

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ ХАРЧОВИХ ТЕХНОЛОГІЙ

На правах рукопису



ЩУДЛО ТАРАС СЕРГІЙОВИЧ

УДК 662.6

**ОСОБЛИВОСТІ СПІЛЬНОГО СПАЛЮВАННЯ БІОМАСИ
ТА ВУГІЛЛЯ УКРАЇНСЬКИХ ПОКЛАДІВ В ФАКЕЛЬНИХ
КОТЛОАГРЕГАТАХ**

Спеціальність 05.14.06 –

Технічна теплофізика та промислова теплоенергетика

АВТОРЕФЕРАТ

дисертації на здобуття наукового ступеня
кандидата технічних наук

КИЇВ – 2020

Дисертацією є рукописом.

Робота виконана в Інституті вугільних енерготехнологій НАН України

Науковий керівник: доктор технічних наук, старший науковий співробітник
Дунаєвська Наталія Іванівна,
Інститут вугільних енерготехнологій НАН України,
м.Київ,
директор.

Офіційні опоненти: доктор технічних наук, старший науковий співробітник
Абдулін Михайло Загретдинович,
Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»,
м. Київ,
доцент кафедри теплоенергетичних установок теплових та атомних електричних станцій

кандидат технічних наук

Мирошник Марія Миколаївна,


Національний університет харчових технологій, м. Київ,
доцент кафедри теплоенергетики та холодильної техніки

Захист відбудеться «22» грудня 2020 р. о 13⁰⁰ годині в ауд. А-311 на засіданні спеціалізованої вченої ради К 26.058.05 Національного університету харчових технологій за адресою: Україна, 01601, м. Київ-33, вул. Володимирська, 68.

З дисертацією можна ознайомитись у бібліотеці Національного університету харчових технологій за адресою: Україна, 01601, м. Київ-33, вул. Володимирська, 68.

Автореферат розісланий «20» листопада 2020 р.

Вчений секретар
спеціалізованої вченої ради


Л.О. Власенко

ЗАГАЛЬНА ХАРАКТЕРИСТИКА РОБОТИ

Актуальність теми.

Україна має виконувати рішення міжнародних екологічних угод зі зниження викидів шкідливих речовин в атмосферу, однак, поточна економічна ситуація в країні не дозволяє забезпечити всі ТЕС системами очистки димових газів, що призводить до необхідності впровадження на існуючих генераціях мало-витратних технологій спалювання, здатних поліпшити екологічність їх роботи. Крім того, енергетична стратегія України на період до 2035 року передбачає зростання частки сектору електроенергетичної галузі, який використовує тверду біомасу як енергоресурс. Одночасно, після 2014 року, в наслідок погіршення військово-політичної ситуації на Сході України, 7 з 14 потужних ТЕС України були відрізані від поставок вітчизняного антрациту та пісного вугілля. З іншого боку, Україна має значний потенціал біомаси, який доступний на всій території країни. Тому виникає **актуальна задача** залучення твердої біомаси в паливний баланс ТЕС та ТЕЦ шляхом впровадження на них технології спільного спалювання біомаси з вугіллям. Дослідження особливостей спільного спалювання антрациту та газового вугілля з твердою біомасою у котлоагрегатах вітчизняних ТЕС є темою дисертаційної роботи.

Зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами. Дослідження та розробки, які є основою дисертації, виконувались в Інституті вугільних енерготехнологій (ІВЕ) НАН України в рамках держбюджетних науково-дослідних робіт: «Наукові основи спалювання низькорекційного вугілля в потоці» (2007-2011 рр., РК № 0107U005834), «Дослідження спільного спалювання різних видів твердого палива для підвищення ефективності та екологічності роботи котлоагрегатів» (2009-2010 рр. РК № 0109U006265), Об.5.5-14 «Розробка технологій скорочення викидів діоксиду сірки та азоту для факельних котлоагрегатів» (2014 р., РК № 0114U003748), Об.4.8 «Розроблення технології та обладнання для впровадження спільного спалювання антрациту та біомаси для пиловугільних котлів ТП-100 та ТПП-210А ТЕС України» (2016 р., РК № 0116U005179). В вищезазначених НДР автор був відповідальним виконавцем або співавтором. В роботу також ввійшла низка результатів, що були отримані при виконанні господарчих договорів з ТЕС.

Мета та задачі дослідження. Мета роботи – визначення оптимальних умов спільного спалювання вугілля та твердої біомаси України у котлоагрегатах для диверсифікації паливної бази та поліпшення екологічних показників вугільних ТЕС.

