків експериментальним.

Предмет дослідження – закономірності впливу основних параметрів газогенератора на ефективність процесу виробництва горючого синтез-газу з соломи пшениці.

Об'єкт дослідження – технологічний процес виробництва горючого синтез-газу з соломи пшениці.

Методи дослідження. Аналітичні дослідження виконувалися із застосуванням теорій тепло- та масообміну, основних законів теплофізики, газодинаміки, методів статистичної обробки даних.

Експериментальні дослідження виконані на протипотоковому газогенераторі, що працює на соломі пшениці у відповідності до галузевих стандартів та відомих методик. Пакети прикладних програм Microsoft 2016 та Statistics 10 застосовано до обробки результатів експериментальних досліджень.

Технічні креслення установки виконані в CAD-системі, а саме в програмному комплексі тривимірного твердотілого моделювання КОМПАС-3D v20.

Практичне значення результатів магістерської роботи містить дослідження та обґрунтування техніко-технологічних параметрів протипотокового газогенератора, що дозволило підвищити ефективність виробництва горючого синтез-газу з соломи пшениці.

РОЗДІЛ 1

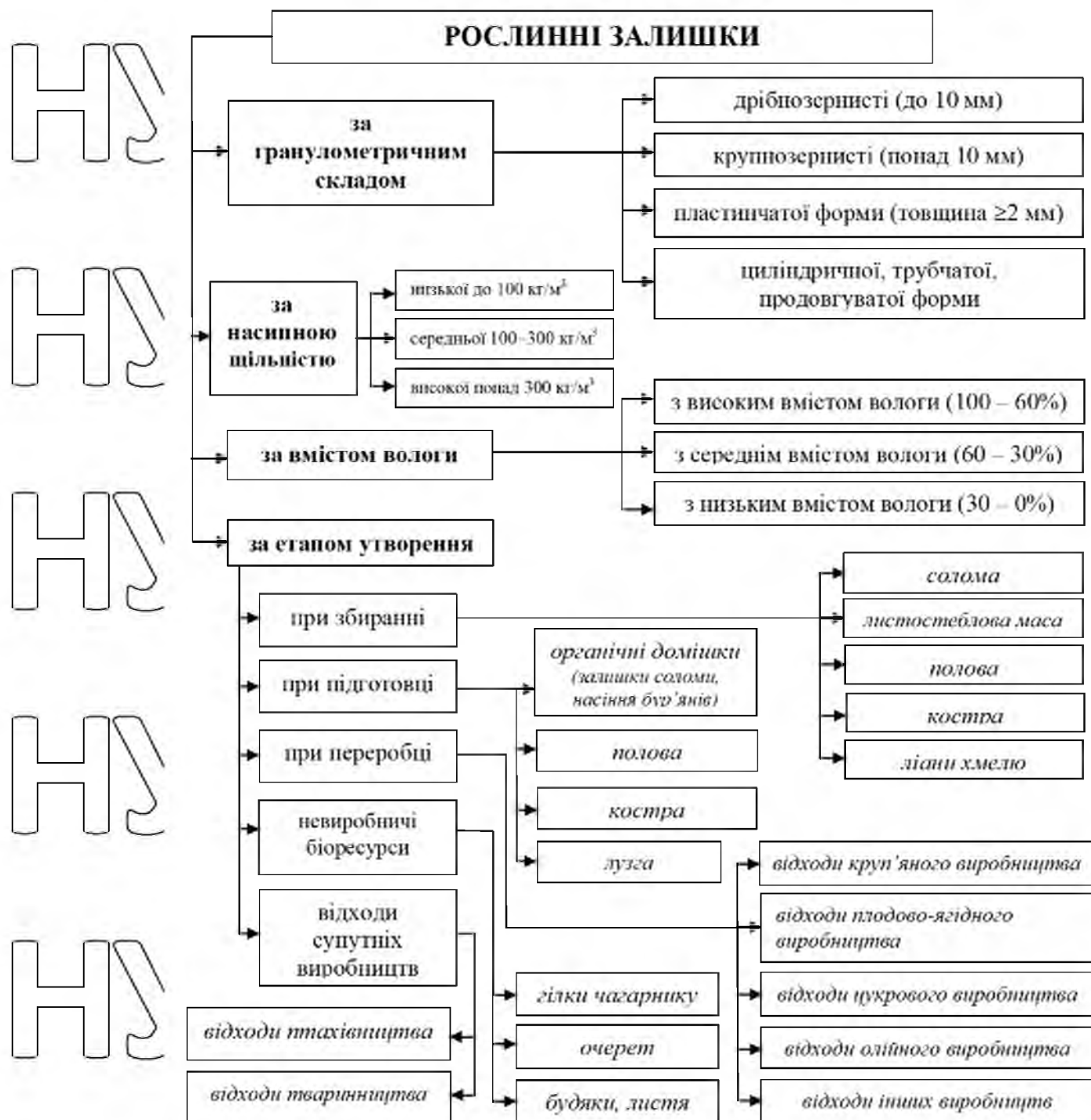
ТЕОРЕТИЧНІ ОСНОВИ ПРОЦЕСУ ТА ОБЛАДНАННЯ З
ВИРОБНИЦТВА СИНТЕЗ-ГАЗУ З СОЛОМИ ПШЕНИЦІ

1.1. Аналіз сировинної бази виробництва горючого синтез-газу

Класифікація біомаси для виробництва горючого синтез-газу наведена на рисунку 1.1. За наведеною класифікацією рослинна біомаса поділяється за етапом утворення, вологістю, насипною щільністю, гранулометричним складом тощо [41, 43]. Виходячи з можливості конвертувати рослинну біомасу в енергію (теплову, силову та електричну), її здатності до відтворення, доступності, поширеності як на території України, так і ЄС та здатності до використання у широкому спектрі теплотехнічного обладнання зробимо висновок, що енергетичний потенціал рослинної сировини України є найбільшим серед Європейських країн і складає 47 млн. т. у. п. [42]. Однак, частина рослинної біомаси, що використовується для енергетичних цілей є незначною і становить лише 8,5 млн. т. у. п., що є еквівалентом 18% від її загального обсягу [41–43, 46].

Дослідження в галузі виробництва енергії з рослинної сировини в Україні представлено в роботах [8, 44]. В згаданих працях виконано оцінку потенціалу рослинної біомаси аграрного походження, яка культивується на території України. Зазначено, що солома зернових з усього рослинного потенціалу біомаси складає найбільшу частину – 46%, що є еквівалентом 10,8 млн. т. у. п./рік. Також у вказаних роботах описано високоефективні системи виробництва твердих біопалив в умовах фермерських та приватних господарств аграрної галузі, представлено технологічні процеси та високотехнологічні засоби виробництва енергії з твердих видів палива з рослинної біомаси для забезпечення енергетичної автономності аграрних виробництв.

Згідно з дослідженнями [46] в Україні лише 20% річного виробництва соломи дозволено використовувати для забезпечення енергетичних потреб, на противагу країнам Європейського Союзу, де згаданий показник сягає 37% [40].



Рис/ 1.1. Рослинна біомаса, придатна до виробництва горючого синтез-газу

Розглянемо потенціал виробництва соломи в одній з областей України за період 2017–2021 рр. Середній валовий збір зерна з площі 386 тис. га. за вказаний період склав приблизно 787 тис. т. (додаток А). При цьому частка отриманої соломи становила 205 тис. т.

Слід зазначити, що під час визначення кількості соломи, яку ми можемо використати для забезпечення енергетичних потреб, слід обов'язково враховувати потреби інших галузей аграрного комплексу (тваринництво, рослинництво, птахівництво). Солома зернових є складовою кормової бази тваринництва та птахівництва, сприяє відродженню гумусного шару ґрунтів (за [46] нестача гумусу в ґрунті в межах 20 кг/га потребує скорочення витрат соломи на виробництво енергії приблизно на 10–12%).

Маючи орієнтовні значення кількості зерна і кількості соломи можна визначити потенціал побічної продукції як для окремого фермерського господарства, так і за регіонами нашої держави. Розраховуючи потенціал доступної соломи також, поряд з такими показниками як кількість, доступність та місце вирощування, слід враховувати її хімічний склад (С – 0,35%; S – 0,09%; O – 42%; N – 0,6%; H – 6,4%; C – 50,56%), сезонність збирання врожаю тощо. Останній параметр залежить від виду рослини, місця її вирощування, часу досягання, метеорологічних умов і є основним фактором визначення технології її переробки і умов зберігання [59]. Наприклад, вміст хлору в соломі, скошеної в ранні жнива, у чотири рази вищий порівняно з соломомою, зібраною у пізні терміни жнив. У висушеній соломі вміст хлору складає 1%. Цей хімічний елемент за наявності вологи і під дією високих температур (1100–1300 °C) призводить до високотемпературної корозії поверхонь нагрівання газогенераторних установок.

Чи придатна солома до використання з метою виробництва енергії залежить від її паливно-технологічних характеристик. До них відносяться: теплотворна здатність в 1 об'єму; парусність; вміст сірки, золи, вологи; гранулометричний склад; здатність до спікання; вміст смолистих речовин; механічна міцність та щільність; реактивна здатність [53].

Теплота згорання робочої маси гранул, пелет і брикетів залежить від умов їх зберігання, параметрів доквілля та агротехнічних характеристик самої культури, з якої їх виготовили. Основою клітковини соломи є $C_6H_{10}O_5$ (целюлоза). Її теплотворна здатність становить 16 МДж/кг. Інші складові – це дубильні речовини, лігнін та смоли. Їх теплотворна здатність переважає за теплотворну здатність клітковини. Також теплотворна здатність гранул, пелет і брикетів з соломи (17 – 19 МДж/кг) майже досягає теплотворної здатності кам'яного вугілля (16 – 26 МДж/кг) та деревини (17 – 22 МДж/кг) [44, 53].

За [44, 53] з кілограма соломи виробляється до 3 кВт теплової енергії. Три кілограми соломи за енергетичним еквівалентом можуть замінити 1 м³ природного газу, або 1 л дизеля. З ролону соломи діаметром 1,8 м та довжиною 1,2 м (вага 300 кг) матимемо 100 м³ природного газу або 100 л дизеля.

Солома легко запалюється і горить, тому що має високий вміст летючих компонентів (68 – 82 %). Проте солома має і досить високу зольність (5–7%) порівняно з рештками інших рослин (2–3%), що є причиною оснащення газогенераторів додатковим обладнанням з її усунення з робочої зони. Через низьку насипну щільність (28 – 45 кг/м³) первинна солома має IV клас якості – незадовільний. Підвищити насипну щільність соломи можна лише шляхом її попередньої механічної обробки – подрібненням різальними апаратами, ущільненням в апаратах з виробництва пелет, брикетів та гранул (грануляторах). Щільність гранул з соломи становить 570...665 кг/м³, а поліфракційних сумішей на її основі – 125...155 кг/м³ [53].

Під час жнив (залежно від погодних умов) вологість соломи може становити 60 %. Зменшити це значення можна шляхом зберігання соломи під накривтями. Тоді вона приймає значення рівноважної вологості, що складає 20...22 % в зимовий період та 8 – 15 % влітку [53].

Найважливішим показником придатності палива до використання з метою виробництва енергії є теплота згорання. В таблиці 1.1 наведено значення теплоти згорання та зольності решток різних рослинних культур.

Таблиця 1.1

Теплота згоряння та зольність решток сільськогосподарських культур [46]

Залишки с.-г. культур	Вираз для визначення Q_{H^P} , МДж/кг [46]	Нижча теплота згоряння Q_{H^P} при $W^P=20\%$, МДж/кг	Нижча теплота згоряння Q_{H^P} сухої маси, МДж/кг	Зольність сухої маси, %
Брикети з соломи	–	16,5	18,8	4,0
Льнокостра	$1030 \cdot H^P + 339 \cdot C^P - 108 \cdot (O^P - S^P) - 24 \cdot W^P$	19,6	21,0	6,0
Стебла та початки кукурудзи	$16,303 - 0,1901 \cdot W$	16,5	18,0	4,6
Рапсова солома (ріпак)	$17,532 - 0,1997 \cdot W$	16,0	17,0	5,9
Лузга соняшника	$1030 \cdot H^P + 339 \cdot C^P - 108 \cdot (O^P - S^P) - 24 \cdot W^P$	14,6	19,3	5,0
Лузга проса	$1030 \cdot H^P + 339 \cdot C^P - 108 \cdot (O^P - S^P) - 24 \cdot W^P$	16,86 при вологості 7,5%	17,8	7,0
Солома середньому в	–	13,5	17,4	5,0
Вівсяні	$16,257 - 0,1901 \cdot W$	12,9	16,7	4,9
Ячмінні	$17,005 - 0,203 \cdot W$	13,4	17,4	4,5-5,9
Пшеничні	$16,259 - 0,1902 \cdot W$	13,5	17,8	6,5
Житні	$15,299 - 0,1801 \cdot W$	13,6	17,0	4,5

Розглянемо покомпонентний склад летючих в соломі зернових. Летючі соломи пшениці містять вуглеводні (C_nH_m), азот (N_2), вуглекислий газ (CO_2), окис вуглецю (CO) та водень (H_2) [47]. При спалюванні соломи також слід врахувати необхідність наявності достатнього об'єму зольника газогенератора, щоб організувати утилізацію золи і підвести потрібну кількість повітря для запобігання механічній і хімічній неповноті згоряння.

Солома має пористий чи спечений коксовий залишок (табл. 1.2). Це потребує оснащення газогенераторів спеціальними колосниковими решітками та механізмами видалення та утилізації золи.

Таблиця 1.2

Вміст летючих та характеристика зольного залишку решток сільськогосподарських культур [54]

Вид рослинної сировини	Температура початку процесу утворення летючих, °С	Вміст летючих в паливі, %	Характеристика зольного залишку
Соняшникова лузга	167	74 – 80	порошкоподібний
Солома-січка зернових	123 – 146	78 – 83	початкової форми, пористий, порошкоподібний, оспечений
Кукурудзяні стержні і початки	114 – 136	72 – 80	порошкоподібний
Солом'яні брикети	147 – 166	до 80	порошкоподібний

З [31] випливає, що в наявній літературі відсутні відомості щодо горючих компонентів у складі солом'яної золи. Коротко представлено лише її хімічний склад із зазначенням основних мінеральних складових золи, а саме – вапна, фосфору, калію, карбонатів. Останні, в свою чергу, і утворюють негорючий твердий залишок (золу).

Вибір та конструктивне оформлення елементів теплотехнічного обладнання значною мірою залежать від температури плавлення золи, характеристики зольного залишку та її кількості. Зола буває: легкоплавка (температура плавлення становить $1025^{\circ}\text{C} - 1225^{\circ}\text{C}$); середньо-плавка (температура сягає $1180^{\circ}\text{C} - 1425^{\circ}\text{C}$) та тугоплавка (кремнезем, глинозем, вапно з температурою плавлення $1520^{\circ}\text{C} - 1825^{\circ}\text{C}$).

Пшенична солома має невисоку температуру плавлення золи ($1115 - 1155^{\circ}\text{C}$). На зовнішній вигляд зола пшеничної соломи є пастоподібною масою високої щільності. Під час виробництва синтез-газу з соломи при виході з активної зони (температурний діапазон $1100 - 1300^{\circ}\text{C}$) ця зола щільно заповнює елементи конструкцій колосникових решток газогенераторів, що є причиною погіршення газопроникності палива та зростання опору в системі.

