



УДК 628.492

SELECTION AND SUBSTANTIATION OF ENERGY-TECHNOLOGICAL SCHEME OF PLANT BIOMASS THERMOCHEMICAL CONVERSION ВИБІР І ОБГРУНТУВАННЯ ЕНЕРГОТЕХНОЛОГІЧНОЇ СХЕМИ ТЕРМОХІМІЧНОЇ КОНВЕРСІЇ РОСЛИННОЇ БІОМАСИ

Sklyarenko E.V. / Скляренко Є.В.

Ph.d. / к.т.н.

ORCID : 0000-0003-3952-6520

Vorobiov L.Y. / Воробйов Л.Й

d.s., s.s. / д.т.н., с.н.с.

ORCID : 0000-0001-7958-6996

SPIN: 6154-2069

*Institute of Engineering Thermophysics of NAS of Ukraine, 2a, M. Kapnist Str., Kyiv
Інститут технічної теплофізики НАН України, Київ, вул. М. Капніст, 2а, Київ*

Анотація. В статті розглянуто перспективи енергетичного використання рослинної біомаси і шляхи підвищення енергетичної ефективності її використання. Проведено вибір та обґрунтування енерготехнологічної схеми процесу її попередньої термохімічної конверсії (переробки). Суть даного технологічного процесу полягає в тому, що конверсія рослинної біомаси здійснюється у режимі "теплого удару" при допомозі високотемпературного газового теплоносія у вигляді продуктів неповного згоряння вуглеводневого газу, що фільтрується через затиснутий рухомий шар біомаси. Це дозволяє за короткий час перевести значну частину органіки в газову фазу, зменшити вихід смол і закінчити процес на стадії відгонки летких та утворення біовуглецю. Розглянуто переваги і недоліки запропонованого технологічного процесу, а також основні фактори, що впливають на його ефективність. Зокрема, розглянуто питання впливу гідромеханічних характеристик затиснутого шару (товщина шару, його порозність, дійсна швидкість фільтрації газового теплоносія через шар біомаси) і визначено їх оптимальні параметри.

Ключові слова: фрезерний торф, термохімічна конверсія, гідромеханічні характеристики затиснутого шару біомаси.

Вступ. В умовах дефіциту енергоресурсів і постійного зростання цін, підвищення ефективності використання і їх економія набуває найбільш пріоритетного значення для України.

Режим ефективного використання традиційних викопних палив і виробленої енергії базується на удосконаленні технологічних процесів та впровадженні енергозберігаючих технологій.

Значна економія традиційних палив, а відтак і зменшення шкідливого впливу на довкілля, при їх спалюванні, може бути досягнута при більш широкому включенні в паливний баланс країни нетрадиційних і відновлюваних джерел енергії. Зокрема, використання місцевих видів твердого палива (бурого вугілля, торфу, деревини) та різного виду біомаси.

Привабливість біомаси, особливо біомаси рослинного походження, крім відновлюваності її запасів, обумовлена і іншими перевагами, а саме: наявністю значного енергетичного потенціалу, високим виходом летких сполук, малою зольністю, відсутністю сірки та екологічною чистотою при згорянні. За оцінками [1] біомаса дає понад 2 млрд.т у.п. енергії на рік, що складає близько 14% загального споживання первинних енергоносіїв у світі.



Одним з основних стримуючих факторів широкого використання рослинної біомаси в енергетичних установках, є низькі теплотехнічні характеристики. Переважно, це дрібнофракційна біомаса з високою вологістю, низькою насипною і енергетичною щільністю та високою собівартістю її конверсії в енергетичні продукти.

В світовій практиці відомі різні технології фізичної, біохімічної і термохімічної конверсії рослинної біомаси, які направлені на покращення її теплотехнічних характеристик і отримання енергії, чи цінних продуктів (горючий газ, рідкі і тверді палива, сорбенти і ін.). Їх ефективність визначається техніко-економічними і екологічними показниками.

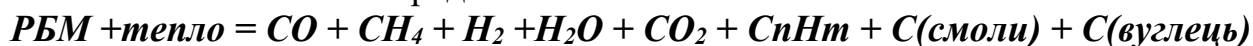
В плані підвищення ефективності використання енергії рослинної біомаси, зменшення шкідливих викидів і зниження собівартості цільових продуктів, перспективними бачаться термохімічні процеси енерготехнологічного спрямування, коли поряд з енергетичними продуктами одержують високоліквідні супутні продукти.

Їх ефективність, у значній мірі, залежить від виду вихідної сировини, технологічних і екологічних параметрів процесу, цільових продуктів, їх якості і собівартості, та від конструктивних особливостей обладнання для реалізації цих процесів. У зв'язку з цим, пошук оптимальних рішень по реалізації таких процесів є актуальним, що вимагає відповідних досліджень.

Основний матеріал. Аналіз світового досвіду показав, що термохімічні процеси конверсії твердих вуглеводневих палив, переважно, базуються на процесах газифікації і піролізу.