Для реалізації цієї мети були поставлені такі задачі:

1. Експериментально дослідити повноту вигорання вугілля при спалюванні пиловидного антрациту з подрібненою деревиною сосни та газового вугілля з пелетами сосни, соломи пшениці та лушпиння соняшнику в потоковому реакторі.
2. Експериментально визначити кінетичні характеристики процесів зневоднення, виходу летких речовин та горіння коксового залишку зразків вугілля, деревини сосни та їх сумішей, а також дослідити інші різновиди твердої біомаси України в термогравіметричному аналізаторі для уточнення узагальнюючих

характеристик спалювання та наступних розрахунків технологічних процесів в різних умовах.

3. Експериментально визначити оптимальний розмір часточок твердої біомаси для наступного її спалювання спільно з вугіллям для уточнення узагальнюючих характеристик спалювання.

4. Визначити вплив спільного спалювання вугілля та твердої біомаси на екологічні показники роботи пиловугільного котлоагрегату.

5. Розробити технічні рішення щодо оптимальних умов використання твердої біомаси для високоефективного та екологічного спалювання з вугіллям в існуючих котлоагрегатах.

Ці задачі вирішувались із застосуванням розрахункових та експериментальних **методів дослідження**, в тому числі на технологічній установці газифікації та спалювання пиловидного вугілля в потоці, на термогравіметричному аналізаторі, а також лабораторній установці з вивчення динаміки горіння палив в киплячому шарі.

Об'єкт дослідження: донецький антрацит, газове вугілля, деревина сосни, солома пшениці та інші різновиди твердої біомаси України.

Предмет дослідження: процеси пиловидного спалювання вугілля з твердою біомасою.

Наукова новизна отриманих результатів полягає в наступному:

1. Вперше експериментально встановлено можливість ефективного факельного спалювання донецького антрациту з деревиною сосни в потоковому реакторі. Встановлено частку заміщення антрациту деревиною сосни, що забезпечує найбільшу повноту вигорання антрациту в факелі, яка складає 9,3 % за теплом.

2. Експериментально встановлено, що, за однакової частки заміщення антрациту в усіх експериментальних режимах, деревина забезпечує на 7-12% більшу повноту вигорання вугілля ніж природний газ за рахунок більшої випромінюючої здатності.

3. Експериментально встановлені теплові частки заміщення газового вугілля біомасою, що забезпечують максимальний ступінь вигорання вугілля під час факельного спалювання, і які складають для деревини сосни – 11 %, лушпиння соняшника – 7 % та соломи пшениці – 12 %.

4. Отримано кінетичні константи для всіх стадій термічного розкладу зразків найпоширенішої твердої біомаси України та виконано порівняння з відомими літературними даними, що показало суттєві відмінності в швидкості її реагування, що свідчить про необхідність визначення кінетичних характеристик для кожного палива.

Практичне значення отриманих результатів.

1. Розроблено конструкції двох вихрових передтопків (горизонтального і вертикального) для повного заміщення вугілля біомасою у вугільних котлах ДКВР 2,5 т/год або для часткового заміщення вугілля паропродуктивністю 4, 6,5, 10 т/год. Виготовлено горизонтальний варіант передтопку.

2. Розроблено схему спільного факельного спалювання на котлах ТПП-210А пелет та конструкцію модернізованого пальника, що передбачає заміщення до 10% теплової частки вугілля за рахунок біомаси.

3. Показано, що при заміщенні 10% теплової частки антрациту пелетами сосни на котлі ТПП-210А забезпечується прийнятний рівень температур в паливні та збільшується ККД котла на 0,43% у порівнянні зі спалюванням 100% антрациту.

4. Показано зменшення викидів оксидів сірки на 9,8 % та оксидів азоту на 5,5 % при запровадженні спільного спалювання пелет сосни з антрацитом на котлі ТПП-210А, що призводить до економії 5,81 млн. грн щорічно на екологічних виплатах.

Результати досліджень і розробок використані ВАТ «Энергетическое и нефтяное оборудование» при проектуванні передтопку для спалювання деревних відходів в паливні котла ДКВР 2,5; асоціацією «Український пелетний союз» при розробці концепції проекту впровадження технології спільного спалювання твердої біомаси з антрацитом; Трипільською ТЕС ПАТ «Центренерго» при передпроектних розрахунках пілотного проекту спільного спалювання антрациту та твердого біопалива в котлах ТПП-210А.

Особистий внесок здобувача полягає в постановці задач дослідження, в участі в проведенні технологічних досліджень зі спільного спалювання вугілля з біомасою в потоці та в обробці їх результатів, у обробленні результатів термометричних досліджень та в розрахунку кінетичних констант стадій термічного розкладу досліджуваних вугілля, біомаси та їх сумішей, у виконанні позонних теплових розрахунків паливні котла ТПП-210А.

Технологічні дослідження зі спільного спалювання вугілля з біомасою здійснені разом з к.т.н. М. Чернявським, к.т.н. О. Проваловим, к.т.н. Я. Засядько, к.т.н. І. Безценним і к.т.н. Д. Бондзиком, дослідження оптимального розміру часточок біомаси – з к.т.н. І. Безценним та С. Дулієнко, позонні теплові розрахунки паливні котла ТПП-210А – виконанні разом з к.т.н. І. Безценним.