Основними параметрами золи є протяжність зони плавлення та швидкість рекристалізації. За [27] діапазон між температурами плавлення і розтікання називається протяжністю зони плавлення. Швидкість рекристалізації – це коли довгі шлаки, утворюючи склоподібну масу, застигають повільно, а короткі шлаки, навпаки, швидко кристалізуються і застигають. Також останні мають низький вміст кремнію, і високий вміст оксидів кальцію і заліза.

Наведені властивості пшеничної золи значною мірою залежать від фізико-хімічних властивостей палива, температурних умов в активній зоні камери газифікації, часу роботи установки, питомого тепловиділення, наявності додаткової теплоізоляції тощо. Виконаємо порівняльний аналіз значень зольності та температур плавлення золи для рослинної біомаси, таблиця 1.3.

Таблиця 1.3

Зольність та температура плавлення золи різних видів рослинної біомаси

Вид рослинної біомаси	Зольність, %	Вища теплотворна здатність (МДж/кг)	Температурні діапазони		
			Температура розтікання, °С	Температура пластичної деформації, °С	Температура пружної деформації, °С
Соняшникова лузга	4,1	19,4	1225 – 1335	1215 – 1225	1165 – 1215
Солом'яні брикети	4,2	19,1	1265 – 1335	1205 – 1265	1145 – 1195
Солома-січка зернових	5,2	17,6	1245 – 1315	1175 – 1235	1105 – 1155
Кукурудзяні стержні і початки	4,7	18,2	1315 – 1365	1245 – 1315	1185 – 1245

Наведемо порівняння фізико-хімічних властивостей окремих видів традиційного палива та палив на основі рослинної біомаси, таблиця 1.4.

Порівнюючи брикети та гранули з соломи з кам'яним вугіллям зазначимо, що паливо на основі соломи має теплотворну здатність близьку до цього виду палива, проте значно менший вміст сірки та золи. Також ступінь доступності та

відтворюваності соломи пшениці значно вища порівняно з природним газом, кам'яним вугіллям та паливами нафтового походження.

Таблиця 1.4

Фізико-хімічні властивості палив

Паливо	Зольність, %	Вміст сірки, %	Теплота згорання, МДж/кг	Вологість, %
Брикетти, гранули з соломи	4,2	0,22	16 – 19	8 – 10
Брикетти, гранули з деревини	1,4	0,13	17 – 22	6 – 8
Тріски дерев, тирса	2,2	—	11 – 13	38 – 46
Мазут	1,6	1,18	42	—
Паливо моторне	1,0	0,19	43	—
Кам'яне вугілля	12 – 36	1,1 – 3,1	14 – 26	—
Природний газ	—	—	36 – 40	—

Таким чином, згідно з таблицею 1.4. паливо на основі соломи є гарною альтернативою викопним видам палива. Україна є аграрною країною і має значний потенціал рослинної біомаси на основі соломи зернових. Проте, солома пшениці відпоститься до низькосортних видів палива через складність її газифікації. Наукові розробки в напрямку газифікації соломи свідчать про необхідність проведення ряду експериментальних робіт з визначення шляхів підвищення ефективності цього процесу та виробництва високоякісного газу без вмісту смол та механічних домішок з теплоотоємністю згорання понад 10 МДж/м³.

Отже, дослідження в напрямку підвищення ефективності технологічного процесу виробництва синтез-газу з соломи зернових шляхом обґрунтування параметрів та режимів роботи газогенератора є актуальними та своєчасними.

1.2. Аналіз конструкцій камер та дослідження впливу режиму дуття повітрям на ефективність виробництва синтез-газу

Основним вузлом газогенератора є камера газифікації. Саме в цьому вузлі мають місце базові хімічні реакції генераторного процесу. Тому розробці та оптимізації конструкції камери газифікації світова наука приділяє основну увагу.

Наукові розробки щодо термодинамічних процесів виробництва генераторного газу та кінетики цього процесу (дифузія газів; дослідження хімічних реакцій, встановлення періодичності та швидкості їх протікання; вивчення залежності констант рівноваги реакцій від змін тиску та об'єму в зоні основних хімічних реакцій; вивчення залежності рівноваги реакцій від змін температури) представлено в працях [11, 17, 18].

В роботах [19, 21] представлено залежність температурних умов роботи газогенератора, хімічного складу виробленого газу та його теплотворної здатності від методу підведення в реакційну зону газів дуття (периферійний – за допомогою фурм; центральний – повітря чи газу дуття подаються через сопло; комбінований – використовуються і сопло і фурми). Також в роботі [21] представлено залежність параметрів основних вузлів газогенератора від фізико-хімічних властивостей палива та яким чином на практиці можна отримати висококалорійний газ адаптацією режиму дуття до характеристик палива.

Дослідження руху окремих струменів потоку повітря, які надходять в камеру газифікації через фурмовий пояс, тобто аеродинамічні процеси, наведено в [1]. Для біомаси на зразок соломи пшениці величиною, яка описує гідродинаміку руху газу в шарі палива, є коефіцієнт опору:

$$\rho_{ш.г.} = \lambda_{ш.г.} \cdot h_{ш.г.} \cdot P_{газ} \cdot v_{\phi}^2 \cdot d_c^{-1}, \quad (1.1)$$

$$Re_{\phi} = v_{\phi} \cdot d_c / \nu, \quad (1.2)$$

В роботі [10] розкривається поняття здатності струменю газу дуття зберігати задану швидкість на деякій відстані x від устя фурми. Тобто яку максимальну відстань x може пройти струмінь газу в шарі палива з соломи пшениці, якщо він виходить з фурми діаметром d_{ϕ} .

$$v_{\phi} / v_0 = 8,26 (x / d_{\phi})^{-1,37}, \quad (1.3)$$

Вираз (1.3) має місце за умови $x/d > 12$.

За [20] швидкість основної частини потоку повітря (газу) за умови, що потік є симетричним відносно осі становить:

$$\frac{V_x}{V_0} = \frac{0,95}{\mu x r_\phi^{-1} + 0,31} \quad (1.4)$$

Початкова швидкість газів дуття V_0 на виході з фурми [20]:

$$V_0 = Q_{V_{нов}} \cdot (\gamma \cdot \pi \cdot r_\phi^2 \cdot n)^{-1}, \quad (1.5)$$

Залежність реальної швидкості газу (повітря) на виході з фурми з врахуванням теорії турбулентного джерела:

$$V_0 = (2 \cdot P_d \cdot \rho_{нов}^{-1})^{1/2}, \quad (1.6)$$

Зміною геометричних параметрів дуттьового отвору (фурми) досягається зміна радіальних характеристик потоку газу (повітря) фурменої зони. А саме, зміною кута нахилу і довжини осі фурменої зони можна досягти такої її геометрії, яка найкраще наситить киснем шар соломи пшениці зберігши при цьому сталими гідравлічні показники і струменю і шару. Від швидкості газоповітряного дуття, яке надходить в реакційну зону з фурм, залежить величина

опору шару соломи його проходженню струменями газу (повітря). Регламентований діапазон значень швидкості газів дуття складає 14–20 м/с [23] і формує структуру газової (повітряної) решітки реакційної зони газогенератора.

Витрати газів дуття (повітря) $Q_{V_{нов}}$ при їх заданій початковій швидкості в перерізі фурми V_0 , м³/год:

$$Q_{V_{нов}} = \gamma F_\phi \cdot V_0, \quad (1.7)$$

За [26] витрати повітря на забезпечення процесу виробництва газу в шарі соломи пшениці в активній зоні камери газифікації становитимуть, м³/кг:

$$v_{нов} = (v_c \cdot N_2^z - 0,8 \cdot N_p^z) / 0,79, \quad (1.8)$$

Вмістом азоту в соломі нехтують через його малий вміст. Перемножимо ліву і праву частини рівняння (1.8) на витрати соломи установкою за годину L_c . Отже, в правій частині рівняння матимемо годинні витрати газу ($v_c \cdot L_c$), а в лівій – годинні надходження повітря в установку ($v_{нов} \cdot L_c$). Математичний вираз набуде вигляду [26]:

$$\Pi_{V_{нов}} = 1,27 \Pi_{V_{г.з.}} \cdot N_2^z, \quad (1.9)$$

Для здійснення потрібних конструктивних розрахунків установки з виробництва горючого синтез-газу базовим вихідним параметром є продуктивність за газом ($\Pi_{V_{22}}$) [29].

Виходячи з математичної залежності (1.9) витрати соломи за годину L_c складатимуть, кг/год [3, 29]:

$$L_c = \Pi_{V_{22}} / \nu_c \quad (1.10)$$

Щоб забезпечити якісне протікання реакцій процесу відновлення в шарі соломи в виробництва горючого синтез-газу без механічних домішок і смоли потрібно дотримуватися необхідного об'єму камери та висоти активної зони в

ній [24, 53]. За [53] висота активної зони камери газифікації складається з двох зон – окислення і відновлення, та чинить суттєвий вплив на процес виробництва горючого газу. За умов порушення висоти активної зони та при порушенні

пропорційності між зонами окислення і відновлення зростає виробництво CO_2 за рахунок зменшення горючого компоненту газу CO . Отже, для визначення площі

перерізу фурменого поясу напишемо рівняння, м^2 [57]:

$$F_{\text{ф.п.}} = L_c \cdot Q_{\text{HTЗ}}^{\text{соломи}} \cdot B \quad (1.11)$$

За формулою Голуба Г.А. [46]:

$$Q_{\text{HTЗ}}^{\text{соломи}} = 339C^P - 25W^P - 109(O^P - S^P) + 1030H^P \quad (1.12)$$

За [36] нижча теплота згоряння соломи складає, кДж/кг:

$$Q_{\text{HTЗ}}^{\text{соломи}} = 16,3 - 0,19W^P \quad (1.13)$$

Діаметр фурменого поясу камери [26]:

$$D_{\text{ф.п.}} = 1,13 \sqrt{F_{\text{к}}} \quad (1.14)$$

Діаметр горловини камери [50]:

Фурми в фурменому поясі розташовують таким чином, щоб температура в горловині камери газифікації була $1150^\circ\text{C} - 1450^\circ\text{C}$.

Напишемо рівняння для визначення віддалі від фурменого поясу до горловини [60]:

$$h_{\text{горл}} = (0,4 \dots 0,44) D_{\text{ф.п.}} \quad (1.15)$$

Висота реакційного шару соломи:

$$H_{\text{реак.зона}} = h_{\text{прям.кон.}} + h_{\text{горл}} = 0,7 \cdot D_{\text{ф.п.}} \quad (1.16)$$

Формула (1.16) є наближеною, проте враховує хімічні реакції, які мають місце в активній зоні камери газифікації. Уточнені розрахунки виконують за редукційною теорією [61]. Проте виконання згаданих розрахунків потребує складних експериментальних робіт, які передбачають встановлення часу контакту двоокису вуглецю з поверхнею соломи у зоні відновлення. При умові, що час контакту двоокису вуглецю з поверхнею соломи залежить від розмірів активної зони та об'єму синтез-газу, який споживається відповідним теплотехнічним обладнанням за секунду, то складність розрахунків лежить в площині встановлення потреби в зазначеному об'ємі газу за секунду у верхній та нижній частинах шару соломи активної зони, що відрізняється завдяки зміні об'єму окису вуглецю через хімічну реакцію $C + CO_2 = 2CO$. На межі зон окислення і відновлення сумарне значення молів двоокису вуглецю дорівнює значенню молів первинних газів дуття, а в інших шарах соломи збільшується величина компонентів виробленого горючого синтез-газу завдяки процесам відновлення. Під час протікання процесів відновлення концентрація двоокису вуглецю постійно змінюється, приймаючи нові значення.

Об'єм зони відновлення можна визначити знаючи час контакту поверхні розпеченого шару соломи з продуктами повного згорання соломи. Значення вказаного показника дозволяє, виходячи з геометрії камери, встановити оптимальну висоту активного шару соломи.

Визначимо висоту прямого конуса газифікаційної камери, м:

$$h_{\text{прям.кон.}} = 0,8 \cdot D_{\text{ф.п.}} - h_{\text{горл.}} \quad (1.17)$$

Відстань від основи прямого конуса газифікаційної камери до колосникової решітки приймають рівним понад 60 мм.

За [62] подача повітря через фурми, радіально розташовані в один або кілька рядів в фурмовому поясі камери газифікації (периферійний спосіб) створює в площині надходження дуття повітряну решітку. Таким чином повітря пронизуючи шар соломи, насичує його киснем. При цьому покращуються умови протікання хімічних реакцій в реакційній зоні камери. Бажано, щоб фурми були

на $1/3$ заглиблені в шар соломи. Це переносить зону горіння на певну відстань від стінок камери, збільшуючи її термін служби. Кількість фурм становить, шт:

$$n = 3,14 \cdot D_{ф.н.} / l_1, \quad (1.18)$$

Крок встановлення фурм бажано приймати $0,07 - 0,16$ м.

Розрахуємо значення діаметра фурм [48]:

$$d_{ф} = 19 \cdot (\Pi V_{прв} / n \xi \omega)^{1/2}, \quad (1.19)$$

Бункер також є важливим елементом конструкції газогенератора. Саме його параметри дозволяють розрахувати запас соломи на виробництво синтез-газу, інтервали між завантаженнями, скільки часу солома перебуватиме в зонах сушіння та піролізу до моменту надходження в зону окислення, а також площу поверхні охолодження самої газифікаційної установки.

Визначимо об'єм бункера V_b , м³ [38, 48]:

$$V_{бунк} = \tau_1 \cdot L_c / \rho, \quad (1.20)$$

Отримане значення V_b збільшують на $25 - 30\%$ щоб уникнути явища повного вигорання соломи до фурмового поясу.

Інтервали між завантаженнями бункера газогенератора становлять менше $1,5 - 3$ год. (періодичне надходження палива). Таким чином розміри бункера газогенератора повинні, як забезпечувати потрібну для газифікації кількість соломи, так і не перевищувати допустимі габарити. Зайва солома в бункері не встигає висохнути і піддатися процесу піролізу. Вказане є наслідком погіршення температурного режиму в зоні окислення.

Як правило, нижня частина бункера газогенератора має вигляд конуса, який приварюють до камери газифікації. Конусна геометрія забезпечує усунення негативного явища зависання соломи та сприяє рівномірному сходженню соломи в зону горіння. За [12, 28] центральний кут перехідного конуса становить $85 - 115^\circ$, а кут сходження соломи твірною – $40 \dots 60^\circ$.

Залежно від значення насипної щільності золи розраховуємо об'єм зольника, м³:

$$V_z = A \cdot L_c \cdot \tau_z / 100 \cdot \rho_{золи}, \quad (1.21)$$

Висота зольника також має істотний вплив на роботу газогенератора. Якщо висота зольника є недостатньою, тоді зростає опір в установці і погіршується виробництво горючого синтез-газу. Негативний вплив на виробництво горючого синтез-газу має температура золи понад 600 °С. За таких умов температура синтез-газу у патрубку відбирання газу з установки складає 450 – 500 °С. Така температура є низькою для забезпечення сталого складу синтез-газу, проте сприяє зворотнім реакціям генераторного процесу, таким як окислення CO до CO₂, при тривалому перебуванні синтез-газу в зольнику.