Газифікація є термохімічний процес максимального ступеня перетворення енергетичного потенціалу вихідної біомаси у газоподібне паливо з високою теплою згоряння. Процес проходить при високих температурах (до 1300°C) за рахунок теплоти екзотермічних реакцій в окислюючому середовищі, з вільним чи зв'язаним (у вигляді H_2O , CO_2) киснем. Отриманий горючий газ включає, як леткі продукти розкладу (конденсовані і неконденсовані), так і продукти повного згоряння частини вихідної сировини. Останні баластують горючий газ і погіршують його теплотехнічні характеристики.

Деяко підвищити ефективність енергетичного використання рослинної біомаси (РБМ) дозволяють технології, в основі яких лежать процеси піролізу і який схематично можна представити як:



Як видно, в процесі піролізу відбувається розклад органічної частини вихідної біомаси на газоподібні, рідкі і тверді продукти.

Газоподібні продукти є горючим газом з нижчою теплою згоряння до 15...22 МДж/нм³, що суттєво перевищує нижчу теплоту згоряння (5...6 МДж/нм³) горючого газу, отриманого при повітряній газифікації.

Рідкі продукти є суміш високомолекулярних вуглеводнів і води до 20%(мас.). Їх нижча теплота згоряння становить до 20...25 МДж/кг.

Твердим продуктом процесу є коксовий залишок (біовуглець), з нижчою теплою згоряння до 30 МДж/кг. Його середній вихід може досягати 30-35% від маси сухої сировини, в залежності від виду біомаси, температури, тиску і



часу, при яких здійснюється процес.

Піролізні процеси реалізують при більш помірних температурах (500...700°C – напівкоксування, 900...1100°C - коксування), при використанні тепла, як від екзотермічних реакцій (взаємодії органіки зі зв'язаним киснем), так і додаткового тепла від стороннього джерела енергії.

Перспективність піролізних процесів обумовлена їх універсальністю, щодо можливості конверсії різних видів рослинної біомаси, широкого спектру отримуваних продуктів, з низькими експлуатаційними і капітальними витратами, що дозволяє адаптувати існуючі енергетичні установки до їх прямого застосування з використанням альтернативного палива.

Ефективність піролізних процесів, в значній мірі, залежить від:

- фізичних властивостей рослинної біомаси (типу біомаси, її елементарного і фракційного складу, початкової вологості і зольності, насипної та дійсної питомої ваги, схильності до подрібнення і ін.);
- технологічних параметрів (температури, тиску, теплотехнічних характеристик теплоносія, способу та швидкості підведення його теплоти, а також часу перебування біомаси в реакційній зоні);
- конструктивних особливостей (теплообмінних поверхонь апарату, геометричних розмірів шару біомаси, характеристик живильника та ін.).

Більшість відомих піролізних процесів базується на процесах піролізу кускового палива в шарі. В той же час, існує нагальна необхідність в створенні високопродуктивних апаратів, для конверсії дрібно фракційної рослинної біомаси, якій притаманна низька насипна і енергетична щільність та висока вологість.

Одним з основних недоліків піролізного процесу є відносно малий питомий вихід піролізних газів із значною кількістю (до 30%) двоокису вуглецю. В результаті, якщо брати відношення теплоти згоряння цього газу до теплоти згоряння вихідної рослинної біомаси то енергетична ефективність використання її енергії не перевищує 30 %. Деяке підвищення (15-20%) енергетичної ефективності можна досягти за рахунок крекінгу рідкої фази і особливо смол в газ, або ж шляхом використання горючого газу без охолодження і конденсації.

Метою даної роботи є вибір і обґрунтування енерготехнологічного процесу термохімічної конверсії рослинної біомаси, для підвищення енергетичної ефективності її використання.

Проведений нами техніко-економічний аналіз енергетичної ефективності використання рослинної біомаси показав, що цільова конверсія в чисто газове, рідке чи тверде паливо, з точки зору високої собівартості як їх отримання, так і вартості енергетичних продуктів (тепла і електроенергії), є малораціональним.

Зменшити собівартість кінцевих продуктів термохімічної конверсії дрібнофракційної рослинної біомаси при суттєвому підвищенні ефективності її енергетичного використання і отриманні додаткової економічної та екологічної вигоди можливо шляхом розробки енерготехнологічних технологій, які дають можливість поряд з виробництвом енергетичної продукції отримувати супутні високоліквідні продукти. Хоча, ряд авторів [2, 3] взагалі вважали, що



енергетичне використання продуктів піролізу є нераціональним, відводячи їм роль цінної хімічної сировини. Так, при вторинній переробці продуктів піролізу біомаси (особливо смол) можна отримати низку цінних хімічних речовин (наприклад, гідроксиоцтовий альдегід, левоглюкозг'ян, поліфеноли і ін.). Висока цінність цих продуктів, в зрівнянні з вихідним паливом, навіть при їх невеликій концентрації, робить їх отримання надзвичайно вигідним.