Положення опублікованих в співавторстві з колегами і використаних в дисертації статей належать автору на основі рівноправного партнерства, а особистий внесок здобувача вказаний для кожної публікації окремо в списку публікацій.

Апробація результатів дисертації. Основні результати дисертації було обговорено на наступних міжнародних науково-практичних конференціях: 3-й (Алушта, 2006), 14-й (Київ, 2018) та 15-й (Київ, 2019) Міжнародній науково-практичній конференції «Угольная теплоэнергетика: проблемы реабилитации и развития»; Міжнародній науково-практичній конференції «Энергоэффективность» (Київ, 2008); 8-й Всеросійській конференції з міжнародною участю «Горение твердого топлива» (Новосибірськ, Росія, 2012).

Публікації. За темою дисертації опубліковано 19 робіт, в тому числі: 1 стаття у журналі, що входить до наукометричної бази Scopus, 2 – Web of Science, 7 статей в спеціалізованих наукових журналах України, 3 статті у вітчизняних науково-технічних періодичних виданнях, 1 стаття в закордонному спеціалізованому науковому журналі Європейського союзу, 5 тез доповідей в збірках праць міжнародних науково-практичної конференцій.

Структура й обсяг дисертації. Дисертація складається із анотації, вступу, чотирьох розділів, висновків, списку використаних джерел і одного додатку. Загальний обсяг роботи 147 стор., у тому числі обсяг основного тексту 103 стор.

Кількість окремих сторінок з рисунками і таблицями – 9. Дисертація містить 44 рисунків і 44 таблиці. Список використаних джерел (100 найменувань) викладений на 11 стор. Додаток оформлений на 4 стор.

ОСНОВНИЙ ЗМІСТ РОБОТИ

У **вступі** обґрунтовано актуальність проблеми, сформульовані мета і задачі дослідження, наукова новизна і практична цінність отриманих результатів, зазначені відомості щодо їх реалізацію, а також щодо апробації роботи і публікацій за темою дисертації.

В **першому** розділі представлено аналіз стану та викликів, що постають перед енергетикою України: необхідність зниження викидів шкідливих речовин в атмосферу, дефіцит вітчизняного вугілля антрацитової групи та в той же час необхідність залучення твердої біомаси як енергоресурсу відповідно до Енергетичної стратегії України на період до 2035 року. Наведено опис технології спільного спалювання біомаси з вугіллям, приклади її реалізації, а також переваги та особливості її реалізації в Україні. Представлено аналіз впливу технології спільного спалювання на екологічність роботи пилувугільних ТЕС. Зокрема проаналізовано механізми утворення оксидів азоту, вплив спільного спалювання на викиди оксидів азоту та оксидів сірки. Представлено огляд світового досвіду експериментальних досліджень окремих складових процесу спільного спалювання біомаси з вугіллям в потокових реакторах та термогравіметричних аналізаторах. В кінці сформульовані питання, що потребують вирішення для визначення оптимальних умов спільного спалювання вугілля та твердої біомаси у котлоагрегатах ТЕС України.

У **другому** розділі описані експериментальні установки, які використовувались для вивчення процесів спільного спалювання вугілля та твердої біомаси: потоковий реактор ВГП-100В для дослідження спалювання пиловидного вугілля та біомаси в потоці; термогравіметричний аналізатор системи Паулік-Паулік-Ердеї Q-1000 для визначення кінетичних характеристик процесів термічного розкладу палив; лабораторна установка киплячого шару Піроліз-М для визначення часу виходу летких речовин та питомої швидкості горіння коксозольного залишку твердої біомаси та вугілля. Наведено методики проведення експериментальних досліджень. Вказані стандартні методи досліджень вугілля та його коксозольних залишків, що використовувались в експериментах.

Для дослідження стабільності горіння та повноти вигорання вугілля, твердої біомаси та їх сумішей використовувалась установка ВГП-100В, яка дозволяє дослідити процеси займання та горіння факелу палива або суміші палив порівнюючи характеристики спалювання в однакових умовах. На рис. 1 наведено схему установки ВГП-100В, яка включає вертикальний нисхідний потоковий реактор 5 обладнаний комбінованим пальниковим пристроєм 3. Установка оснащена живильниками вугільного пилу продуктивністю 5-40 кг/год та подрібненої біомаси продуктивністю 3-15 кг/год. Загальна витрата повітря в експериментах становила 100-125 нм³/год. Час перебування частинок палива в реакторі – 0,75-

0,8 с. Аналіз газової фази виконувався за допомогою маспектрометра MX-1215 та газоаналізатора MRU Vario Plus. Балансові режими тривали 20-30 хв.