Визначимо оптимальну висоту зольника газогенератора, м:

$$h_{\text{зол}} = 1,27 \cdot V_{\text{зол}} / D_{\text{корп}}^2, \quad (1.25)$$

Численними дослідженнями зарубіжних та вітчизняних науковців встановлено, що суттєвим недоліком газогенераторних установок є малий строк служби камери газифікації [14, 32, 37, 50]. Основними факторами руйнування камер є: висока температура стінок деталей камери, значний перепад температури стінок деталей, нестійкість температури стінок деталей та тривале перебування напружених деталей камери під впливом високих температур. Під дією високих температур зменшується опір матеріалу камери як пластичним деформаціям, так і руйнуванню.

За [37, 49] ефективним методом збільшення строку служби камер є зниження температури стінок камери шляхом застосування оптимального повітряного дуття.

В додатку Б представлено відомі конструкції камер газифікації із обґрунтуванням основних конструкційно-технологічних недоліків та позитивних моментів. Дані аналізу рекомендується застосовувати при конструюванні сучасних зразків камери для газогенераторів, що працюють на соломі пшениці. Окремо представлено камери газифікації, якими оснащені протипотокові газогенератори, як окремий клас теплотехнічного обладнання з виробництва горючого синтез-газу з соломі пшениці.

1.3. Аналіз досліджень впливу додавання пари до дуття повітрям на теплотворну здатність синтез-газу

Виробництво горючих газів з рослинної сировини є перспективною технологією її хіміко-термохімічної конверсії [4, 5–7, 8]. Виробництво горючих газів при атмосферному тиску з повітряним дуттям (атмосферна газифікація повітрям) в установках з суцільним шаром є найпростішим способом виробництва цих газів в значних обсягах, забезпечуючи при цьому відносно невисокі експлуатаційні витрати [33–35]. Даний метод газифікації є відносно вивченою технологією, яка набула широкого застосування не лише в побуті, але й в промислових масштабах, на зразок прямого спалювання виробленого синтез-газу в котлах для виробництва теплової енергії, а у випадку додаткового очищення і охолодження газу – в двигунах внутрішнього згорання для виробництва силової та в електродвигунах для виробництва електричної енергії.

Під час газифікації соломи пшениці застосування повітряного дуття призводить до високого вмісту азоту у виробленому синтез-газі і, як наслідок, маємо газ низької теплотворної здатності близько $5,6,5 \text{ МДж/нм}^3$ (нм^3 – нормальний метр кубічний газу, тобто виміряний за нормальних умов – при тиску 760 мм. рт. ст, температурі 20°C) [4, 30]. З метою підвищення теплотворної здатності виробленого синтез-газу з пшеничної соломи до $10..12,5 \text{ МДж/нм}^3$ ефективним технологічним прийомом є використання водяної пари [15, 21, 22, 31, 44]. Це, з одного боку, дозволить регулювати та забезпечувати стабільний температурний режим в камері газифікації і запобігти явищу золо-шлакової агломерації, а з іншого – підводити необхідну кількість теплоти для реалізації основних хімічних реакцій процесу виробництва газу з високим вмістом горючих компонентів (H_2 , CO , CH_4) [53]. Проте підготовка водяної пари потребує додаткових капіталовкладень на придбання обладнання з її формування, в той час як масштабування процесу паро-повітряної газифікації має складнощі через забезпечення рівномірного підведення теплоти до реакторів великих розмірів [9, 56].

З метою практичної реалізації способу паро-повітряної газифікації розроблено два технологічні прийоми [2, 13].

Перший полягає у застосуванні кисню (або повітря, збагаченого киснем) і пари. Цей прийом, проте, потребує значних інвестицій з метою вилучення з повітря кисню та подачі його в робочу зону установки, що робить комерційне застосування запропонованого технологічного прийому менш привабливим. Інший технологічний прийом передбачає уникнення використання кисню шляхом поділу процесів активної зони, таких як окислення та відновлення на дві паралельні зони. В одну зону подається пара, а в іншу – повітря. Передача теплоти з зони окислення до зони відновлення реалізується шляхом циркуляції пароповітряної суміші через шар біомаси обох зон. Декілька пілотних проєктів газогенераторних установок працюють з використанням цього технологічного прийому. Однак капітальні вкладення на ці проєкти є досить високими, а успішна реалізація цього прийому все ще остаточно невизначена [53, 55].

Існує низка досліджень, спрямованих на виробництво синтез-газу із біомаси із використанням повітряного дуття. Також опубліковано значну кількість робіт присвячених газифікації соломи пшениці з використанням чистої пари та паро-кисневих сумішей з різним відсотковим вмістом пари та кисню [45, 47–51]. Попри це, існує відносно небагато робіт, присвячених пароповітряній газифікації біомаси загалом і, зокрема виробництву газу з соломи пшениці [1, 14, 16]. Відомі наукові дослідження спрямовані на виробництво горючого синтез-газу із середніми значеннями вищої теплоти згорання ($6...8$ МДЖ/м³) або синтез-газу із підвищеним вмістом водню (H_2). Хоча існують певні розбіжності щодо доцільності використання пари, проте її вплив при різних технологічних режимах на ефективність процесу виробництва синтез-газу станом на сьогодні є достатньо вивченим: вища теплота згорання горючого газу і вміст молекулярного водню у газоподібному продукті є вищими порівняно з повітряною атмосферною газифікацією. Крім того, підтверджено високу ступінь розкладання смол і складних вуглеводнів, що додатково можна посилити використанням високого температурного режиму ($1250...1500^\circ C$) або каталізатора [1, 36].

Узагальненою характеристикою наукових робіт в галузі хіміко-термічної конверсії є використання невеликих установок з киплячим чи псевдозрідженим шаром з безпосереднім підведенням теплоти в камеру виробництва горючого синтез-газу шляхом застосування електричного нагрівача та/або з попередньо нагрітою підготовленою до введення в камеру пароповітряною сумішшю. Тому жодна з представлених науковій спільноті робіт щодо дослідження пароповітряної газифікації не передбачала зміни умов роботи зазначеного теплотехнічного обладнання під час автотермічної роботи. Деякі дослідження розглядали автотермічний метод газифікації повітрям [20, 37], проте незначні розміри використаних лабораторних установок робили неможливим проведення адабатичних випробувань.

В роботі [49] відмітили, що перетворення вуглецю (C) палива на окис вуглецю (CO) у виробленому горючому синтез-газі зросло майже на 25%, оскільки співвідношення витрат пари ($H_2O \uparrow$) та вуглецю палива зросло з 0,6 до 0,72 кг/кг в газифікаційній установці з автотермічною схемою роботи. Проте, понад 18% від загального споживання енергії процесу оцінено як втрати через невеликі розміри установки та незадовільну ізоляцію бункера.

Автори праці [47] теоретично вивчили вплив різних режимів роботи газифікаційної установки шляхом використання констант рівноваги. Однак, застосування констант рівноваги до опису процесу утворення горючих компонентів в синтез-газі за умов його виробництва в установці з киплячим шаром є сумнівним, що підтверджено на прикладі реальних умов експлуатації такої установки.

Деякі автори досліджень [26, 50, 60, 62] наголошують на важливості проведення випробування на установках пілотних проектів з метою визначення яким чином зразок установки покаже себе в умовах, наближених до виробничих. На сьогодні більшість установок пілотних проектів передбачали алотермічне підведення теплоти, при цьому відношення повітря до біомаси та пари до біомаси змінювалося незалежним чином. Недоліком є те, що введення теплоти до газифікаційної камери шляхом використання електричних нагрівачів не є ані технічно, ані економічно реалізованим, якщо мова йде про

масштабування установки до рівня комерційних проектів. Отже, більша частина отриманих результатів від застосування паро-повітряної газифікації біомаси може бути використана за досить вузьким призначенням – або для покращення умов експлуатації протипотокових газогенераторів, або в умовах реалізації парокисневого дуття. Також при автотермічному способі газифікації в установках промислового масштабу найкращі умови, досягнуті під час лабораторних досліджень, можуть бути не досягнуті через іншу залежність між вхідними змінними (температура, тиск, режим дуття, загальний об'єм біомаси).

Також в представлених в науковій літературі дослідженнях [31, 37, 48–51] відсутня інформація щодо підвищення ефективності процесу газифікації в результаті введення в зону окислення низькоякісної пари (умови близькі до насичення, низький тиск тощо) при автотермічних умовах газифікації біомаси в протипотокових газогенераторах за режиму повітряного дуття.

Під час автотермічного процесу газифікації додавання неякісної пари спричиняє зниження температури в активній зоні камери газифікації. Проте ця технологія є перспективною, оскільки наявність пари в незначній кількості може істотно покращити склад виробленого синтез-газу шляхом підсилення реакцій крекінгу складних вуглеводнів та смол, а також реакцій гетерогенної газифікації [63]. Зрозуміло, що температурний режим в газогенераторі повинен бути достатньо високим, щоб сприяти протіканню зазначених процесів.

Магістерська робота містить дослідження щодо впливу паро-повітряного дуття, яке моделює адабатичний характер роботи, що, в свою чергу, є імітацією роботи установки промислового зразка із протипотоковим газогенератором з несуттєвими втратами теплоти через стінки бункера. Крім того, планом експерименту передбачено фіксоване значення температури сформованої паро-повітряної суміші, чого можна досягти шляхом рекуперації енергії виробленого синтез-газу; тобто температура горючого синтез-газу на виході із патрубку бункера газогенератора була вищою за точку роси смоли та важких вуглеводнів.

Метою дослідження є встановлення залежності загальної (упродовж циклу роботи газогенератора) кількості теплоти, отриманої від утилізації виробленого

горючого газу, від порозності шару соломи, об'єму паро-повітряного дуття та коефіцієнту ступеня перекриття звуження камери потоками повітря.

Коефіцієнт ступеня перекриття – це параметр, який свідчить про повноту перекриття звуження камери газифікації потоками повітря.

Завдання магістерської роботи:

– розробити кінематичну схему та удосконалити дослідний зразок газогенераторної установки з газогенератором оберненого процесу виробництва горючого синтез-газу з соломи, оснастив його пристроєм формування та подачі в зону горіння паро-повітряної суміші;

– встановити залежність загальної (упродовж циклу роботи газогенератора) кількості теплоти, отриманої при утилізації виробленого горючого газу, від порозності шару соломи, об'єму паро-повітряного дуття та коефіцієнту ступеня перекриття звуження камери потоками повітря.

НУБІП України

НУБІП України

НУБІП України

НУБІП України

1.4. Висновки до розділу 1

1.4.1. Виконано аналіз сировинної бази виробництва горючого синтез-газу. Встановлено, що в Україні найбільше запасів соломи пшениці, теплотворна здатність якої близька до деревини та кам'яного вугілля. Проте солома пшениці є низькосортним видом палива, яке погано газифікується через здатність утворювати золошлакові агломерати, тому потрібно виконувати попередню її підготовку шляхом виробництва на її основі паливних брикетів чи гранул.

1.4.2. Здійснено аналіз конструктивних параметрів засобів виробництва горючого синтез-газу з соломи пшениці. Встановлено, що найкращим чином для виробництва газу з соломи підходять протипотокові газогенератори. Тому слід обґрунтувати конструкційно-технологічні параметри основного вузла газогенератора зокрема, і конструкції газогенератора в цілому з метою виробництва якісного висококалорійного газу.

1.4.3. Виконано аналіз досліджень впливу фізико-хімічних властивостей біомаси та режиму газо-повітряного дуття на теплотворну здатність синтез-газу. Доведено, що раціонально обраний повітряний режим, адаптований до властивостей біомаси, забезпечує високу ефективність процесу газифікації. Раціональний повітряний режим забезпечується оптимальною конструкцією фурменого поясу камери газифікації.

РОЗДІЛ 2

ТЕОРЕТИЧНЕ ДОСЛІДЖЕННЯ ЕФЕКТИВНОСТІ ПРОЦЕСУ
ВИРОБНИЦТВА СИНТЕЗ-ГАЗУ З СОЛОМИ ПШЕНИЦІ2.1. Теоретичне обґрунтування конструкції камери газифікації
виходячи з режиму газоповітряного дуття

Робоча гіпотеза роботи наступна: можна збільшити сумарну кількість теплоти за рахунок спалювання горючого газу, виробленого з соломки пшениці, в дещо більшій кількості, проте з меншим значенням теплотворної здатності. Теплотворна здатність горючого синтез-газу може незначним чином зменшитися за умови збільшення об'єму повітря, що надходить в газогенератор, в межах на 10...20% більших від встановленого нормативного значення 30...46 м³/год при продуктивності газогенератора за синтез-газом 60...70 м³/год.

Згідно теорії турбулентного джерела [53], швидкість центральної частини дуттьового потоку становитиме:

$$V_x = \frac{0,95V_0}{2\mu x d_\phi^{-1} + 0,31} = \frac{0,95d_\phi \cdot V_0}{2\mu x + 0,31d_\phi}, \quad (2.1)$$

За умови $V_0 = const$ якщо зменшувати діаметр фурми d_ϕ , то знаменник виразу (2.1) буде збільшуватися, а швидкість V_x , навпаки, буде спадати. Таким чином дальність биття дуттьового потоку буде більшою при зміні діаметру дуттьового отвору (фурми) в більшу сторону. Якщо розрахунки вести з врахуванням аеродинаміки дуття, то в реакційну зону газогенератора краще підводити повітря через меншу кількість дуттьових отворів з більшим діаметром.

Також існує певне значення швидкості V_x , при перевищенні якого рух струменів дуття в напрямку осі абсцис x прямує до нуля (зупиняється). На фізичному рівні буде спостерігатися сповільнення дуттьових потоків при наближенні до центру камери газифікації. Отже $V_x \ll V_0$ та $V_x \ll V_0$.

На виході з дуттьового отвору швидкість V_0 становитиме [20]:

$$V_0 = 4V_{\text{нас}} \cdot (\gamma \cdot \pi \cdot d_{\phi}^2 \cdot n)^{-1} = 5,19 \cdot V_{\text{газ}} \cdot N_2^e \cdot (\gamma \cdot \pi \cdot d_{\phi}^2 \cdot n)^{-1}, \quad (2.2)$$

Розрахуємо швидкість центральної частини повітряного потоку врахувавши рівняння (2.2):

$$V_x = 1,57 \cdot V_{\text{газ}} \cdot N_2^e \cdot [\gamma \cdot n \cdot d_{\phi} \cdot (0,31 \cdot d_{\phi} + 2 \cdot x \cdot \gamma)]^{-1}. \quad (2.3)$$

Потоки повітря, залежно від тиску і швидкості дуття, можуть перекриватися в вузькій частині камери газифікації (горловині) в той чи інший ступінь. Для зразка розглянемо наступні схеми перекриття активної зони газифікації потоків повітря на межі зон окислення і відновлення (в горловині) при кількості дуттьових отворів $n=8$, оснащених фурмами (рис. 2.1).

На межі зон окислення і відновлення (рис. 2.1) мають місце три випадки перетину дуттьових потоків: одноразове покриття (перша зона), дворазове покриття дуттьовими потоками і більше (третя зона); відсутнє жодне покриття дуттьовими потоками (друга зона), що пояснюється низькою швидкістю реакцій відновлення через порушення температурного режиму в активній зоні камери.