На сьогодні, одним з перспективних продуктів піролізу рослинної біомаси є біовуглець (biocoal). Біовуглець - це твердий залишок, утворений загальним вуглецем і мінеральною частиною біомаси. Причому, впродовж нагріву біомаси відбувається, як поступовий розподіл загального вуглецю на нелеткий вуглець, який концентрується в твердому залишку і леткий вуглець, який частково видаляється з газовою фазою, а частково залишається в твердому залишку, так і розподіл енергії вихідної біомаси між продуктами.

Саме їх співвідношення і температура процесу, в значній мірі, визначають ефективність процесу отримання біовуглецю з високими теплотехнічними і споживчими характеристиками.

Зокрема це є:

- висока теплота згоряння (20...30 МДж/кг);
- низький вміст токсичних речовин (сірки і важких металів);
- при згорянні низька емісія NO_x і нейтральність щодо викидів CO₂;
- висока температура плавлення золи (1400°С) запобігає її шлакуванню;
- висока енергетична щільність (особливо при грануляції), що зменшує витрати на транспортування і зберігання;
- висока гідрофобність, що забезпечує довготривале зберігання без зміни характеристик.

Біовуглець може використовуватися, як тверде паливо в побуті, як сировина для технологічних потреб промисловості (металургійної, електровугільної, фармакологічної і ін.), виробництва сорбентів (для очистки води і газів), отримання силового газу та мінерального добрива для підживлення зелених насаджень і т. ін.

Такий процес енерготехнологічного спрямування, де поряд з горючим газом отримують біовуглець, був розроблений в Інституті технічної теплофізики НАН України [4]. Його фізична модель представлена на **рис.1**.

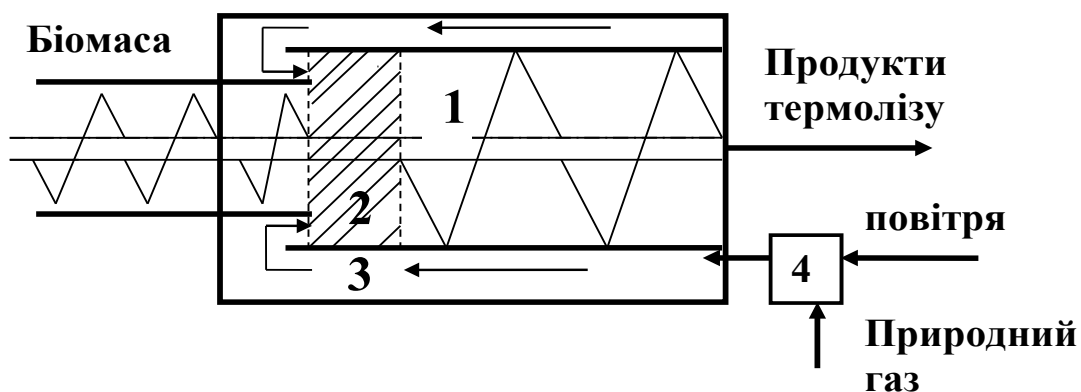
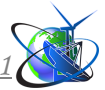


Рис.1 Фізична модель процесу термохімічної конверсії рослинної біомаси
 1- камера піролізу з шнеком; 2- затиснутий шар біомаси; 3- тепла оболонка;
 4- технологічна точка.



Особливість даного технологічного процесу полягає в тому, що піроліз рослинної біомаси здійснюється у режимі "теплого удару", при допомозі високотемпературного газового теплоносія, у вигляді продуктів неповного згоряння вуглеводневого газу, який фільтрується через затиснутий рухомий шар біомаси. Це дозволяє за короткий час перевести значну частину органіки в газову фазу, зменшити вихід смол і закінчити процес на стадії відгонки летких і утворення біовуглецю.

У загальному вигляді це горизонтальний циліндричний термохімічний реактор з шнеком, який забезпечує ущільнення і переміщення рослинної біомаси вздовж камери піролізу (1). Остання має теплову оболонку (3), куди з технологічної топки (4) подається високотемпературний газовий теплоносій, у вигляді продуктів неповного згоряння вуглеводневого газу.

Теплоносій віддає певну кількість теплоти біомасі, через стінку камери піролізу, а потім надходить у камеру піролізу, де фільтрується через затиснутий рухомий шар біомаси (2). Дякуючи розвинутій поверхні пористої насадки біомаси відбувається інтенсивний її розігрів до температури розкладу органічної частини, на леткі речовини і твердий залишок. А внаслідок протікання хімічних реакцій іде подальший розклад летких речовин на більш прості. Ступінь такого перетворення регулюється температурою процесу і часом перебування біомаси у камері піролізу.

Такий процес дозволяє:

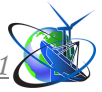
- ✓ піддавати конверсії різні види рослинної біомаси без обмежень по фракційному складу, вологості, зольності чи температурі шлакування;
- ✓ впливати на теплоту згоряння піролізного газу і якість біовуглецю;
- ✓ зменшити кількість смоли в газі, що спрощує систему його очистки.