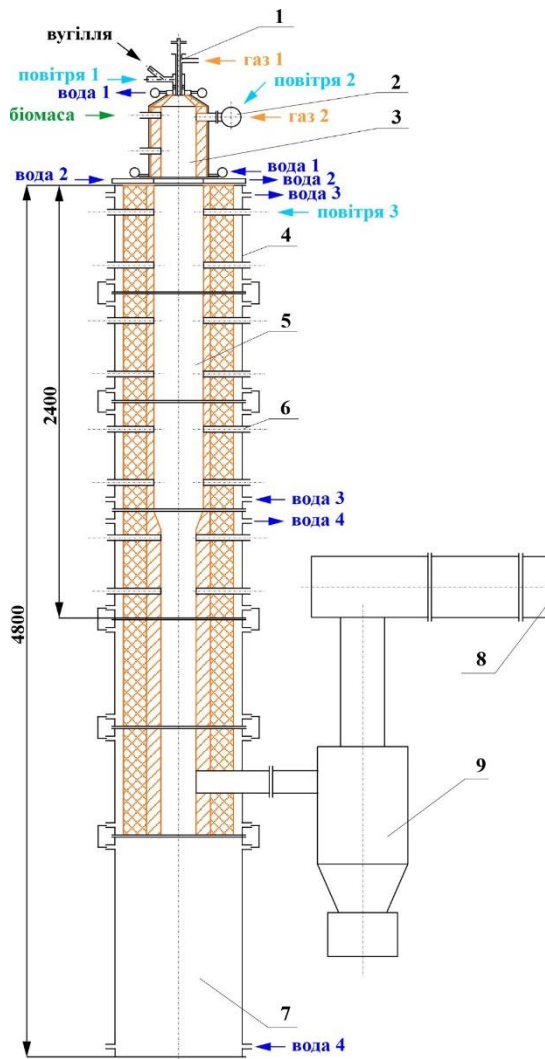


Рис.1 - Експериментальна установка ВГП-100В: 1 – основний пальник; 2 – допоміжний пальник; 3 – пальниковий пристрій; 4 – водо охолоджувана секція діагностичної ділянки; 5 – низхідний реактор; 6 – відбір проб; 7 - шлакозбірник; 8 – камера допалювання і охолодження; 9 – циклон.

Для дослідження кінетичних характеристик термічної деструкції вугілля, твердої біомаси та їх сумішей для стадій зневоднення, виходу летких речовин та горіння коксового залишку використовувався дериватограф Q-1000, що використовує метод термогравіметрії. В результаті отримують залежності зміни маси зразка та швидкості зміни маси від часу або від температури. Експерименти проводились в атмосфері повітря зі швидкістю нагрівання 20 °С/хв. в інтервалі температур $T_{\text{кімн}} - 1000$ °С. Первинні експериментальні дані отримувались у вигляді числових даних, а також у графічному вигляді.

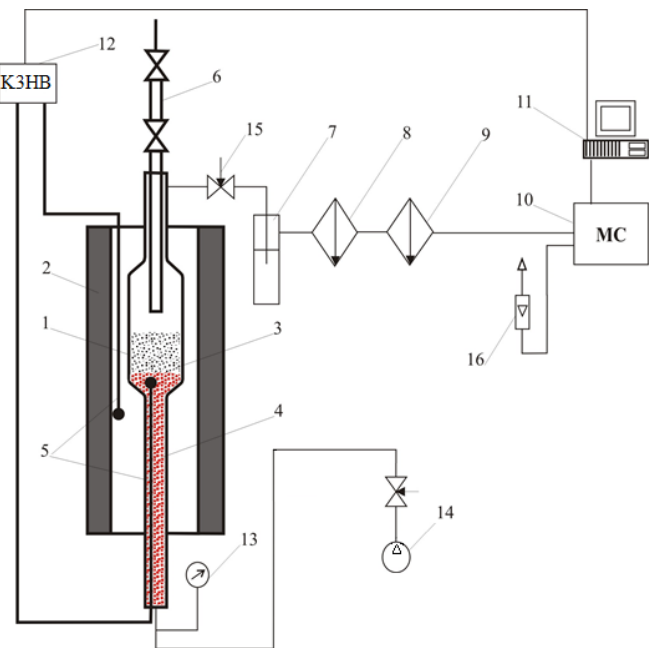


Рис.2 - Лабораторна установки Піроліз-М:

1 – реактор, 2 – піч, 3 – шар інертного матеріалу, 4 – засипка MgO, 5 – термопари, 6 – шлюзова камера, 7 – барботер, 8 – збірник конденсату, 9 – фільтр, 10 – маспектрометр, 11 – комп'ютер, 12 – цифровий мілівольтметр, 13 – манометр, 14 – компресор, 15 – регулятор витрати газа-носія, 16 – ротаметр.