Таким чином, погіршення якості синтез-газу пояснюється, з одного боку, профіцитом або дефіцитом в соломі-пшениці вуглецю, а з іншого боку – на якість газу чинить вплив інтенсивне надмірне перемішування газових потоків з дуттьовими через інтенсифікацію режиму дуття. Для вибору оптимального газо-дуттьового режиму слід розробити таку схему перекриття потоками повітря зони на межі зон окислення і відновлення, за якої матимемо при встановленій продуктивності установки за горючим газом найвищу теплотворну здатність останнього. Отже, на якість протікання основних реакцій процесу газифікації чинить вплив лише співвідношення радіусу зони встановлення дуттьових отворів до діаметру звуження на межі зон окислення і відновлення. Геометричні розміри двох останніх параметрів значення не мають.

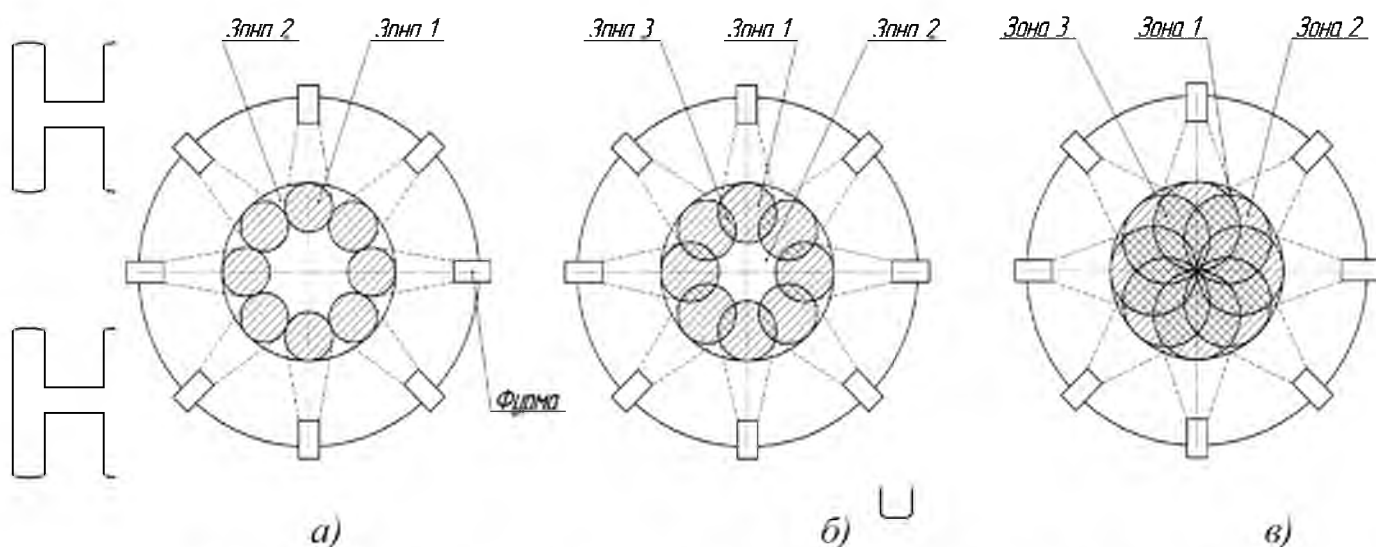


Рис. 2.1. Схема перетину потоків повітря на межі зон окислення і відновлення (горловина реакційної камери) при кількості дугтьових отворів $n=8$ і значенні середнього радіусу потоку повітря $r(r)$: а) перекриття потоків повітря на межі зон окислення і відновлення при $(0,5 \cdot d_z / r_{max}) = 2,2$; б) перекриття потоків повітря на межі зон окислення і відновлення при $(0,5 \cdot d_z / r_{max}) = 2,8$; в) перекриття потоків повітря на межі зон окислення і відновлення при $(0,5 \cdot d_z / r_{max}) = 3,4$.

Для кількості дугтьових отворів $n=8-12$ розраховували питому площу перетину потоків повітря для можливості порівнювати якість протікання процесу виробництва газу за різних умов. Для визначення питомої площі перекриття потоків повітря застосували коефіцієнт якості ξ . Цей коефіцієнт для третьої зони становив $\xi=0,6$, для зони II – $\xi=0,2$, а для зони I – $\xi=1$. За результатами досліджень побудовано графічні залежності (рис. 2.2).

З графічної залежності (рис. 2.2) випливає, що при деяких значеннях відношення радіусу розширення потоку повітря на межі зони окислення і відновлення r_{max} та діаметром звуження камери d_z (горловини) будуть створені умови найбільш сприятливі для інтенсивного протікання процесу виробництва горючого синтез-газу. Таким чином, при $n=12$ (кількість дугтьових отворів) найкращі умови для виробництва синтез-газу мають місце при $0,5 \cdot d_z / r_{max} = 3,4$ ($\xi=71\%$). При $n=8$ (кількість дугтьових отворів) найкращі умови мають місце при $0,5 \cdot d_z / r_{max} = 2,8$ (при цьому $\xi \approx 80\%$).

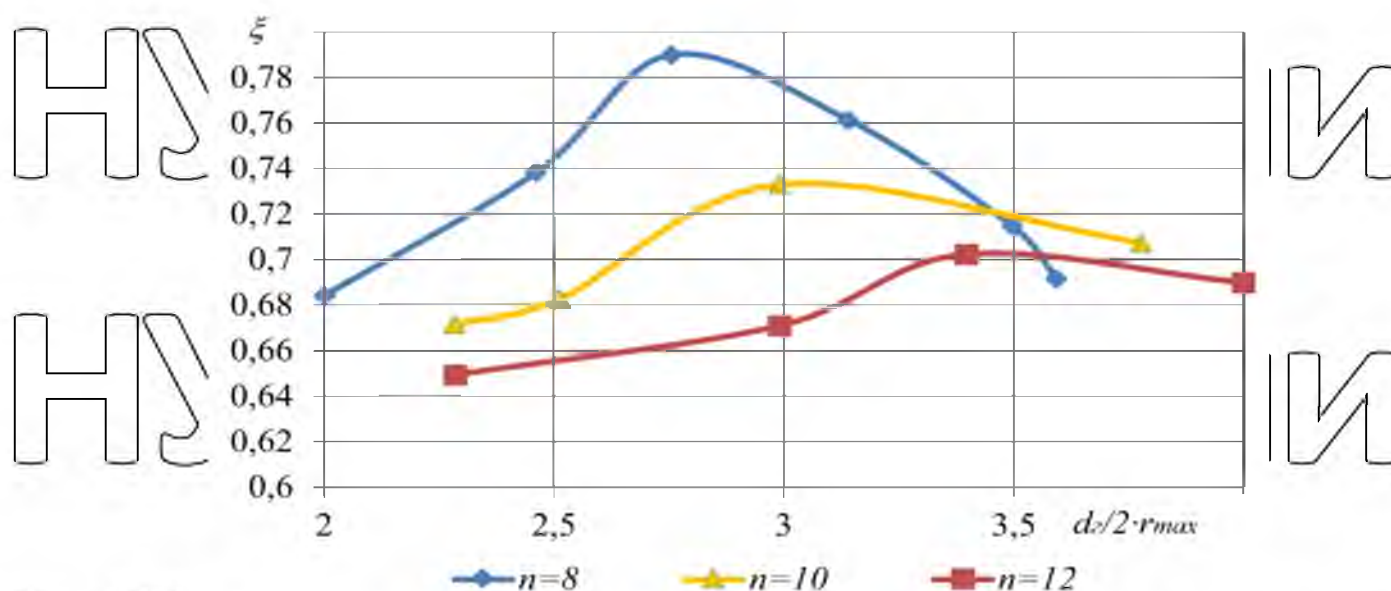


Рис. 2.2. Вплив співвідношення $(0,5 \cdot d_2 / r_{max})$ та кількості дугтових отворів n оснащених фурмами, на значення параметра ξ

Висновок наступний: кращим буде встановити у фурмовому поясі камери меншу кількість дугтових отворів, проте мати змогу змінювати шлях руху потоків повітря в реакційній зоні камери виробництва горючого синтез-газу. Обґрунтовані за зазначеною методикою відношення числових даних $(0,5 \cdot d_2 / r_{max})$ записані в таблиці 2.1.

Таблиця 2.1

Залежність шляху, пройденого потоками повітря, вздовж осі абсцис x від кількості дугтових отворів та радіусу розширення потоку повітря на межі зон окислення і відновлення реакційної зони камери

№	Радіус розширення потоку повітря в площині на межі зон окислення і відновлення r_{max} , м	Кількість дугтових отворів n , шт.	Коефіцієнт ступеня перекриття потоками повітря площини на межі зон окислення і відновлення ξ
III	$r_{max} = 0,147 \cdot d_2$	12	0,64...0,7
II	$r_{max} = 0,167 \cdot d_2$	10	0,68...0,75
I	$r_{max} = 0,182 \cdot d_2$	8	0,7...0,8

2.2. Складання матеріального та теплового балансів процесу виробництва синтез-газу з соломи

Вихідними даними для складання матеріально-теплового балансу були елементний склад палива та хімічний склад виробленого синтез-газу.

Питомий вихід виробленого сухого газу з 1 кг соломи пшениці визначався за вуглецевим балансом [53]. Елементний склад 1 кг робочої маси соломи пшениці виразимо з рівняння:

$$C^{вол} + W^{вол} + O^{вол} + N^{вол} + H^{вол} + A^{вол} = m_{солома}^{вол} \quad (2.4)$$

Із загальної кількості вуглецю ($C^{вол}$), що міститься в одному кілограмі соломи пшениці лише частина переходить в горючий газ:

$$C_{синтез-газ} = C^{вол} - C_{смоли} \quad (2.5)$$

$$C_{смоли} = m_{смоли} \cdot a_{смоли}; \quad C_C = m_C \cdot C^C \quad (2.6)$$

Один стандартний кубічний метр сухого синтез-газу містить наступну кількість вуглецю:

$$C_{синтез-газ} = 0,54(CO_2 + CO + \sum m C_m H_n) \quad (2.7)$$

де 0,54 – відношення молекулярної маси C до об'єму 1 кг·моль синтез-газу при нормальних умовах виробництва горючого газу.

Поділивши значення вмісту вуглецю в соломі пшениці, який перейшов у синтез-газ, на вміст вуглецю в стандартному кубометрі газу отримаємо кількість сухого синтез-газу з кілограма робочої маси соломи пшениці [53]:

$$V_{синтез-газ} = 1,94(CO_2 + CO + \sum m C_m H_n) \cdot (C^C - C_{смоли}) \quad (2.8)$$

Густина сухого синтез-газу за нормальних умов залежить від його хімічного складу та визначається за формулою [60]:

$$\rho_{синтез-газ} = 1,27CO + 2,01CO_2 + 0,1H_2 + 2,72C_4H_{10} + 2,04C_3H_8 + 1,88C_3H_6 + 1,294C_2H_6 + 1,14C_2H_2 + 1,3C_2H_4 + 0,7CH_4 + 1,26N_2 \quad (2.9)$$

де N_2 , $C_m H_n$, CO_2 , CH_4 , H_2 , CO – вміст вказаних газів у сухому синтез-газі (об'ємні частки); відповідні коефіцієнти визначають густину вказаних газів при нормальних умовах процесу виробництва горючого газу ($0^\circ C$ і 760 мм. рт. ст.).

Вміст води в газі визначається за балансом водню. У процесі хіміко-термічної конверсії водень надходить разом з соломом. Отже, кількість пари у виробленому синтез-газі складається з тієї частини, що входить до складу соломи та пірогенетичної води, яка утворюється з водню, який міститься в структурі соломи, за різницею вмісту водню в смолі та газах. Вага води в 1 м^3 газу:

$$d_{\text{синтез-газ}}^{\text{вод}} = \frac{(9H^{\text{вод}} + W^{\text{вод}} - 0,9m_{\text{солома}} \cdot h_{\text{солома}} - 0,81[H_2 + \sum nC_m H_n / 2])}{V_{\text{синтез-газ}}} \quad (2.10)$$

де 0,81 – вміст води при 0°C та 760 мм рт. ст., $\text{кг}/\text{м}^3$.

Загальний об'єм вологого газу, що виробляється з кілограму робочої маси соломи, складається з об'єму сухого газу та об'єму пари [60]:

$$d_{\text{синтез-газ}}^{\text{вод}} = V_{\text{синтез-газ}} + 2,5 \cdot d_{\text{синтез-газ}} \quad (2.11)$$

Об'єм повітря, необхідного для газифікації кілограма соломи визначається з матеріального балансу азоту, який переходить з повітря у вироблений синтез-газ (азотом палива нехтують через незначну кількість).

Враховуючи, що вміст азоту в повітрі становить 79% за об'ємом, а частка азоту в синтез-газі складає N_2 , тоді для виробництва кубометру синтез-газу потрібно $1,27 \cdot \text{N}_2$, яке надходить з повітря. Отже, для виробництва кубометру синтез-газу з робочої маси соломи потрібно в газогенератор подати наступну кількість повітря:

$$V_{\text{повітря}} = 1,27 \cdot \text{N}_2 \cdot V_{\text{синтез-газ}} \quad (2.12)$$

З метою перевірки правильності визначення параметрів процесу виробництва синтез-газу з соломи складено матеріальний та тепловий баланси.

Закон збереження маси говорить, що маса речовин, які були витрачені на виробництво синтез-газу, дорівнює масі речовин, отриманих в результаті процесу газифікації соломи. Рівняння матеріального балансу в перерахунку на кілограм робочої маси соломи:

$$m_{\text{солома}}^{\text{вод}} + m_{\text{повітря}} + m_{\text{вода}} = m_{\text{синтез-газ}} + m_{\text{вода}} + m_{\text{C}} + m_{\text{солома}}, \quad (2.13)$$

де $m_{\text{синтез-газ}} = V_{\text{синтез-газ}} \cdot \rho_{\text{синтез-газ}}$, кг ; $m_{\text{C}} = 0,02 \cdot m_{\text{солома}}^{\text{вод}}$, кг ; $m_{\text{повітря}} = \rho_{\text{повітря}} \cdot V_{\text{повітря}}$, кг .

Методика розрахунку теплового балансу наступна.

Тепловий баланс можна складати як за вищою (ВТЗ), так і за нижчою теплотворною здатністю (НТЗ) виробленого синтез-газу. У нашому випадку ми складатимемо баланс за ВТЗ.

$$Q_I + Q_{II} + Q_{III} + Q_{IV} = Q_V + Q_{VI} + Q_{VII} + Q_{VIII} + Q_{IX} + Q_X, \quad (2.14)$$

Q_I, Q_{II}, Q_{III} та Q_{IV} є прибутковою частиною балансу, а $Q_V, Q_{VI}, Q_{VII}, Q_{VIII}, Q_{IX}, Q_X$ – витратною частиною балансу. Розрахунок кожної з частин наведено нижче.