Особливості процесу дозволяють отримати і додаткові переваги:

- газовий теплоносій, у вигляді продуктів неповного згоряння вуглеводневого газу, забезпечує високу стабільність процесу та характеристик піролізного газу, при зміні вологості біомаси чи технологічного режиму;
- затиснутий шар: запобігає механічному виносу частинок біомаси і дозволяє форсувати швидкість фільтрації теплоносія та інтенсифікувати тепло-масообмінні процеси в реакційній зоні, а також збільшує коефіцієнт заповнення реактора, що підвищує продуктивність установки і зменшує її вагу - габаритні характеристики;
- шнек забезпечує рівномірне переміщення біомаси по довжині реактора, що дозволяє, інтенсифікувати тепло-масообмінні процеси і отримати біовуглець однорідної якості, без обгару і спікань.

Загалом, всі наведені особливості призводять до інтенсифікації процесу і підвищення ефективності термохімічної конверсії рослинної біомаси, що дозволяє створити високопродуктивне і малогабаритне обладнання.

Керувати процесом піролізу, для утворення потрібних кінцевих продуктів можна, змінюючи технологічні параметри процесу (температуру, тиск, швидкість нагріву, час перебування біомаси в реакційній зоні, характеристики теплоносія).



Саме визначення залежностей виходу продуктів піролізу і їх якості, від вище приведених факторів, вимагало проведення комплексу аналітичних і експериментальних робіт.

Як показує аналіз літературних джерел, точний розрахунок складу продуктів термічного розкладу твердих палив, є доволі складною задачею, оскільки ряд кінетичних характеристик, необхідних для розрахунку, або відсутні взагалі, або вивчені недостатньо. При вирішенні ж поставленої задачі, достатньо знати більш прості речі, а саме: яка загальна кількість летких і біовуглецю може виділитись з вихідної сировини, який їх елементарний склад та необхідні технологічні умови процесу.

Розроблена нами математична модель і програма розрахунку, які висвітлені в окремій публікації [5], та проведені раніше експериментальні дослідження [6], були направлені на отримання детальної інформації про ці параметри робочого процесу. Тобто, визначалося розподілення температур твердої фази і газових компонентів та їх вихід по довжині реактора, в залежності від температури процесу, характеристик газового теплоносія, часу перебування біомаси в реакційній зоні, а також від її вихідних фізичних характеристик. Так, наприклад, на **рис.2** приведено картину прогріву шару рослинної біомаси вологістю 30%, газовим теплоносієм, з початковою температурою 1020...1040°C, по довжині реактора (L, м), а на **рис.3** - вихід біовуглецю (1) і летких (2) по довжині реактора при тих же умовах.

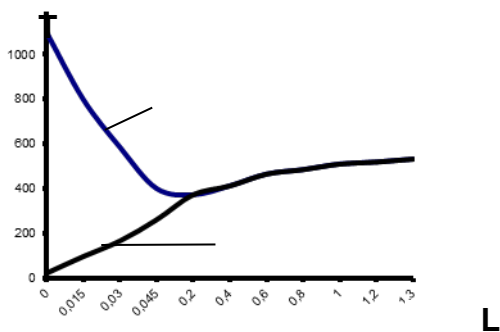


Рис.2 Зміна температури шару біомаси ($T_{ш}$) по довжині реактора (L , м), при температурі теплоносія ($T_{гг}$) 1040°C.

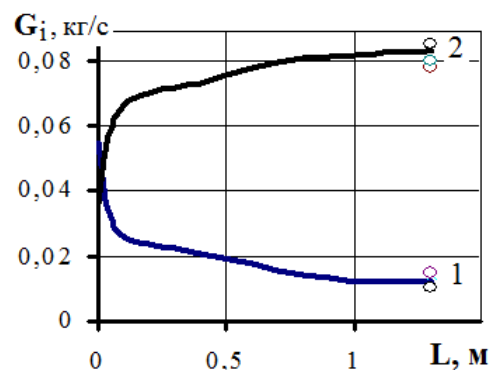


Рис.3 Вихід біовуглецю (1) і летких (2) з біомаси вологістю 30%, по довжині реактора (L , м).

На приведених графіках видно, що поблизу вхідного перерізу реактора, фізико-хімічні процеси мають високу інтенсивність, оскільки вони проходять в режимі «теплого удару». Це дозволяє, при довжині камери піролізу $L=1,3$ м, ефективно нагріти шар біомаси до заданої температури розкладу (450...500 °C) на леткі і біовуглець. При цьому встановлено, що даний діапазон температур процесу є оптимальним для їх виходу з високою теплотою згоряння (**рис.4**).

Поряд з розглянутими технологічними параметрами, суттєвий вплив на ефективність процесу мають і інші фактори, вихідні дані яких необхідні для розрахунку як технологічного процесу, так і конструктивних особливостей



установки. Зокрема, це гідромеханічні характеристики затиснутого шару біомаси при фільтрації газового теплоносія (визначення оптимальної товщини шару біомаси, порозності і дійсної швидкості фільтрації). Їх вихідні дані були визначені в ході аналітичних і експериментальних досліджень.