Методика обробки експериментальних даних полягає у розрахунку предекспоненційного множника k_0 та енергії активації E , що визначаються шляхом графічної побудови дослідних даних у наближенні Арреніуса для кожної стадії термічного розкладу палива, які характеризуються початковою, максимальною та кінцевою температури процесу. Було виконано порівняння чотирьох поширених методів обробки термогравіметричних даних та визначено, що найбільшу точність забезпечили ізоконверсійні методи з наближенням для визначення температурного інтегралу Сенума-Янга та Старінка. Однак, для розрахунків було обрано наближення Старінка, що потребує значно меншої складності обрахунків.

Для визначення оптимальних з точки зору швидкості горіння та витрат на подрібнення розмірів часточок біомаси використовувалась лабораторна установка Піроліз-М, що дозволяє досліджувати динаміку газовиділення при термоконтактному піролізі та горінні вугілля в киплячому шарі при атмосферному тиску. Схема установки наведена на рис. 2. Вона включає реактор з кварцевого скла 1, який розміщений в трубчатій електронагрівальній печі 2.

Установка моделює умови швидкісного нагрівання шляхом введення дискретних наважок палива в нагрітий псевдозріджений шар інертного матеріалу маса якого перевищує наважку у 30-100 разів.

Дослідження проводились в діапазоні температур шару 450-750 °С. Використовувались наважки біомаси масою біля 0,5 г з розмірами частинок 0,63-3,0 мм, які розігрівались до температури шару за 2-4 с. Реєстрація температури в реакторі здійснювалась за допомогою швидкодіючого АЦП Omron КЗНВ-НТА. Газовий аналіз виконувався маспектрометром МХ-1215 та фіксував присутність газів H_2 , CO , N_2 , O_2 , Ar , CO_2 .

Наприкінці розділу наведені стандартні методи технічного аналізу вугілля: визначення вологості, виходу летких речовин, зольності, гранулометричного складу. Виконано оцінку похибки вимірювань під час експериментів.

В третьому розділі представлені результати експериментальних досліджень спільного факельного спалювання антрациту з деревиною сосни та газового вугілля з пелетами сосни, соломи пшениці та лушпинням соняшнику для вивчення стабільності факелу на стенді ВГП-100В. Визначені оптимальні співвідношення палив з точки зору повноти їх вигорання. Наведено результати термогравіметричних досліджень термічного розкладу, розраховані кінетичні константи для стадій зневоднення, виходу летких та горіння коксового залишку для сумішей зразків антрациту з пелетами сосни та соломи пшениці, а також для зразків твердої біомаси України. Представлені результати експериментів з визначення оптимальних з точки зору швидкості горіння та витрат на подрібнення розмірів часточок біомаси пелет деревини сосни, соломи пшениці та лушпиння соняшника на лабораторній установці киплячого шару Піроліз-М.

Пошукові та балансові дослідження пиловидного спалювання антрациту на пілотному стенді ВГП-100В виконані з метою порівняння основних характеристик спалювання вугілля окремо та спільно з твердою біомасою. Особлива увага приділена експериментальному дослідженню складу двофазного потоку на виході експериментальної установки. Першочерговим завданням даної серії експериментів було з'ясувати ефективність спільного спалювання твердих палив,

що максимально відрізняються за ступенем метаморфізму. Найменш реакційним і високометаморфізованим твердим паливом, яке спалюється на українських ТЕС є антрацит підвищеної зольності. Було обрано пил антрациту стандартного станційного розмілу та тирса сосни, яка попередньо розмілювалася, а потім просіювалася через сита до розміру частинок 3-5 мм. Оскільки на стенді використовується непідігріте повітря, то для наближення умов експерименту до умов в енергетичних котлоагрегатах, частка природного газу або деревини, як підтримуючих горіння антрациту палив, яка витрачалась на нагрівання повітря до 320 °С, віднімалась від загальної витрати природного газу/деревини. Проведені дослідження поділялись на дві групи: режими із підсвічуванням антрациту природним газом та безпосередньо режими із спільним спалюванням біомаси з вугіллям (ССБВ). Під час відпрацювання першої групи режимів була визначена мінімальна допустима для стабільного горіння антрациту теплова частка підсвічування природним газом, що становить 6,2%. Крім того спостерігалось зменшення повноти вигорання антрациту з природним газом зі збільшенням частки підсвічування та збільшенні зольності вугілля. Порівняння ефективності природного газу та деревини як підтримуючого палива показало, що при ступені конверсії вугілля на 4,3% меншого ніж у режимі з підсвіткою газом, витрачалось на 3,6% менше еквівалентної теплоти тирси (рис.3). На підставі проведеної серії експериментів зі спільного спалювання антрациту з деревиною сосни у різних співвідношеннях, було отримано залежність ступеня конверсії вугілля від частки його заміщення природним газом та деревиною сосни (див. табл. 1). Аналіз результатів експериментів показав, що залежність для тирси має квадратичний характер з екстремумом в точці $q_{\text{тирси}} = 9,3 \%$, що відповідає максимальному ступеню конверсії вугілля $X_{\text{вуг}} \approx 76,3 \%$.