Потенційна теплота газифікованої соломи Q_I , Дж:

$$Q_I = Q_{ВТЗ}^{соломи} \cdot m_{соломи}^{пот}, \quad (2.15)$$

Фізичне тепло соломи, Дж:

$$Q_{II} = C_{соломи} \cdot m_{соломи}^{пот} \cdot t_{соломи}, \quad (2.16)$$

Теплота сухого повітря, що надходить в газогенератор Q_{III} , Дж:

$$Q_{III} = t_{пов} \cdot C_{пов} \cdot m_{пов}, \quad (2.17)$$

Теплота пари Q_{IV} в пароповітряній суміші, Дж:

$$Q_{IV} = (m_{пар} \cdot d_{пар} + m_{возд}) \cdot i_{пар} \cdot X, \quad (2.18)$$

Витратна частина балансу складається з теплоти вологої пари в синтез-газі ВТЗ сухого синтез-газу, теплотворної здатності коксоподібного залишку соломи, фізичної теплоти синтез-газу, ВТЗ смоли. Решта – невраховані втрати теплоти, втрати тепла в навколишнє середовище та помилки спостережень.

Вища теплотворна здатність синтез-газу Q_V , Дж:

$$Q_V = m_{синтез-газ} \cdot Q_{ВТЗ}^{синтез-газ}, \quad (2.19)$$

Фізичне тепло синтез-газу Q_{VI} , Дж:

$$Q_{VI} = C_{синтез-газ} \cdot m_{синтез-газ}, \quad (2.20)$$

Теплоємність синтез-газу $C_{синтез-газ}$ визначається шляхом врахування теплоємностей кожного з його компонентів, Дж/кг:

$$C_{синтез-газ} = C_{N_2} \cdot \frac{N_2^{об}}{100} + C_{H_2} \cdot \frac{H_2^g}{100} + C_{CO} \cdot \frac{CO^{об}}{100} + C_{CH_4} \cdot \frac{CH_4^{об}}{100} + C_{H_2O} \cdot \frac{H_2O^{об}}{100} + C_{O_2} \cdot \frac{O_2^{об}}{100} + C_{CO_2} \cdot \frac{CO_2^{об}}{100}, \quad (2.21)$$

де $N_2^{газ}$, $H_2^{газ}$, $CO^{газ}$, $CH_4^{газ}$, $C_2H_4^{газ}$, $O_2^{газ}$, $CO_2^{газ}$ – ваговий відсоток зазначених компонентів газу в кілограмі синтез-газу, кг/кг.

Значення теплоємності метану та етилену представлено в [60].

Теплота пари в синтез-газі Q_{VII} , Дж:

$$Q_{VII} = i_{n, \text{пара}} \cdot m_{\text{синтез-газ}} \cdot d_{\text{синтез-газ}}, \quad (2.22)$$

де $i_{n, \text{пара}}$ – теплоємність перегрітої водяної пари, Дж/кг:

$$i_{n, \text{пара}} = (t_{\text{синтез-газ}} - t_{\text{н.р.}}) \cdot c_{\text{пара}} + i_{\text{н.р.}}, \quad (2.23)$$

Вища теплотворна здатність смоли синтез-газу Q_{VIII} , Дж:

$$Q_{VIII} = m_{\text{смола}} \cdot Q_{BTЗ}^{\text{смола}}, \quad (2.24)$$

Вища теплотворна здатність коксопожежного залишку Q_{IX} , Дж:

$$Q_{IX} = m_{\text{к.з.}} \cdot Q_{BTЗ}, \quad (2.25)$$

Теплота Q_X , включає усі втрати та невраховану теплоту і визначається як

різниця між прибутковою і витратною частинами балансу:

$$Q_X = \sum Q_{\text{прибуток}} - \sum Q_{\text{витрати}}, \quad (2.26)$$

ККД процесу виробництва синтез-газу:

$$\eta = C_{\text{синтез-газ}}^C \cdot H \cdot Q_{BTЗ}^{\text{синтез-газ}} / C_{\text{солома}}, \quad (2.27)$$

де H – відношення кількості сухого газу, виробленого шляхом газифікації соломи в стехіометричній кількості повітря, до сухих продуктів згорання:

$C_{\text{синтез-газ}}^C$ – відсоток вуглецю, що переходить у газ, %:

$$H = CO_{2\text{max}} / [C_2H_4 + H_2 + CO + CH_4 + O_2 + CO_2], \quad (2.28)$$

де $CO_{2\text{max}}$ – максимальний вміст CO_2 в сухих продуктах згорання, отриманих від спалювання соломи в теоретичній кількості повітря, %:

H_2 , CO , CH_4 , C_2H_4 , O_2 , CO_2 – вміст вказаних компонентів у синтез-газі, %.

ККД процесу виробництва синтез-газу з соломи можна визначити як:

$$\eta = Q_{BTЗ}^{\text{синтез-газ}} \cdot 100\% / Q_{BTЗ}^{\text{солома}}, \quad (2.29)$$

Методика дозволяє виконати енергетичну оцінку процесу газифікації соломи в протипотоковому газогенераторі та визначити ефективність процесу.

2.3. Висновки за розділом 2

НУБІП України

2.1. Аналітично досліджено залежність кількості теплоти виробленої шляхом прямої утилізації горючого генераторного газу від порозності шару з соломи січки, об'єму повітряного дуття та коефіцієнту перекриття перерізу на межі зон окислення і відновлення потоками повітря.

НУБІП України

2.2. Представлено тепловий та матеріальний баланси, які дозволяють підвищити ефективність процесу виробництва синтез-газу з соломи пшениці.

НУБІП України

НУБІП України

НУБІП України

НУБІП України

НУБІП України

РОЗДІЛ 3

ПРОГРАМА, МЕТОДИКА ТА РЕЗУЛЬТАТИ ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНИХ ДОСЛІДЖЕНЬ

3.1. Матеріали та методика виконання експериментальних досліджень

В якості досліджуваного матеріалу використано подрібнену соломку пшениці. З сировини підготовлено суміш: стебла розщеплені, дрібні які завдовжки $L=10-28$ мм, з товщиною стінок $t=0,16-0,26$ мм; сплюснені стебла – $L=19-39$ мм, $t=0,34-0,5$ мм; циліндричні гладкі стебла – $L=24-41$ мм, $t=0,23-0,36$ мм, зовнішнім діаметром $\varnothing 2,2-4,5$ мм, циліндричні стебла – $L \approx 39$ мм з потовщеннями, $t=0,47-1,3$ мм; дрібні розщеплені стебла – $L \approx 9,5$ мм, $t=0,17$ мм; дріб'язок є меншим за 3,5 %. Вологість соломи, на основі якої створено суміш, становила 11 %.

Склад суміші виражено відсотковим вмістом фракцій: крупної ($L > 34$ мм), середньої ($25 \leq L \leq 34$ мм) та дрібної ($L < 25$ мм). Суміш 1 містить 62 % крупної фракції, 23 % середніх розмірів та 15 % дріб'язку і має $\varepsilon=50$ % (значення порозності). Друга суміш (2) містить 42 % крупної, 43 % середньої фракції та 15 % дріб'язку і має $\varepsilon=42$ % (порозність). Третя суміш (3) містить 23 % крупної фракції, 62 % середньої і 15 % дріб'язку і має $\varepsilon=34$ % (порозність).

Відсоткова місткість соломин пшениці різних розмірів та діаметрів в солом'яній суміші розраховується за теоріями редукції та фільтрації [60], щоб забезпечити протікання усіх хімічних реакцій процесу виробництва горючого синтез-газу із заданою швидкістю та у визначених інтервалах часу. Для шару палива на основі соломи пшениці параметр ε розраховували за [47].

Для виконання досліджень розроблено експериментальну установку з протипотоковим газогенератором, схема якої представлена на рис. 1.

Продуктивність протипотокового газогенератора за газом – 58,70 м³/год. За прототип даної установки обрано конструкцію установки, представлену в [19].

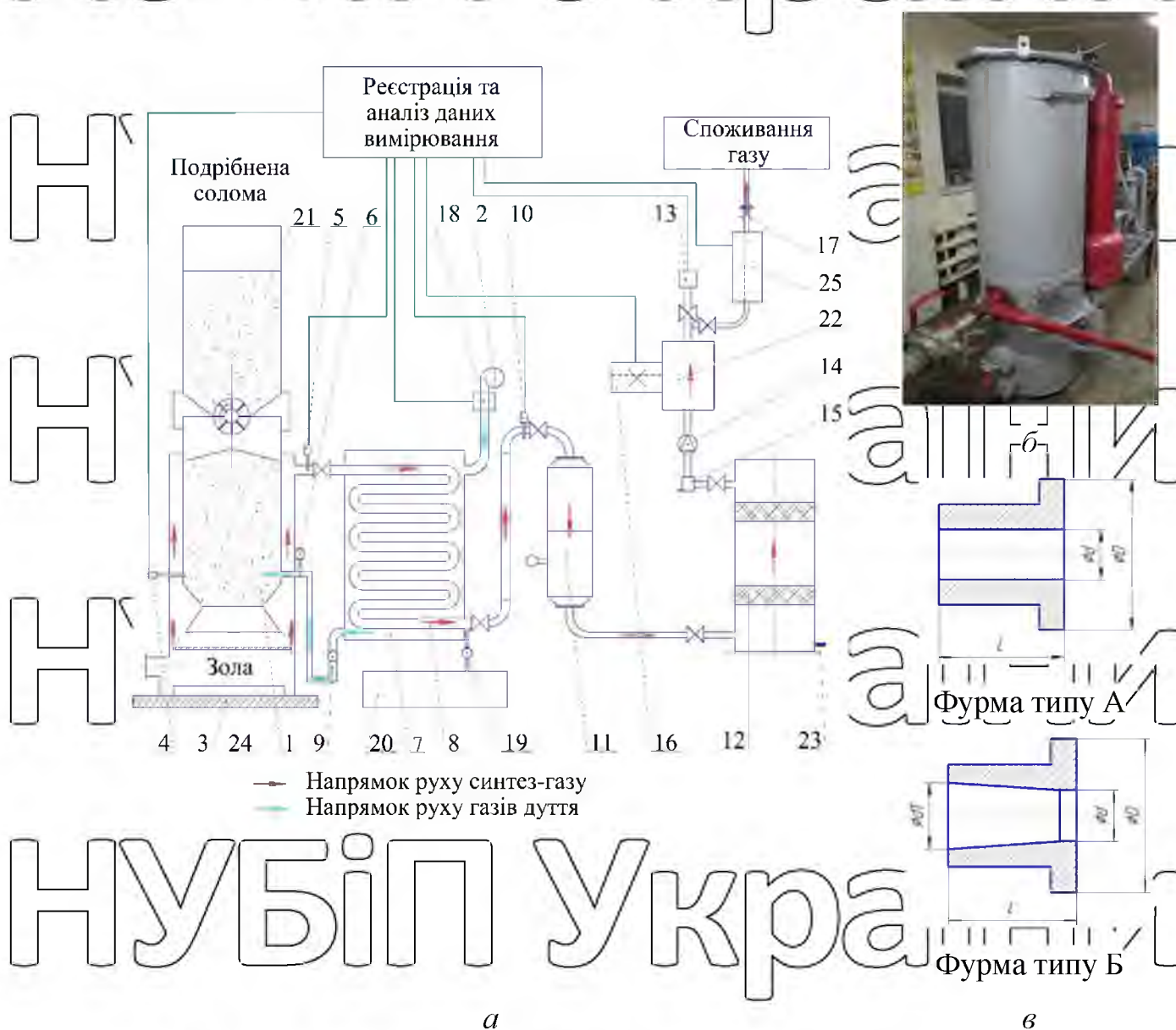


Рис. 3.1 Експериментальна установка з протипотоковим газогенератором: а – структурна схема; б – загальний вигляд протипотокового газогенератора; в – дугтвові створи, оснащені фурмами: 1 – газогенератор оберненого процесу виробництва горючого синтез-газу; 2 – вентилятор; 3 – ваги напільні; 4, 6 – термопари ТВР-251 (вольфрам-ренієві); 5, 10 – термопара хромель-алюмелева; 7 – теплообмінник; 8 – зміювик; 9 – клапан зворотного типу; 11 – фільтр грубого очищення; 12 – електричний фільтр, що працює за принципом коронного розряду; 13 – газовий калориметр; 14 – насос вакуумний; 15 – пристрій для виокремлення

вологи; 16 – патрубок для відбирання проб газу на аналіз; 17 – вентиль дроселюючий; 18 – лічильник; 19 – патрубок; 20 – ємність для конденсату, що осів з гарячого газу; 21 – завантажувальний пристрій для соломи пшениці; 22 – ресивер для накопичення синтез-газу та вирівнювання його хімічного складу; 23 – патрубок для відведення конденсату; 24 – лабораторні ваги; 25 – лічильник газовий роторний.

Згідно рис. 3.1 експериментальна установка містила: вузол виробництва горючого синтез-газу; вузол підготовки та введення в реакційну зону газогенератора пароповітряного дуття; вузол підготовки горючого газу до спалювання; вузол обробки інформації щодо параметрів горючого газу; вузол спалювання газу.

Вузол виробництва горючого синтез-газу складався з газогенератора оберненого процесу, який, в свою чергу, мав корпус, бункер, порожнину між бункером і корпусом, завантажувальний пристрій для соломи пшениці.

Для безперервного визначення витрат соломи пшениці на процес виробництва горючого газу установку розміщено на ваги. Для зважування відходів виробництва (золи) використовувалися лабораторні ваги. Постійне визначення ваги бункера з соломою пшениці забезпечувало контроль за швидкістю згорання соломи, за допомогою чого узгоджувалася подача соломи шнеками через шлюзовий затвор в бункер пристрою з роботою самого газогенератора. Температура в реакційній зоні камери газифікації вимірювалася вольфрам-ренієвими термопарами.

Вузол підготовки та введення в реакційну зону газогенератора пароповітряного дуття. Вентилятор використовувався для подачі в реакційну зону камери газогенератора паро-повітряного дуття. Кількість дуття на виробництво газу залежала від швидкості обертання ротора. До того як спрямувати пароповітряну суміш через дуттьові отвори в активну зону реакційної камери газогенератора її спочатку підігрівали до температури 280...340°C. Суміш нагрівалася в теплообміннику. В якості джерела теплоти слугував вироблений горючий газ, який, проходячи через теплообмінник,

змінював температуру з 550°C на 40°C, тобто охолоджувався. Для визначення температури паро-повітряної суміші застосовувалася термопара 6. Значення температури, в свою чергу, фіксувалося вузлом обробки інформації щодо параметрів горючого газу. Для визначення кількості паро-повітряного дуття, яке надходило в газогенератор на виробництво горючого газу, використовували лічильник. Щоб паро-повітряна суміш не проривалася з реакційної зони газогенератора назад в теплообмінник, на патрубку, який сполучає теплообмінник з трубопроводом газогенератора закріплено клапан зворотний.

Вузол підготовки горючого газу до спалювання. Зазначений вузол містить циклон для грубого очищення газу, електрофільтр, що працює за принципом коронного розряду, для тонкого очищення газу та рідинний охолоджувач. Цей вузол потрібний для нормалізації технологічних параметрів виробленого газу для того, щоб його безпечно спалювати безпосередньо в ДВЗ чи в котлі. Горючий газ пропускали через теплообмінник, оснащений змієвиком. Також теплообмінник містить ємність для накопичення конденсату, який має місце в результаті охолодження газу, та патрубок для його відведення з теплообмінника. Щоб розуміти чи достатньо для ДВЗ вироблений горючий газ охолоджений на виході і вході в теплообмінник встановлено хромель-алюмелеві термопари

Вузол підготовки горючого газу до спалювання містить фільтраційне обладнання для попереднього та остаточного очищення горючого газу від смол та механічних домішок різного фракційного складу. Ступінь та якість очищення синтез-газу контролювалася за допомогою вузла обробки інформації щодо параметрів горючого газу, а відбирання проб газу на контроль здійснювалося патрубком 16. З метою відведення конденсату під час охолодження синтез-газу на трубі встановлено патрубок 23. Щоб остаточно висушити газ від вологи перед його надходженням в ресивер в систему включено пристрій для виокремлення вологи. Ресивер слугує для накопичення синтез-газу та вирівнювання його хімічного складу. Газогенераторна установка також оснащена вакуумним насосом для підвищення дії аеродинамічного опору, спричиненого установками фільтрації. Тривалість експерименту вимірювалася електронним годинником.