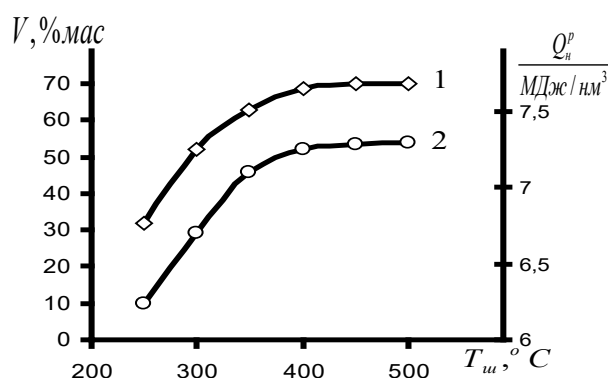


Рис.4 Залежність виходу летких (1) і їх теплоти згоряння Q_p^h (2), від температури процесу ($T_{ш}$).

Для цього була створена спеціальна лабораторна установка, принципова схема якої приведена на **рис 5**. Вона включає: камеру згоряння, реакційну зону, робочу зону, системи вимірювання і регулювання витрат природного газу та повітря, контрольно-вимірювальну апаратуру, а також систему допалювання продуктів піролізу.

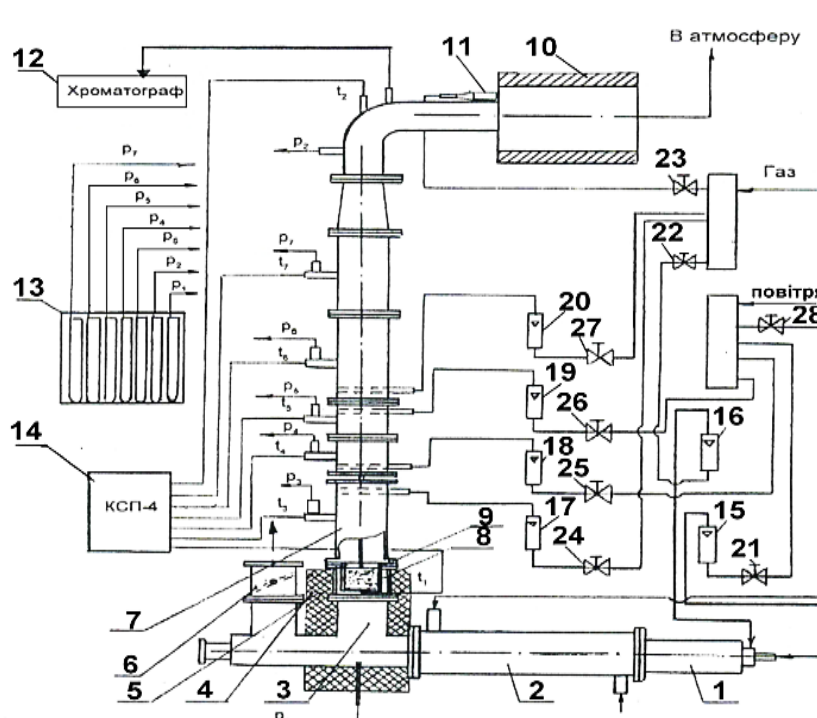
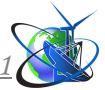


Рис.5 Принципова схема лабораторної установки для дослідження процесу термохімічної конверсії рослинної біомаси

- 1 - камера згоряння, 2 - реакційна зона, 3, 6 - заслінка, 4 - теплоізоляція, 5 - байпас, 7 - робоча зона, 8 - колосник, 9 - дослідна біомаса, 10 - камера допалювання, 11 - запальник, 12 - газовий хроматограф, 13 - манометри, 14 - реєстратор температури, 15 – 20 - ротаметри, 21 – 28 - регулююча



Камера згоряння (1) є камерою згоряння попереднього змішування природного газу і повітря. Одержана суміш, з необхідним надлишком повітря ($\alpha < 1$), проходить через пористу керамічну насадку і згоряє, утворюючи продукти згоряння з визначеними параметрами.

Витрати матеріальних потоків, на камеру згоряння, контролюються ротаметрами: повітря - РМ – 40 (15), природний газ - РМ - 4 (16), а їх співвідношення регулюється відповідними вентилями (21, 22) таким чином, щоб процес згоряння відбувався в дві стадії. На першій стадії, природний газ згоряє з коефіцієнтом надлишку повітря $\alpha = 0,7 - 0,75$, а на другій стадії, на виході камери згоряння подається певна кількість природного газу з тим, щоб температура продуктів згоряння була у визначених межах. На виході камери згоряння контролюється температура, тиск і склад газу. Технологія отримання газового теплоносія з визначеними характеристиками розглянута авторами в окремій публікації [7].

Далі продукти згоряння надходять, або у робочу зону (7), або по байпасній лінії (5), в атмосферу. Перемикання потоку відбувається за допомогою заслінок (3 і 6).

Робоча зона (7) висотою 360 мм та діаметром 100 мм виконана секційною по 60 мм, з жароміцної сталі. В середній частині кожної секції, крім третьої (рахуючи від колосника), є штуцера для вимірювання температури і тиску.

Температури вимірювалися за допомогою термопар градування ХА і реєстрацією значень на КСП-4 (14). Тиск вимірювався за допомогою U-подібних рідинних манометрів (13).