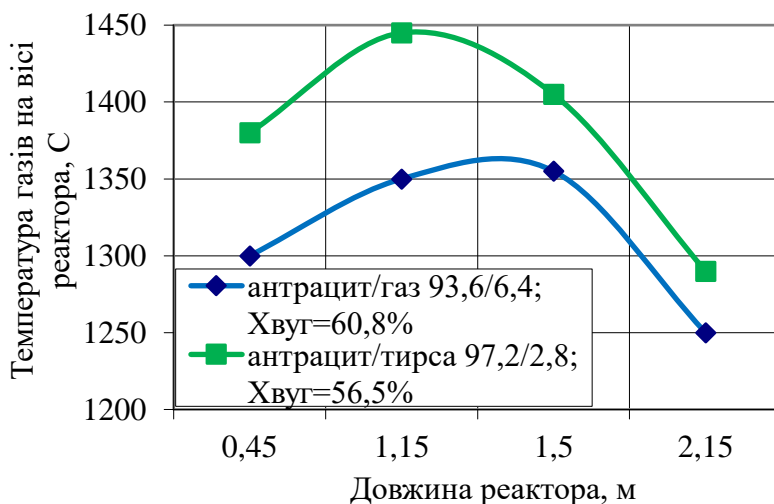


Рис. 3 – Розподіл температур вздовж осі реактора в режимі з підсвічуванням вугілля природним газом та тирсою.

Таблиця 1
Вплив заміщення антрациту підтримуючими паливами на його ступінь конверсії

частка заміщення антрациту, %	$X_{\text{вуг}}, \%$
природним газом	
6,4	60,8
20,6	71,0
тирсою сосни	
2,8	56,5
8,8	75,9
14,3	70,4

У зв'язку з гострим дефіцитом вугілля антрацитової групи в Україні відбувається переведення котлів, спроектованих на спалювання антрациту, на газове вугілля. Тому перспективним є впровадження спільного спалювання на котлоагрегатах, що спалюють газове вугілля. Для визначення ефективності було

проведено спільне факельне спалювання вугільного пилу газової групи з трьома видами твердої біомаси – пелетами сосни, агропелетами пшениці та пелетами з лушпиння соняшнику. Для спалювання обирався вугільний пил стандартного станційного помелу. Пелети біомаси попередньо подрібнювалися до середнього розміру 1,6 мм. Для визначення оптимальної частки біомаси в суміші з вугіллям розраховувався загальний ступінь вигорання суміші палив. Для цього, зондом на виході установки виконувався відбір твердої фази з наступним визначенням зольності та середньої ступені конверсії для двох палив. Максимальне вигорання припадало на частку біомаси в суміші з газовим вугіллям 11 % для деревини сосни, 7 % для лушпиння соняшника та 12 % для соломи пшениці.

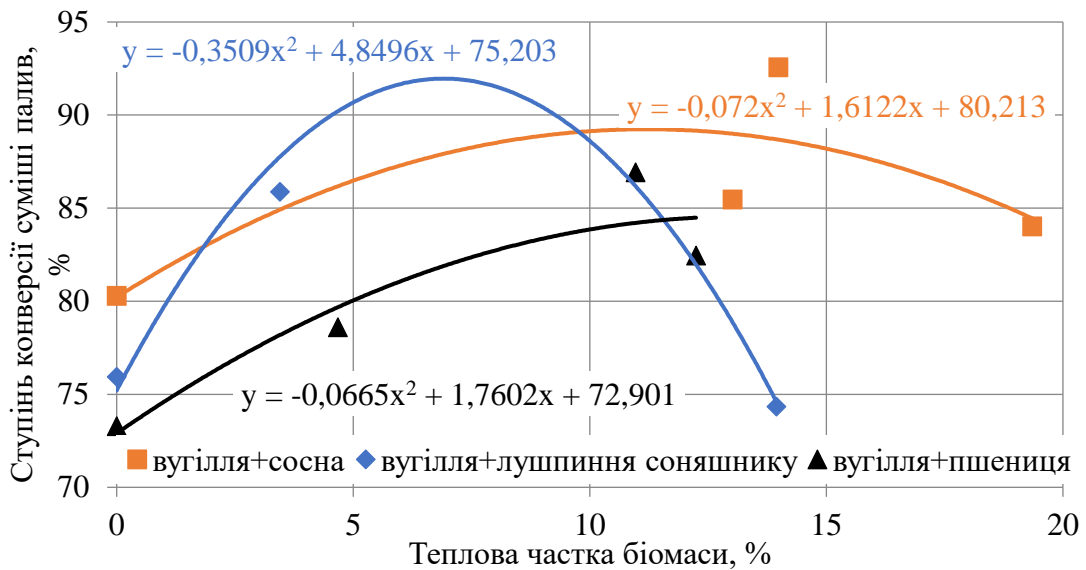


Рис. 4 – Ступінь конверсії суміші газового вугілля та різних типів біомаси в залежності від частки біомаси в суміші.