Вузол обробки інформації щодо параметрів горючого газу містив роторний газовий лічильник, калориметр та термопари хромель-аномелеві та вольфрам-реневі.

Вузол спалювання газу використовувався для визначення об'єму горючого синтез-газу, який спалювався на пальнику. Оснащення пальника вентилем дроселюючим дозволяло регулювати об'єм газу, який надходив на спалювання.

Відповідно до мети магістерської роботи потрібно встановити залежність кількості теплоти (QV) виробленої шляхом спалювання горючого генераторного газу від порозності шару з соломи січки (ε), об'єму повітряного дуття ($V_{\text{пов}}$) та коефіцієнту ступеня перекриття перерізу камери потоками повітря на межі зон окислення і відновлення (ξ).

Для проведення дослідження використано багатофакторний експеримент за допомогою якого визначено тип і характер зв'язку між залежним (кількістю теплоти) і незалежними факторами (порозність шару, коефіцієнт перекриття і об'єм дуття) за методикою [39, 52, 58].

Сумарні витрати пароповітряної суміші (вологого повітря) на процес виробництва синтез-газу визначали за [53], при цьому враховували номінальну продуктивність газогенератора за газом 58...70 м³/год. Сумарні витрати вологого повітря склали 32...50 м³/год. При здійсненні багатофакторного експерименту обов'язково між рівнями інтервали повинні бути рівними, а сам план передбачає, як правило 3 рівні варіювання. Отже об'єм вологого повітряного дуття ($V_{\text{пов}}$) на виробництво синтез-газу був наступним: 32 м³/год, 41 м³/год та 50 м³/год.

Порозність шару соломи пшениці (ε) змінювалася наступним чином: 34 %, 42 % та 50 %.

Авторами розроблено методику аналітичного розрахунку коефіцієнту ступеня перекриття перерізу камери потоками повітря на межі зон окислення і відновлення (ξ). Обчислення виконувалися за допомогою пакету прикладних програм Statistica 12.0.

Під час обчислення значення (ξ) брали до уваги, що радіус розширення центральної частини потоку повітря, що надходить на дуття, $r(P)$ є змінною величиною.

Щоб у повній мірі виконати дослідження використано п'ятирівневий план другого порядку [58]. Повторюваність дослідів – трикратна. Під час дослідження вивчалась зміна параметру (Q_{tr}) при зміні значень порозності шару соломи (ε), коефіцієнту ступеня перекриття перерізу камери потоками повітря на межі зон окислення і відновлення (ξ) та об'єму вологого повітряного дуття ($V_{нов}$).

Кодування факторів наступне: $X_3 = \varepsilon$, $X_2 = V_{нов}$, $X_1 = \xi$.

Рівні варіації змінних факторів наведені в таблиці 3.1.

Таблиці 3.1

Фактори та рівні їх зміни для визначення кількості теплоти, яку

отримаємо в результаті спалювання виробленого з соломи горючого газу

Рівні варіювання факторів	Об'єм дуття, $V_{нов}$, м ³ /ГОД	Коефіцієнт, ξ	Порозність шару соломи ε , %
Нижній рівень (-)	32	0,7	34
Середній рівень (0)	41	0,75	42
Верхній рівень (+)	50	0,8	50

Першим кроком дослідження (табл. 3.1) було взято солom'яну суміш 2, порозність шару ε якої становила 42 %. Конструкція фурмового поясу газифікаційної камери передбачала наявність восьми дуттьових отворів діаметром 10,6 мм, які оснащені фурмами типу Б. Значення коефіцієнту ступеня перекриття перерізу камери потоками повітря на межі зон окислення і відновлення складало $\xi = 0,8$. Об'єм повітря на виробництво газу $V_{нов} = 50$ м³/год.

Після встановлення змінних факторів визначали кількість виробленого синтез-газу та його вищу теплоту згорання.

Таблиця 3.2

Значення діаметрів дуттьових отворів, оснащених відповідними конструкціями фурм, через які надходить потрібна на процес газифікації кількість вологого повітря

№	План експерименту			Значення факторів експерименту			Діаметр отвору, мм	Тип фурм [15] (рис. 1)
	X_3	X_2	X_1	X_3	X_2	X_1		
1	0	0	0	42	41	0,75	8,7	А
2	-	-	0	34	32	0,75	7,9	Б
3	+	0	0	50	32	0,75	9,3	Б
4	+	0	0	34	50	0,75	9,1	А
5	+	+	0	50	50	0,75	10,6	А
6	0	0	0	42	41	0,75	8,7	А
7	-	0	-	34	41	0,7	9,3	Б
8	+	0	+	50	41	0,7	10	А
9	0	0	+	34	41	0,8	7,9	А
10	+	0	+	50	41	0,8	9,3	А
11	0	0	0	42	41	0,75	8,7	А
12	0	-	+	42	32	0,7	9,1	Б
13	0	+	+	42	50	0,7	10,4	А
14	0	-	+	42	32	0,8	7,5	А
15	0	+	+	42	52	0,8	10,6	Б

Для визначення параметру ($\varphi_{\text{г}}$) годинний цикл роботи газифікаційної установки розбили на інтервали тривалістю чотири хвилини. Тривалість кожного інтервалу вимірювалася таймером електронного годинника. В кінці кожного інтервалу записували покази калориметра та лічильника газу. Сума добутоків часових інтервалів на кількість газу і визначала сумарну кількість теплоти, яку можна отримати від спалювання виробленого горючого газу на пальнику вузла спалювання газу.

Планування включало наступні етапи: кодування факторів, планування, рандомізацію тестів, план реалізації експерименту, перевірку відтворюваності експериментів, розрахунок коефіцієнтів регресії, оцінку значущості коефіцієнтів регресії та адекватності тестової моделі. Дослідження складалося з 15 тестів.

Кількість повторів кожного з дослідів становила три [52].

Відповідно до плану багатфакторного експерименту значення відносної похибки моделі не перевищувало 1,73 %. Це стосується всіх експериментів. Значення середнього відносного відхилення є меншим за 1,2 %. Таким чином

значення відносної похибки становить менше 5 %. Таке значення відносної

похибки вважається прийнятним при моделюванні [38]. Таким чином, можна зробити висновок, що представлена модель з високою точністю прогнозує кількість теплоти (яка може бути отримана від спалювання синтез-газу, який вироблявся упродовж одного годинного циклу роботи газифікатора).

3.2. Результати експериментальних досліджень

3.2.1. Результати експериментальних досліджень впливу порозності шару соломи, об'єму повітряного дуття та коефіцієнту ступеня дуттьового перекриття на кількість теплоти, яку можна отримати при спалюванні виробленого синтез-газу

В результаті експериментальних досліджень і статистичних розрахунків отримано масив даних Q_V , наведений у табл. 3.3.

Значення коефіцієнтів регресії наступні: $b_0=472,636$; $b_1=32,217$; $b_2=69,95$; $b_3=33,219$; $b_{12}=-16,987$; $b_{13}=-12,05$; $b_{23}=35,01$; $b_{111}=-1,998$; $b_{22}=-43,96$; $b_{33}=-76,01$.

Результати дослідження обробляли за допомогою програми "Statistica 10". Однорідність дисперсії перевіряли за критерієм Кохрена.

Оскільки $G_{розр}=0,31 < G_{табл}(0,05; 15; 2)=0,4$ процес є відтворюваним.

Таблиця 3.3

Матриця планування багатofакторного експерименту

№	План експерименту				Результати експерименту					Перевірка адекватності моделі	
	X_0	X_3	X_2	X_1	Q_{T3}	Q_{T2}	Q_{T1}	$Q_{Vcp.}$	$Q_{Vcp.p.}$	$(Q_{Vcp.} - Q_{Vcp.p.})$	$(Q_{Vcp.} - Q_{Vcp.p.})^2$
	1	+	0	0	0	470,5	475,5	471	472,3	471,2	-1,1
2	+	-	-	0	278,5	278	280,5	279,0	280,9	1,9	3,61
3	+	+	-	0	277,5	278	278,5	278,0	276,8	-1,2	1,44
4	+	+	+	0	354,5	355	357	355,5	356,1	0,6	0,36
5	+	+	+	0	489,5	492,5	491	491,0	489,0	-2	4
6	+	0	0	0	471,5	473	470,5	471,7	471,2	-0,5	0,25
7	+	-	0	-	327,5	328	325,5	327,0	319,6	-7,4	54,76
8	+	+	0	-	409	411,5	412,5	411,0	406,3	-4,7	22,09
9	+	+	0	+	394	398	397	396,3	403,0	6,7	44,89
10	+	+	0	+	437,5	438	436,5	437,3	446,2	8,9	79,21
11	+	0	0	0	468	472	469,5	469,8	469,9	0,1	0,01
12	+	0	-	-	300,5	299	298,5	299,3	304,1	4,8	23,04
13	+	0	+	+	474	473,5	475,5	474,3	482,2	7,9	62,41
14	+	0	0	+	408,5	408	412	409,5	401,6	-7,9	62,41
15	+	0	+	+	513,5	512,5	517	514,3	509,4	-4,9	24,01

При визначенні довірчих інтервалів для коефіцієнтів регресії використовували критерій Стюдента, табличне значення якого при 5% рівні значущості та кількості ступенів свободи відтворюваності дисперсії експерименту $f_1=2$ становило $t=4,3$ [38]. Значимість коефіцієнтів регресії перевіряли за встановленими довірчими інтервалами. В результаті рівняння регресії набуло вигляду:

$$Q_V = 472,686 + 32,217 \cdot X_1 + 69,95 \cdot X_2 + 33,219 \cdot X_3 - 16,987 \cdot X_1 \cdot X_2 - 12,05 \cdot X_1 \cdot X_3 + 35,01 \cdot X_2 \cdot X_3 - 1,998 \cdot X_1^2 - 43,96 \cdot X_2^2 - 76,01 \cdot X_3^2, \quad (3.1)$$

де Q_V – кількість теплоти, МДж/год;

X_1 – кодоване значення коефіцієнту ступеня перекриття перерізу камери потоками повітря на межі зон окислення і відновлення;

X_2 – кодоване значення об'єму вологого повітря на процес виробництва газу, м³/год;

X_3 – кодоване значення порозності шару соломи пшениці.

Перевірку адекватності гіпотези отриманому рівнянню регресії виконували за критерієм Фішера. Розрахункове значення вказаного критерію при

дисперсії неадекватності $S^2_{неад}=3,14$ та дисперсії відтворюваності експерименту

$S^2_{в}=3,07$ склало $F_{розр}=8,79$. Табличне значення критерію Фішера, прийняте при

5% рівні значущості, за [38] становить $F_{табл}(0,05; f_1; f_2)=19,38$, де $f_2=8$, а $f_1=2$.

Оскільки, $F_{розр}=8,79 < F_{табл}(0,05; f_1; f_2)=19,38$, то гіпотеза щодо адекватності

рівняння регресії підтверджується. Коефіцієнт детермінації $R^2=0,927$. Остаточне

рівняння регресії матиме вигляд:

$$Q_V = 472,636 + 32,217 \cdot \xi + 69,95 \cdot V_{нов} + 33,219 \cdot \varepsilon - 16,987 \cdot \xi \cdot V_{нов} - 12,05 \cdot \xi \cdot \varepsilon + 35,01 \cdot V_{нов} \cdot \varepsilon - 1,998 \cdot \xi^2 - 43,96 \cdot V_{нов}^2 - 76,01 \cdot \varepsilon^2 \quad (3.2)$$

де Q_V – кількість теплоти, МДж/год;

ξ – коефіцієнту ступеня перекриття перерізу камери потоками повітря на межі зон окислення і відновлення;

$V_{нов}$ – об'єм вологого повітря на процес виробництва газу, м³/год;

ε – порозність шару соломи пшениці, %.

Реалізація даного рівняння у графічному вигляді представлена в додатку В на рис. 1-3.

За додаток В, рис. 1 а при усіх числових значеннях ξ , незалежно від того які значення приймають ($V_{нов}$) та (ε), має місце яскраво виражений максимум

параметру (Q_V). Характер залежності квадратичний. Отже, при $\xi=0,7$, значенні

порозності соломи пшениці $\varepsilon=45,8\%$ щоб отримати найвище значення кількості

теплоти від спалювання горючого газу 504 МДж/год в реакційну зону

газогенератора на процес газифікації слід було підвести 47,9 м³/год повітря.

Виходячи з отриманих результатів, для коефіцієнта $\xi=0,7$ рекомендованим є діапазон об'єму повітряного дуття 45...48 м³/год.

Значення Q_V зростає із збільшенням параметру ε від 34 до 47%. В даному випадку опір шару соломи січки є меншим і потоки повітря легше долають відстань від гирла фурми до середини камери. Збільшується кількість розгалужень гілок шляху, по яким потоки повітря рухаються в шарі соломи пшениці. Зазначене сприяє зростанню радіусу розширення центральної частини потоку повітря в перерізі газифікаційної камери на межі зон окислення і відновлення. За умови $\varepsilon < 47\%$ значення параметру Q_V зменшується. При

відносно великих значеннях ε площа контакту між киснем повітря і частинками соломи зменшується, а також має місце утворення сталих (без розгалужень) шляхів руху потоків повітря в насинному шарі з соломи. При цьому в реакційній зоні камери через високу порозність шару соломи і недостатність кисню температура знижується. Наслідком зазначеного є незадовільні умови протікання основних реакцій процесу та високий вміст у горючому газі CO₂ за рахунок зменшення вмісту окису вуглецю.

За додатком В, рис. 1 б при $\xi=0,75$ максимальна кількість енергії теплової $Q_V=515$ Мдж/год має місце при надходженні пароповітряної суміші у кількості 47,9 м³/год порівняно з додатком В, рис. 1 а. В свою чергу, неоднорідність шару соломи пшениці дорівнює $\varepsilon \approx 47\%$ і практично не змінюється.

Із збільшенням ξ з 0,7 (додаток В, рис. 1 а) до 0,75 (додаток В, рис. 1 б) кількість енергії Q_V зростає, досягаючи 513 Мдж/год при пароповітряному дутті в обсязі 48 м³/год та неоднорідності шару соломи 46,8 %. Ріст кількості енергії свідчить про вищий вміст в генераторному газі горючих компонентів (H₂ та CO). Зокрема вміст в газі окису вуглецю зріс на чотири відсотки, а саме з шістнадцяти до двадцяти відсотків.