Для аналізу складу газу використовувалися хроматографи ЛХМ-80 і „Газохром-3101”. Газ на аналіз відбирався на вході і виході реакційної та робочої зони і проводився по таких компонентах: водень, оксид вуглецю, двооксид вуглецю, метан, етан, пропан, кисень, азот, аргон.

В експериментах використовувалася тріска дуба з вологістю 30 ... 35%.

Методично експерименти проводились таким чином. В робочу зону установки насипалася тріска визначеної кількості, через шар якої фільтрувалися теплоносії чи повітря. Під час експерименту контролювалися: час конверсії, температура, склад газу і витратні параметри вхідних матеріальних потоків (газ/повітря). Наприкінці експерименту залишок зважувався на аналітичних вагах.

Згідно проведеного літературного аналізу, шар дослідного матеріалу по своїй структурі, розглядався як пориста стінка. Щодо процесу протікання рідин і газів через пористі матеріали опублікована велика кількість робіт. Частина авторів розглядали фільтрацію як вторинну задачу (перетікання в каналах між частинками) [8, 9,10], інші – як зовнішню задачу (обтікання частинок) [11]. В цій роботі описаний так званий узагальнений метод розрахунку гідравлічного опору шару пористого матеріалу. Автор виходить із „струменевості” потоку і приймає, що головним явищем, яке визначає опір руху потоку є періодичне звуження струмин при проході через ділянку перерізу, де є найбільше зближення частинок матеріалу, та подальше їх розширення.

Грін і Дувер [12], а пізніше Ю.В.Ільїн [13] розглядаючи модель пористої



стінки, поверхні якої з'єднуються прямолінійними паралельними каналами з рівномірно розміщеними по їх довжині діафрагмами, на основі теорії розмірності одержали залежність, яка найбільш повно відображає фізичний зміст явищ, при протіканні рідини чи газу через пористу стінку.

Проте, при виводі формул, на базі всіх цих теорій, приймається стільки спрощень, що результат обезцінюється. Тому, на практиці, коефіцієнти гідравлічного опору пористих матеріалів визначаються дослідним шляхом, з наступним поширенням їх на певні групи пористих середовищ на основі загальних положень теорії подібності.

В нашому випадку, необхідність визначення гідромеханічних характеристик затиснутого шару (товщини шару, порозності, дійсної швидкості фільтрації теплоносія), обумовлена гідравлічним опором шару при якому забезпечується стабільна і безпечна робота пальника та іншого обладнання.

Експерименти проводилися у стаціонарному режимі, шляхом продувки визначеного шару біомаси, спочатку холодним повітрям, а потім гарячим газовим теплоносієм, у вигляді продуктів неповного згоряння природного газу. Моделювання затиснутого шару, тобто підтискуючої спроможності шнеку, здійснювалося шляхом зміни його товщини (висоти) і відповідно порозності шару біомаси. Затиснутий шар біомаси, по своїй структурі, розглядався як пориста стінка з частинками нерегулярної форми. Тому, для дослідження гідромеханічних характеристик була використана відома методика [13, 14], яка широко використовується при дослідженні течії рідини та газів в різних пористих системах згідно рівняння:

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

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

Значення в'язкісного (α) і інерційного (β) коефіцієнтів опору пористого шару визначалися експериментально по витратним характеристикам, приведених в таблиці 1 і узагальнених на рис. 6.

Таблиця 1 - Зміна перепаду тиску по товщині шару тріски в залежності від питомих витрат повітря, що фільтрується через шар

Питомі витрати повітря, $\text{кг/м}^2 \text{ с}$	Зміна перепаду тиску по товщині шару, ΔP , кПа				
	0,03 м	0,09 м	0,21 м	0,27 м	0,33 м
0,3	0,059	0,137	0,235	0,274	0,314
0,38	0,098	0,216	0,392	0,431	0,47
0,48	0,176	0,288	0,61	0,666	0,706
0,57	0,235	0,431	0,823	0,882	0,921
0,66	0,294	0,568	1,08	1,2	1,25
0,75	0,392	0,725	1,35	1,49	1,53

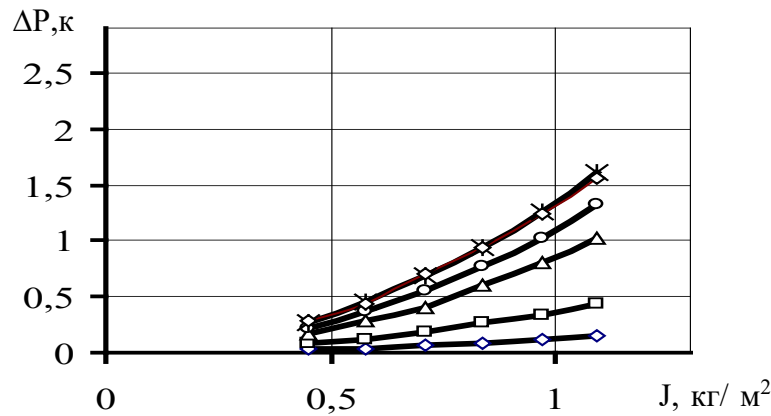


Рис.6 Зміна перепаду тиску по товщині шару тріски ($h, м$: 1-0,03; 2-0,09; 3-0,21; 4-0,27; 5-0,33;) з порозністю $\epsilon=0,41$, в залежності від питомих витрат повітря (j), що фільтрується через шар.