Результати спільного спалювання вугілля з твердою біомасою в потоковому реакторі ВГП-100В показали практичну можливість та ефективність такого спалювання. Однак, для впровадження технології спільного спалювання в котлах, необхідно визначити кінетичні характеристики процесів термічного розкладу палив що досліджуються в даній роботі. Подальші дослідження проводились з використанням методу термогравіметрії.

В експериментах визначались кінетичні характеристики стадій зневоднення, виходу летких та вигорання коксового залишку антрациту, деревини сосни та їх сумішей – палив, що раніше було досліджено в потоковому реакторі ВГП-100В. Крім того, було досліджено термічний розклад соломи пшениці окремо та у суміші з антрацитом.

Час повного вигорання для зразків антрациту, сосни та їх суміші 50/50 у.п. склав, відповідно, 81,0, 49,5 та 64,3 хв. Отже, в умовах дериватографа, за однакової маси, зразок пелети сосни потребує на ~40% меншого часу для повного вигорання ніж пил антрациту. Якщо порівняти час повного вигорання суміші палив в експерименті з розрахунковим середнім часом, отриманим із припущення про незалежне горіння палив у суміші, то отримуємо різницю приблизно 1,5 % у

бік зменшення часу вигорання в експерименті. Крім того, спостерігається підвищення швидкості зміни маси суміші палив на 3-4,8 % у порівнянні з середнім значенням для незалежного горіння компонентів суміші починаючи з максимуму виходу летких сосни і до закінчення вигорання коксозольних залишків суміші палив (рис. 5). Отже, наявний певний синергічний ефект при безпосередньому контакті сосни з антрацитом під час їх спільного термічного розкладу.

Були розраховані кінетичні константи стадій термічної конверсії антрациту, сосни, соломи пшениці та їх сумішей (табл. 2-4).

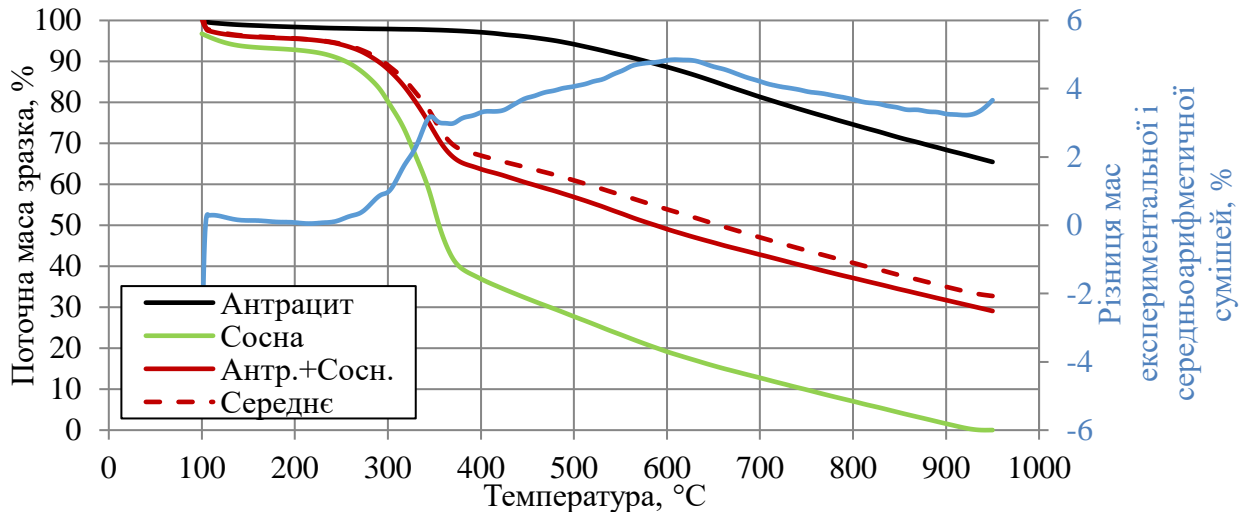


Рис. 5 – Поточна маса та різниця мас експериментальної і середньоарифметичної сумішей в залежності від поточної температури для зразків антрациту, сосни та їх суміші 50/50 у.п.