На рис. 1 в (додаток В) поверхня відгуку побудована при $\xi=0,8$ (вище значення коефіцієнту ступеня перекриття перерізу газифікаційної камери потоками повітря на межі зон окислення і відновлення). При цьому кількість

пароповітряної суміші, яка забезпечує максимальну кількість енергії 520 Мдж/год, надає до 47 м³/год при ступені неоднорідності шару соломи 46,8 %. Отже, маємо логічні висновки, що вищі значення параметру ξ забезпечують кращі технологічні умови щодо протікання окислювально-відновних реакцій генераторного процесу, відповідно якість, кількість і теплотворна здатність горючого газу покращуються.

Згідно рис. 1а–1в (додаток В) із усіх незалежних змінних найбільший вплив на показник виробленої з газу енергії QV чинить коефіцієнт ξ порівняно з порозністю соломи ϵ та кількістю пароповітряної суміші на дуття $V_{пов}$. Навіть при незначних величинах $V_{пов} \approx 30$ м³/год в діапазоні значень неоднорідності шару соломи $\epsilon = 44,5.. 46,5\%$ із збільшенням ξ кількість виділеної при спалюванні газу енергії зростає. Поверхні, представлені на рис. 2 додатку В, побудовані для значень кількості пароповітряної суміші, які дорівнюють 32, 44 і 50 м³/год відповідно, і відображають залежність зміни кількості енергії від ξ та ϵ . Аналіз рис. 2 додатку В свідчить про існування оптимального діапазону неоднорідності шару соломи, що лежить в межах 44,5.. 46,5%, який характеризується найбільшими значеннями виробленої енергії за будь-яких величин ξ . Також між кількістю енергії, виробленої при спалюванні горючого газу, і параметром ξ існує майже лінійний зв'язок. Зростання одного з параметрів (а саме ξ) є причиною зростання значень іншого – енергії теплової (QV). Таким чином $QV = 304$ Мдж/год при $\epsilon = 44,5.. 46,5\%$ і $\xi = 0,7$. Із зростанням ξ від 0,7 до 0,8 величина енергії становить 402 Мдж/год, тобто зростає на 66 %. При збільшенні кількості повітряного дуття на процес виробництва синтез-газу і зміні ξ від 0,7 до 0,8 прослідковується стале збільшення кількості теплової енергії QV . Проте, коли кількість пароповітряної суміші переходить поріг оптимального діапазону приріс енергії спадає.

За рис. 2 додатку В при $\xi = 0,7$ максимальна величина енергії теплової дорівнює 503 Мдж/год при зміні параметру нерівномірності шару соломи ϵ з 44,5 до 46,5%. Зростання ξ від 0,7 до 0,8 є причиною збільшення кількості виробленої

енергії лише в незначній ступені, лише на чотири відсотки (\approx до 520 Мдж/год). Зазначене говорить про те, що при меншій кількості пароповітряної суміші на дуття параметр ξ чинить вищий вплив, в той час як цей вплив зменшується коли ми збільшуємо кількість $V_{нов}$. Отже при зростанні параметру $V_{нов}$ частинки соломи в шарі палива інтенсивніше перемішуються потоками повітря в перерізі на межі зон окислення і відновлення. Це збільшує площу контакту кисню та H_2O з поверхнею вуглецевмісних частинок соломи пшениці.

На рис. 3 додаток В зображено поверхні відгуку, які відображають вплив кількості пароповітряної суміші на дуття, коефіцієнту ступеня перекриття перерізу камери потоками повітря на межі зон окислення і відновлення на показник кількості теплової енергії $Q_{г}$ при різних ξ . На усіх графіках кількість теплової енергії зростає при зростанні кількості надходжень в реакційну зону газогенератора пароповітряної суміші з 32 до 48 м³/год. Проте збільшення кількості надходжень в реакційну зону газогенератора пароповітряної суміші понад 48 м³/год призводить до зменшення кількості виробленої теплової енергії. При пароповітряному дутті меншому за 44,5 м³/год має місце неповне окислення вуглецю соломи пшениці через брак O_2 . При пароповітряному дутті більшому за 53 м³/год кількість енергії, отриманої від спалювання горючого газу, також зменшується через охолоджувальну дію надлишкової кількості дуття в високотемпературній реакційній зоні камери. Спостерігається винесення C соломи пшениці з горючим газом, який відбирається, наприклад ДВЗ, що створює сприятливі умови до збільшення об'ємного вмісту двоокису вуглецю в генераторному газі через інтенсивне зменшення вмісту такого горючого компонента як окис вуглецю. Отже, як бачимо з рис. 3 додаток В діапазон від 45 до 48 м³/год пароповітряного дуття є найкращим з точки зору ведення процесу газифікації.

Графічні залежності рис. 3 додаток В також свідчать, що із збільшенням коефіцієнту ступеня перекриття перерізу камери потоками повітря на межі зон окислення і відновлення кількість теплової енергії від спалювання горючого газу також зростає. Найбільша величина кількості теплоти 521 Мдж/год відповідає

значенню порозності соломи пшениці 44,5 %, кількості пароповітряної суміші 48 м³/год та коефіцієнту ступеня перекриття перерізу камери потоками повітря на межі зон окислення і відновлення 0,8. Отриманий показник 521 МДж/год є вищим за значення теплової енергії 505 МДж/м³, виробленої в процесі горіння 65 м³ горючого генераторного газу (максимальна кількість) з теплотою згорання 8 МДж/м³.

Оскільки в рамках магістерської роботи ми отримали оптимальні діапазони значень параметрів ε та $V_{нов}$ то, при утилізації синтез-газу на пальнику вузла спалювання газу, величина теплотворної здатності газу не є показовою.

Показовою є величина кількості енергії, яка виділяється під час утилізації газу в котлі, турбіні чи ДВЗ. Найвищі значення теплової енергії в межах 500...522 МДж/год досягнуто при $\varepsilon=44,5...46,5$ %, $V_{нов}=45...48$ м³/год та $\xi=0,8$.

Сучасна наука має на балансі дослідження, спрямовані на створення нових високотехнологічних конструкцій газогенераторних установок та використання різних реагентів-прискорювачів процесу виробництва горючих газів. Ці дослідження передбачають сміливі твердження, виводження яких в життя передбачає технічну складність і високу вартість.

В роботах [2, 45] наведено результати експериментів, схожі за ступенем конструктивної складності до нашого дослідження. В зазначених роботах говориться про вплив кількості повітря на показник теплоти згорання виробленого з деревної біомаси горючого газу в газогенераторі оберненого процесу газифікації. В цьому дослідженні на відміну від нашого має місце інша конструкція реакційної камери та тип біомаси. В праці [2] в якості палива використано міскантус-гігантеус. Вироблений в результаті дворівневої подачі газів дуття горючий газ мав теплоту згорання порядку 6 МДж/м³. Проте порівнювати наші результати ($ВТЗ=8$ МДж/м³) із зазначеними в [2] некоректно через різні види палива. Гіпотезу, подібну до нашої інші науковці також досі не досліджували. Порівняння доцільно виконувати за показниками продуктивності установки за виробленим газом та середнім значенням теплоти згорання синтез-газу.

3.2.2. Результати дослідження процесу газифікації за матеріальним та тепловим балансом

Хімічний склад синтез-газу, визначений за 7 пробами, відібраними з 5-хвилинним інтервалом, становив: C_2H_4 – 0,25%, CH_4 – 2,93%, N_2 – 32,43%, CO_2 – 8,01%, H_2 – 28,48%, CO – 27,9%. Вихід сухого газу з 1 кг соломи склав 2,35 м³/кг. Вміст смол у синтез-газі прийнято згідно з [26], що становить 0,1–1,2 г/м³.

Тепловий баланс протипотокового газогенератора включає все тепло, що надходить до газогенератора та відбирається з нього. Тепло, що надходить до газогенератора, складається з теплотворної здатності палива, його фізичної теплоти та ентальпії повітря та пари, що вводяться в топку та зони відновлення газогенератора. Елементи споживання включають вищу теплоту згоряння сухого синтез-газу та його фізичну теплоту, фізичну теплоту пари в синтез-газі, а також теплотворну здатність смоли, коксоподібного залишку соломи і залишкового компонента. Цей компонент містить усі невраховані втрати теплоти, втрати теплоти в навколишнє середовище та помилки спостережень. Значення матеріального і теплового балансів наведені в табл. 3.4 і 3.5. Аналізуючи дані балансу, побачимо загальну картину енергетичних потоків в газогенераторі.

Таблиця 3.4

Матеріальний баланс процесу газифікації соломи пшениці

Матеріальні надходження		Матеріальні витрати	
1.	Маса водяної пари – 0,25 кг	1.	Маса смоли – 0,0012 кг
2.	Маса повітря на газифікацію – 0,97 кг	2.	Маса конденсату – 0,33 кг
3.	Маса робочого палива – 1 кг	3.	Маса сухого газу – 1,77 кг
	Загалом – 2,22 кг	4.	Маса коксоподібного залишку – 0,06 кг
			Загалом – 2,161 кг
Похибка розрахунку матеріального балансу склала 1,9%			

Матеріальний та тепловий баланси (таблиця 3.4 та таблиця 3.5), складені на основі експериментально визначеного складу синтез-газу, доводять

ефективність використання пароповітряного дуття для газифікації соломовмісних палив та високу достовірність використаного методу.

Таблиця 3.5

Тепловий баланс процесу газифікації

Надходження теплоти		%	кДж/кг
1.	Теплоємність пари на процес газифікації Q_{IV}	0,20	29,0
2.	Теплота сухого повітря, що надходить в газогенератор Q_{III}	0,71	102,0
3.	Фізичне тепло палива Q_{II}	0,36	52,0
4.	Потенційне тепло палива Q_I	98,73	14181,0
Загалом		100,0	14364,0
Витрати теплоти		%	кДж/кг
1.	Теплота згорання коксоподібного залишку Q_{IX}	6,00	854,0
2.	Теплотворна здатність смоли Q_{VIII}	0,20	28,0
3.	Теплота пари в синтез-газі Q_{VII}	0,59	84,0
4.	Фізична теплота газу Q_{VI}	4,09	583,0
5.	Вища теплотворна здатність синтез-газу Q_V	83,08	11836,0
6.	Залишковий компонент	6,04	861,0
Загалом		100,0	14246,0
Похибка розрахунку теплового балансу склала 0,9%			

Похибка розрахунку матеріального балансу склала 1,9%. Похибка розрахунку теплового балансу склала 0,9%.

Також аналіз компонентів теплового балансу (табл. 3.5) допомагає визначити непродуктивні тепловтрати, причини їх виникнення та знайти способи їх усунення. Коефіцієнт ефективності процесу газифікації склав 90 %.

Спостерігається високе значення втрат у навколишнє середовище 861 кДж/кг, втрат з коксоподібним залишком 854 кДж/кг і близько 1% загальних втрат з вологою та смолою. За результатами аналізу причин зазначених втрат к.к.д. процесу газифікації можна підвищити до 90%. Напрямами можуть бути

вдосконалення конструкції або оптимізація режимів роботи протипотокового газогенератора. Отримані результати корелюють з даними попередників [29, 60].

3.3. Висновки до розділу 3

3.1. Досліджено залежність кількості теплоти, виділеної від спалювання горючого газу, від порозності шару соломи пшениці, об'єму волого повітря, необхідного на окислювально-відновні реакції газифікаційного процесу, та коефіцієнту ступеня перекриття перерізу газифікаційної камери потоками повітря на межі зон окислення і відновлення. Рациональними є режими виробництва горючого газу (об'єм вологого повітря 47 м³/год, порозність шару з соломи пшениці 47 %, коефіцієнт ступеня перекриття перерізу камери 0,8) за яких від спалювання горючого газу отримано 522 МДж/м³ енергії. Отриманий показник є вищим за значення теплової енергії 505 МДж/м³, виробленої в процесі горіння 65 м³ горючого генераторного газу (максимальна кількість) з тепловою згорання 8 МДж/м³.

3.2. Представлено методику та розрахунки матеріального та теплового балансів пароповітряної газифікації соломи пшениці у протипотоковому газогенераторі. Похибка розрахунку матеріального балансу склала 1,9%. Похибка розрахунку теплового балансу склала 0,9%. Встановлено, що використання пароповітряної суміші в якості газів дуття підвищує к.к.д. процесу газифікації до 90 %, що є кращим за класичні способи виробництва синтез-газу.

ВИСНОВКИ

НУВБІП України

1. Виконано аналіз сировинної бази виробництва горючого синтез-газу.

Встановлено, що в Україні найбільше запасів соломи пшениці, теплотворна здатність якої близька до деревини та кам'яного вугілля. Проте солома пшениці є низькосортним видом палива, яке погано газифікується через здатність утворювати золошлакові агломерати, тому потрібно виконувати попередню її підготовку шляхом виробництва на її основі паливних брикетів чи гранул.

НУВБІП України

2. Здійснено аналіз конструктивних параметрів засобів виробництва горючого синтез-газу з соломи пшениці. Встановлено, що найкращим чином для виробництва газу з соломи підходять протипотокові газогенератори. Тому слід обґрунтувати конструкційно-технологічні параметри основного вузла газогенератора зокрема, і конструкції газогенератора в цілому з метою виробництва якісного висококалорійного газу.

НУВБІП України

3. Виконано аналіз досліджень впливу фізико-хімічних властивостей біомаси та режиму газо-повітряного дуття на теплотворну здатність синтез-газу.

Доведено, що раціонально обраний повітряний режим, адаптований до властивостей біомаси, забезпечує високу ефективність процесу газифікації. Раціональний повітряний режим забезпечується оптимальною конструкцією фурменного поясу камери газифікації.

НУВБІП України

НУВБІП України

4. Аналітично досліджено залежність кількості теплоти виробленої шляхом прямої утилізації горючого генераторного газу від порозності шару з соломи січки, об'єму паро-повітряного дуття та коефіцієнту перекриття перерізу на межі зон окислення і відновлення потоками повітря.

НУВБІП України

5. Досліджено залежність кількості теплоти, виділеної від спалювання горючого газу, від порозності шару соломи пшениці, об'єму волого повітря, необхідного на окислювально-відновні реакції газифікаційного процесу, та коефіцієнту ступеня перекриття перерізу газифікаційної камери на межі зон окислення і відновлення потоками повітря. Раціональними є режими

НУВБІП України

виробництва горючого газу (об'єм вологого повітря 47 м³/год, порозність шару з соломи пшениці 47 %, коефіцієнт ступеня перекриття перерізу камери 0,8) за яких від спалювання горючого газу отримано 522 МДж/м³ енергії. Отриманий показник є вищим за значення теплової енергії 505 МДж/м³, виробленої в процесі горіння 65 м³ горючого генераторного газу (максимальна кількість) з теплотою згорання 8 МДж/м³.

6. Представлено методику та розрахунки матеріального та теплового балансів пароповітряної газифікації соломи пшениці у протипотоковому газогенераторі. Похибка розрахунку матеріального балансу склала 1,9%.

Похибка розрахунку теплового балансу склала 0,9%. Встановлено, що використання пароповітряної суміші в якості газів дуття підвищує к.к.д. процесу газифікації до 90 %, що є кращим за класичні способи виробництва синтез-газу.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

НУБІП України

1. Acharya, B., Dutta, A., Basu, P. (2010). An investigation into steam gasification of biomass for hydrogen enriched gas production in presence of CaO. *International Journal of Hydrogen Energy*, 35 (4), 1582–1589. <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2009.11.109>

НУБІП України

2. Molino, A., Chianese, S., & Musmarra, D. (2016). Biomass gasification technology: The state of the art overview. *Journal of Energy Chemistry*, 25(1), 10–25.