Для двох крайніх значень питомих витрат повітря, взятих з витратної характеристики пористого шару (рис.6), розраховуємо значення комплексу A :

$$A = \frac{P_n^2 - P_k^2}{2jhRT} \tag{2}$$

В координатах $A-j$, строїмо графік (рис.7) рівняння якого $\epsilon: A=B_1j + B_0$.

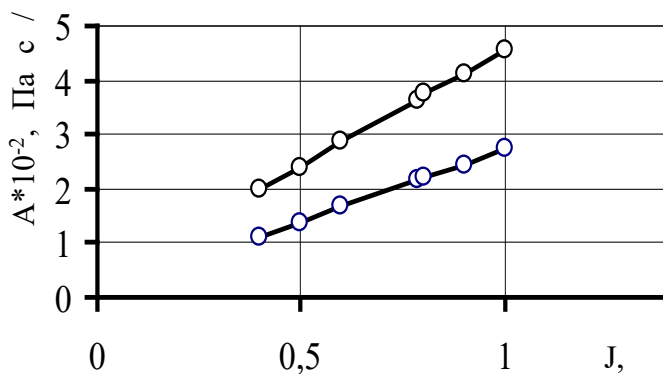


Рис.7 Графік функції $A=f(j)$ для шару тріски товщиною: 1 - 0,09м, 2 - 0,33 м

По графіку функції $A=f(j)$ (рис.7) знаходимо коефіцієнти B_0 і B_1 , а потім визначаємо коефіцієнти $\alpha=B_0/\mu$ і $\beta=B_1$, які дозволяють визначити модефіковане число Рейнольдса

$$Re = \frac{\beta j}{\alpha \mu}; \tag{3}$$

і розрахувати коефіцієнт гідравлічного опору шару біомаси по формулі Р.С. Бернштейна, В.В. Померанцева і С.Л. Шагалової [15].

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

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



Аналіз залежності коефіцієнту гідравлічного опору шару тріски від модифікованого числа Рейнольдса, в порівнянні з даними інших авторів [15, 16], підтверджує правомірність приведення часток тріски до сферичної форми.

Проведеними дослідженнями також встановлена залежність гідравлічного опору шару від порозності шару, та питомих витрат повітря, що фільтрується через шар (рис.8). Це дозволило визначити його граничні межі, обумовлені характеристиками роботи газового пальника низького тиску, вентилятора та іншого обладнання.

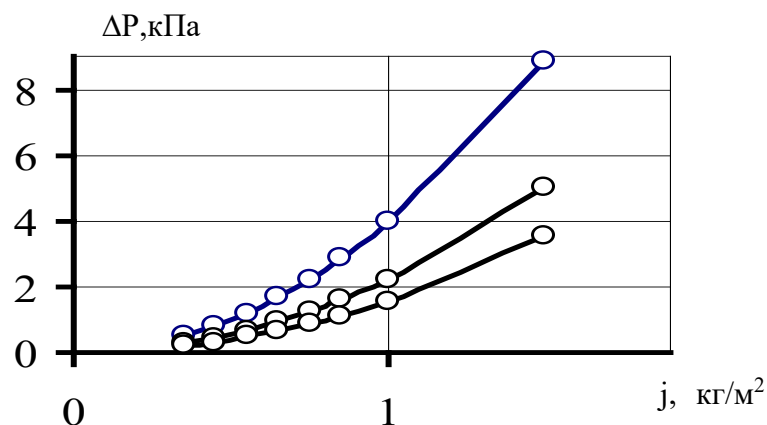


Рис.8 Зміна перепаду тиску в шарі товщиною 0,33м, в залежності від питомих витрат повітря при різній порозності шару: 1-0,35; 2-0,41; 3-0,45

Зміна гідравлічного опору шару порушує не тільки умови роботи приведенного обладнання, але й змінює дійсну швидкість фільтрації теплоносія. А згідно гіпотези Б.І.Китаєва [17] про механізм виносу горючих компонентів із зони реакцій, та дифузії CO_2 до поверхні біовуглецю є визначальним фактором регулювання інтенсивності процесу.

Так, умови затиснутого шару, наприклад, для фракції біомаси з характерним розміром 0,025м, дозволили досягати рекомендованої З.Ф. Чухановим і Н.В.Лавровим [18] дійсної швидкості фільтрації 2,2 м/с на холодне дуття повітря. Це притому, що нині в працюючих агрегатах, в силу різних обмежень, швидкість фільтрації, наприклад, для шарового процесу, не перевищує 0,5 - 0,8м/с.

Висновки.

В роботі показано, що одним з найбільш ефективних шляхів використання рослинної біомаси є її комплексна термохімічна конверсія в енергетичні і супутні продукти з високими споживчими характеристиками.