НУБІП України

3. Chhiti, Y., Kemha M. (2013). Thermal Conversion of Biomass, Pyrolysis and Gasification: A Review. *The International Journal of Engineering And Science*, 2 (3) 75–85.

НУБІП України

4. De Sousa L.C., Hütter P., Mayor J. C. etc. Fluidized Bed Reactor for the Gasification of Biomass: Annual Report. General Energy Technology, Paul Scherrer Institut, 1994, Annex V, 129 p.

НУБІП України

5. Ruiz, J. A., Juárez, M. C., Morales, M. P., Muñoz, P., & Mendivil, M. A. (2013). Biomass gasification for electricity generation: Review of current technology barriers. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 18, 174–183.

НУБІП України

6. Fahren, H. (2014). Numerical Simulation of Combustion and Gasification of Biomass Particles, Sweden: Lund University.

НУБІП України

7. Frandsen R.B., Montgomery M., Larsen O. H. Field test corrosion experiences when co-firing straw and coal: 10-year status within Elsam. *Materials at High Temperatures*, 24(4), 2007, pp. 343-349. Available at: <http://dx.doi.org/10.3184/096034007X278365>

НУБІП України

8. García F., Pizarro, C., Lavín, A.G., Bueno, J.L. (2017). Biomass sources for thermal conversion. Techno-economical overview. *Fuel*, 195, 182–189. <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2017.01.063>

НУБІП України

9. Herman, A. P., Yusup, S., Shanbaz, M., & Patrick, D. O. (2016). Bottom Ash Characterization and its Catalytic Potential in Biomass Gasification. *Procedia Engineering*, 148, 432–436. doi:10.1016/j.proeng.2016.06.447

10. Sutton, D., Kelleher, B., & Ross, J. R. H. (2001). Review of literature on catalysts for biomass gasification. *Fuel Processing Technology*, 73(3), 155–173. doi:10.1016/S0378-3820(01)00208-9

11. Zhang, W., Wu, Y., Huang, Sh., Wei, X., Li, X., Wu, Sh. (2022). Comparative study on the effects of wood dust and rice husk on wheat straw gasification process: Ash fusion characteristics and gasification reactivity. *Fuel*, 326, 124942. <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2022.124942>

12. González, J. F., Román, S., Bragado, D., Calderón, M. (2008). Investigation on the reactions influencing biomass air and air/steam gasification for hydrogen production. *Fuel Processing Technology*, 89(8), 764–772. <https://doi.org/10.1016/j.fuproc.2008.01.011>

13. Gronk, M.G., Melaeen, M.C. (2010). Mathematical model for wood pyrolysis – comparison of experimental measurements with model predictions. *Energy & Fuels*, 4 (14), 791–800. <https://doi.org/10.1021/ef990176q>

14. Li, S., Song, H., Hu, J. etc. (2021). CO₂ gasification of straw biomass and its correlation with the feedstock characteristics. *Fuel*, 297, 120780. doi:10.1016/j.fuel.2021.120780

15. Irum, Q., Khan, S.A., UPPAL, A.A., Krivodonova, L. (2020). Galerkin Finite Element Based Modelling of One Dimensional Packed Bed Reactor for Underground Coal Gasification (UCG) Process. *IEEE Access*, 8, 223130–223139. <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2020.3044194>

16. Wang, C., Li, L., Chen, Y., Ge, Z., & Jin, H. (2021). Supercritical water gasification of wheat straw: Composition of reaction products and kinetic study. *Energy*, 227, 120449. doi:10.1016/j.energy.2021.120449

17. Jenkins, R.G. (2020). Thermal gasification of biomass – a primer. In *Bioenergy (2nd ed.): Biomass to biofuels and waste to energy* (pp. 293-324). New York: Academic Press. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-815497-7.00015-4>

18. A review of the primary measures for tar elimination in biomass gasification processes. (2003). *Fuel and Energy Abstracts*, 44(4), 220. doi:10.1016/S0140-6701(03)82860-6

19. Ai, N., Chen, L., Fu, Yu. (2022). A novel analysis on pyrolysis and gasification process of rice straw feedstock. *Sustainable Energy Technologies and Assessments*, 54, 101866. <https://doi.org/10.1016/j.seta.2021.101866>

20. Rasmussen, N. B. K., & Aryal, N. (2019). Syngas production using straw pellet gasification in fluidized bed allothermal reactor under different temperature conditions. *Fuel*, 116, 706. doi:10.1016/j.fuel.2019.116706

21. Biagini, E., Barontini, F., & Tognotti, L. (2014) Gasification of agricultural residues in a demonstrative plant: Corn cobs. *Bioresource Technology*, 173, 110–116. doi:10.1016/j.biortech.2014.09.0

22. Masmoudi, M.A., Sahraoui, M., Halouani, K. (2017). Modelling and simulation of heat and mass transfer during biomass gasification in a packed bed downdraft reactor. *International Journal of Energy, Environment and Economics*, 25 (3), 207–223.

23. Liu, X., Hu, J., Zhao, Sh., Wang, W., Zhang, Q., Yan, X. (2022). Chemical looping co-gasification of wheat straw and lignite with calcium-enhanced iron-based oxygen carrier for syngas production. *Fuel Processing Technology*, 227, 107108.

24. Mazaheri, N., Akbarzadeh, A.H., Madadian, E., Lefsrud, M. (2019). Systematic review of research guidelines for numerical simulation of biomass gasification for bioenergy production. *Energy Conversion and Management*, 183, 671–688. <https://doi.org/doi:10.1016/j.enconman.2018.12.097>

25. Galindo, A. L., Lora, E. S., Andrade, F. V., Giraldo, S. Y., Jaén, R. L., & Cobas, V. M. (2014). Biomass gasification in a downdraft gasifier with a two-stage air supply: Effect of operating conditions on gas quality. *Biomass and Bioenergy*, 61, 236–244. doi:10.1016/j.biombioe.2013.12.017

26. Korberg, A. D., Mathiesen, B. V., Clausen, L. R., & Skov, I. R. (2021). The role of biomass gasification in low-carbon energy and transport systems. *Smart Energy*, 1, 100006. doi:10.1016/j.segy.2021.100006

27. Milne T. A. Biomass Gasifier ‘Tars’: Their Nature, Formation, Destruction, and Tolerance Limits in Energy Conversion Devices. T. A. Milne, R. J. Evans, N. Abatzoglou // Proceedings of the 3rd Biomass Conference of the Americas,

August 24 – 29 1997 year / edited by R. P. Overend and E. Chornet. – Canada, 1997.

Vol. 1. – P. 729 – 738.

28. Mullenburg, M., Shi, Y., Ratner, Al. (2011). Computational Modelling of the Combustion and Gasification Zones in a Downdraft Gasifier. Proceedings of the ASME 2011 International Mechanical Engineering Congress & Exposition IMECE2011 (November 11–17, 2011), 4, 151–158.

<https://doi.org/10.1115/imece2011-64009>

29. Ngamsidhipongsas, N., Ponpesh, P., Shotipruk, A., & Arpornwichanop, A. (2020). Analysis of the Imbert downdraft gasifier using a species-transport CFD model including tar-cracking reactions. *Energy Conversion and Management*, 213, 112808. doi:10.1016/j.enconman.2020.112808

30. Puig-Gamero, M., Pio, D.T., Tarelho, J.A.C., Sánchez, P., Sanchez-Silva, L. (2021). Simulation of biomass gasification in bubbling fluidized bed reactor using aspen plus. *Energy Conversion and Management*, 235, 113981. <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2021.113981>

31. Arthur, C. J., Munir, M. T., Young, B. R., & Yu, W. (2014). Process simulation of the transport gasifier. *Fuel*, 115, 479–489.

32. Rensfelt E. Practical Achievements in Biomass Gasification / E. Rensfelt

// *Bioenergy* 84 / edited by H. Egnéus and A. Ellegard. – London: Elsevier Applied Science, 1985. – Vol. 1. – P. 174.

33. Karaca, M., Kaya, D., Yozgatligil, A., & Gökalp, I. (2021). Modelling and numerical simulations of lignite char gasification with CO₂: The effect of gasification parameters on internal transport phenomena. *Fuel*, 285, 119067.

34. Zagorščak, R., An, N., Palange, R., Green, M., Krishnan, M., & Thomas, H. R. (2019). Underground coal gasification – A numerical approach to study the formation of syngas and its reactive transport in the surrounding strata. *Fuel*, 253, 349–360. doi:10.1016/j.fuel.2019.04.164

35. Sutar, K. B., Kohli, S., Ravi, M.R. (2022). Clean cooking with downdraft biomass gasifier cook-stove: Effect of gasifier performance. *Energy*, 125631. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2022.125631>

36. Pandey, Bh., Sheth, P. N., Prajapatia, Y. K. (2022). Air- CO_2 and oxygen-enriched air- CO_2 biomass gasification in an autothermal downdraft gasifier: Experimental studies. *Energy Conversion and Management*, 270, 116216. <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2022.116216>

37. Tsyvenkova, N., Kukharets, S., Kukharets, V., & Savchenko, N. (2020). Experimental study of influence of tuyere belt design on thermal conditions of gasification chamber operation. *Engineering for Rural Development*, 19, 1248–1254. <https://doi.org/10.22616/ERDev2020.19.TF302>

38. Stahlberg P. Gasification of Waste Fuels. Pyrolysis and Gasification. London : Elsevier, 2012. P. 617 – 623.

39. Статистична обробка експериментальних даних: навч. посіб. / Ярёмчук В.С., Куценко Ю.В., Малярчук В.М., Смік О.В. К.: НАУ, 2019. 412 с.

40. Wurzenberger, J.C., Wallner, S., Raupenstrauch, H., Khinast, J.G. (2002). Thermal conversion of biomass: Comprehensive reactor and particle modelling. *AIChE Journal*, 48 (10), 2398–2411. <https://doi.org/10.1002/aic.690481029>

41. Белосельский Б. С. Низкосортные энергетические топлива: особенности подготовки и сжигания / Б. С. Белосельский, В. И. Барышев. – М. : Энергоиздат, 1989. – 132 с.

42. Sameeroddin, M., Deshmukh, M. K. G., Viswa, G., & Saffar, M. A. (2021). Renewable energy: Fuel from biomass, production of ethanol from various sustainable sources by fermentation process. *Materials Today: Proceedings*. doi:10.1016/j.matpr.2021.01.746

43. Nwosu, U., Wang, A., Palma, B., Zhao, H., Khan, M. A., Kibria, M., & Hu, J. (2021). Selective biomass photo-reforming for valuable chemicals and fuels: A critical review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 148, 111266. doi:10.1016/j.rser.2021.111266

44. Wang, M., Wan, Y., Guo, Q., Bai, Y., Yu, G., Liu, Y., ... Wei, J. (2021). Brief review on petroleum coke and biomass/coal co-gasification: Syngas production, reactivity characteristics, and synergy behavior. *Fuel*, 304, 121517. doi:10.1016/j.fuel.2021.121517

45. 98/02021. Gas generator for continuous production of a combustible gas. (1998). Fuel and Energy Abstracts, 39(3), 184. doi:10.1016/s0140-6701(98)80215-7

46. Maksimuk, Y., Antonava, Z., Krouk, V., Korsakova, A., & Kursevich, V. (2021). Prediction of higher heating value (HHV) based on the structural composition for biomass. Fuel, 299, 120860. doi:10.1016/j.fuel.2021.120860

47. Zhu, P., Wu, Z., Yao, J., Guo, L., Yan, H., Nyamsi, S. N., ... Zhang, Z. (2021). Multi-physics field modelling of biomass gasification syngas fueled solid oxide fuel cell. Journal of Power Sources, 512, 230470. doi:10.1016/j.jpowsour.2021.23047

48. Колеров Л. К. Щодо питання розрахунку камери газифікації для дрібнозернистого рослинного палива. Праці ЦНДІ. Москва: Магіз, 1952. 48 с.

49. Лейбзон З. І. Температурні умови роботи і збільшення терміну служби камер газифікації транспортних газогенераторів. Москва: НАМІ, 1961. 49 с. (вид. російською).

50. Мезін і. С. Дослідження впливу діаметра і висоти камери газифікації на хімічний склад генераторного газу. Праці наук. експерим. і проект. ін-ту автотранспорт. промисловості. 1941. Вип. 40. (вид. російською).

51. Wang, L., Du, X., Chen, J., & Wu, Z. (2021). Numerical study on characteristics of biomass oxygen enriched gasification in the new gasifier on an experimental basis. Renewable Energy, 170, 815–827. doi:10.1016/j.renene.2021.07.098

52. Мельников С.В., Ацелкін В.Р., Роштин П.М. Планування експерименту в дослідженнях сільськогосподарських процесів. Л: Колос, 1980, 168 с. (вид. російською).

53. Механіко-технологічне обґрунтування газифікаційних систем для виробництва синтез-газу : монографія / Голуб Г.А., Шивенкова Н.М., Чуба В.В. та ін. Київ : НУБіП України, 2021. 339 с.

54. Мироненко В. (2011). Методика раціонального вибору обладнання для виробництва біопалив / В. Мироненко, В. Поліщук, Г. Захарків. Наук. вісник Нац. університету біоресурсів і природокористування України. Київ. № 166. Ч. 2. С. 148 – 152.

55. Мігудін Н. Н. Методи досліджувати роботу і розраховувати тепловий баланс газогенератора. Х. ; К. : ОНТБ У, 1932. 46 с.

56. Awais, M., Omar, M. M., Munir, A., Ali, W., Ajmal, M., Hussain, S., ... Ali, A. (2022). Co-gasification of different biomass feedstock in a pilot-scale (24 kWt) downdraft gasifier: An experimental approach. *Energy*, 238, 121821. doi:10.1016/j.energy.2021.121821

57. Patil, K., Bhoi, P., Huhnke, R., & Bellmer, D. (2011). Biomass downdraft gasifier with internal cyclonic combustion chamber: Design, construction, and experimental results. *Bioresource Technology*, 102(10), 6286–6290. doi:10.1016/j.biortech.2011.03.03

58. Підручник дослідника: навч. посіб. для студ. агротех. спец. / О. Васильковський, С. Лещенко, К. Васильковська, Д. Петренко. Кіровоград, 2016. 204 с.

59. Довідник споживача біопалива / Віллу Варес, Юло Касик, Пеэтер Муйсте [та ін.]. Таллінн : Талліннський технічний університет, 2005. 183 с.

60. Токарев Г. Г. Газогенераторні автомобілі. М. : Машгіз, 1955. 207 с.

61. Шелудько І. М. Силові газогенераторні установки на торфї. К. ; Л. : Держтехвидавництво України, 1947. 132 с. (вид. російською).

62. Газогенераторні трактори. Теорія, конструкція і розрахунок : наук. вид. / М. Г. Юдушкін, М. Д. Артамонов. М. : ГОСНТІМЛ, 1955. 244 с. (вид. російською).

63. Galindo, A. L., Lora, E. S., Andrade, R. V., Giraldo, S. Y., Jaén, R. L., & Cobas, V. M. (2014). Biomass gasification in a downdraft gasifier with a two-stage air supply: Effect of operating conditions on gas quality. *Biomass and Bioenergy*, 61, 236–244. doi:10.1016/j.biombioe.2013.12.017

НУБІП України