Експериментально досліджені і уточнені основні гідромеханічні характеристики полідисперсного шару тріски нерегулярної форми (розмір фракції – 0,03 – 0,04 м, товщина шару – до 0,35 м, дійсна швидкість фільтрації 2 - 2,5 м/с, гідравлічний опір шару – не більше 3 кПа, які забезпечують стабільну і безпечну роботу пальника та іншого обладнання.

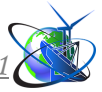
Експериментально визначена константа Козені-Кармана для такого шару, завдяки чому, була уточнена емпірична залежність коефіцієнту гідравлічного опору шару від модифікованого числа Рейнольдса.



Література

1. Калетнік Г.М. Біопаливо. Продовольча, енергетична та економічна безпека України: монографія.-К.: Хай-Тек Прес, 2010.– 516с.
2. Шишаков Н.В.. Основы производства горючих газов. Госэнергоиздат, 1948.
3. Чуханов З.Ф. Комплексное энерго-химико-технологическое использование твердого топлива. Вестник Академии наук СССР, 1949, №9, с.62.
4. Патент UA 102789 C2 Україна, МПК C10B 51/00, C10B 53/02, C10B 53/00, C10J 3/00, F23J 15/00, F23G 5/027, F23G 7/00, F23L 15/00. Спосіб енерготехнологічної переробки біомаси / Носач В.Г., Басок Б.І., Білека Б.Д., Демиденко С.К., Погожев В.М., Склярєнко Є.В.- № a201207752; заявл.: 25.06.2012; публ.: 12.08.2013, Бюл. № 15.
5. Баштовой А.И., Склярєнко Е.В. Математическое моделирование процесса газификации древесины // Промышленная теплотехника. 2006. –т.28, №6. –С.71-77.
6. Носач В.Г., Склярєнко Е.В., Родионов В.И. Исследование термохимической переработки древесины в зажатом подвижном и фильтруемом слое // Промышленная теплотехника. 2005. –т.27, №5. –С.66-69.
7. Склярєнко Є. В., Воробйов Л.Й. Дослідження характеристик газового теплоносія для термохімічної конверсії рослинної біомаси. Modern engineering and innovative technologies. 2020, №12, Part 1. P.71-81.
8. Kozeny J.S. Akad. Wiss Wien (Abt. IIa), 136, 271 (1927).
9. Carman P.C. Flow of Gases through Porous Media, London, 1956.
10. Коллеров Д.К. Хим.пром. №2, 163 (1959) и др.
11. Happel J. Am. Inst. Chem. Eng. J., 4, 197 (1958).
12. Green G., Duwer P. Journal of applied Mechanics. 1951. vol. 18, №1.
13. Ильин Ю.В. Течение газа через пористые металлические стенки. Известия высших учебных заведений. Авиационная техника. 1959, №1. С. 65-73.
14. Пористые проницаемые материалы: Справ. изд./Под ред..Белова С.В. М.: Металлургия, 1987. с.28-40.
15. Бернштейн Р.С., Померанцев В.В., Шагалова С.Л. Сб. «Вопросы аэродинамики и теплопередачи в котельно-топочных процессах» Госэнергоиздат, 1958.-С.267.
16. Ишкин И.П., Каданер М.Г. Кислород, №3, 8 (1952) .
17. Китаев Б.И. О выносе горючих компонентов из кислородной зоны. Тезисы доклада на 3-й научно-технической конференции по газификации твердого топлива, Москва, 1955.
18. Лавров Н.В. Влияние концентрации кислорода и температуры реакции на скорость окисления углерода. Диссертация МХТИ, 1939. Известия АН СССР, ОТН, 1940, 8, 83.

Abstract. The article considers the prospects for the energy use of plant biomass and ways to improve the energy efficiency of its use. The choice and substantiation of the energy-technological



scheme of the process of preliminary thermochemical conversion (processing) has been carried out. The essence of this technological process lies in the fact that the conversion of plant biomass is carried out in the "thermal shock" mode using a high-temperature gas coolant in the form of products of incomplete combustion of hydrocarbon gas filtered through a clamped moving layer of biomass. This allows for a short time to transfer a significant part of the organics into the gas phase, reduce the yield of resins and complete the process at the stage of volatile distillation and creation of biocoal. The advantages and disadvantages of the proposed technological process, as well as the main factors affecting its effectiveness, are considered. In particular, the issues of the influence of the hydromechanical characteristics of the clamped layer (layer thickness, its porosity, the actual rate of gas coolant filtration through the biomass layer) are considered, and their optimal parameters are determined.

Key words: *milling peat, thermochemical conversion, hydromechanical characteristics of the clamped biomass layer.*

Стаття підготовлена у рамках виконання науково–дослідної відомчої тематики ІТТФ НАН України, тема "Розвиток методів та засобів підвищення екологоенергетичної ефективності в газотурбобудуванні та теплоенергетиці" (шифр 1.7.1.896).

Стаття відправлена 17.06.2022р.
© Скляренко Є.В., Воробйов Л.Й.