Таблиця 2

Кінетика зневоднення антрациту, біомаси та їх сумішей

	Передекспоненційний множник, 1/с	Енергія активації, Дж/моль	Температурний інтервал, °C
Антрацит (А)	5,91	24770	48-93
Пелета сосни	167476	52564	40-172
Пелета соломи	391314	54707	38-164
Суміш А і пелет сосни 50/50	153690	52381	46-176
Суміш А і пелет сосни 90/10	253	35038	48-225
Суміш А і пелет соломи 90/10	8324	43783	43-184

У попередніх експериментах досліджувались процеси спільного спалювання вугілля переважно з деревиною. З метою визначення відмінностей кінетики найпоширеніших різновидів твердої біомаси України, можливих для спільного спалювання з вугіллям, було проведено аналогічне термогравіметричне дослідження, однак, крім деревини сосни та соломи пшениці, ще досліджувались пелети ріпаку, кукурудзи та сої.

Аналіз температурних рівнів та їх екстремуми у визначених стадіях термічного розкладу показав близькість цих значень для усіх досліджуваних видів біомаси. Однак, серед інших можна виділити зразки тирси сосни, які за рахунок

більшого виходу летких речовин мають майже на 20% більшу масову частку відповідної термічної стадії і меншу масу коксового залишку. Крім того, діапазони температур стадії зневоднення зразків тирси коротші на 34–78 °С порівняно з іншими зразками.

Таблиця 3

Кінетика виходу летких антрациту, біомаси та їх сумішей

	Передекспоненційний множник, 1/с	Енергія активації, Дж/моль	Температурний інтервал, °С
Антрацит (А)	-	-	-
Пелета сосни	3575749	79782	166-410
Пелета соломи	27665	74255	169-406
Суміш А і пелет сосни 50/50	60526	80326	180-406
Суміш А і пелет сосни 90/10	253	35038	229-401
Суміш А і пелет соломи 90/10	34136,62	75423	188-377

Таблиця 4

Кінетика вигорання коксу антрациту, біомаси та їх сумішей

	Передекспоненційний множник, 1/с	Енергія активації, Дж/моль	Температурний інтервал, °С
Антрацит (А)	0,949	51182	292-965
Пелета сосни	0,287	39749	413-940
Пелета соломи	0,323	39650	410-913
Суміш А і пелет сосни 50/50	0,214	39305	410-966
Суміш А і пелет сосни 90/10	0,456	45906	405-964
Суміш А і пелет соломи 90/10	0,409	44574	381-955

Результати розрахунку передекспоненційного множника (k_0) та енергії активації (E) для стадій зневоднення та виходу летких досліджуваних зразків палив, а також аналогічні дані досліджень з літературних джерел наведено у табл. 5-6.

На рис. 6 *a–в* зображено графічну залежність швидкості виходу летких від зворотної температури для досліджуваних зразків твердої біомаси та порівняння з іншими аналогічними дослідженнями для зразків тирси сосни та соломи пшениці. З рис. 6, *a* бачимо відмінність у швидкості виходу летких з пелети сосни порівняно з іншими досліджуваними зразками агрокультур. У порівнянні з отриманими у дослідженні результати для зразків тирси сосни та пелет соломи пшениці з такими у роботах інших авторів (див. табл. 6) (рис. 3.12, *a–б*), спостерігається переважно відмінність у швидкості виходу летких, що пояснюється відмінністю органічної та мінеральної складової зразків, різницею у підходах для розрахунку констант реакції, розбіжністю у швидкості нагрівання зразків під час експерименту.

Наведені вище дані вказують на суттєві відмінності у характеристиках твердої біомаси окремих видів.

Таблиця 5

Результати розрахунку передекспоненційного множника (k_0) та енергії активації (E) для стадії зневоднення досліджуваних зразків палив

	Швидкість нагрівання, °С/хв.	k_0 , 1/с	E , кДж/моль
Пелета сосни	20	2084,93	39,67
Пелета соломи пшениці	20	1,51	16,35
Пелета ріпаку	20	8,90	22,82
Пелета кукурудзи	20	13,18	23,32
Пелета сої	20	443,86	33,78
Тирса сосни [M.V. Gil 2010]	15	-	-
Сосна [Sema Yurdakul, 2009]	10	-	-
Тирса сосни [Мирошник М. М., 2013]	20	13,60	24,52
Солома пшениці [Yu Zhaosheng, 2008]	30	-	-
Солома пшениці [Мирошник М. М., 2013]	20	13,70	25,85
Соя [Maria Inez G. de Miranda, 2013]	5-20	-	-

Таблиця 6

Результати розрахунку передекспоненційного множника (k_0) та енергії активації (E) для стадії виходу летких досліджуваних зразків палив

	Швидкість нагрівання, °С/хв.	k_0 , 1/с	E , кДж/моль
Пелета сосни	20	20833,67	76,56
Пелета соломи пшениці	20	177,03	52,15
Пелета ріпаку	20	472,72	55,58
Пелета кукурудзи	20	2145,44	63,11
Пелета сої	20	740,19	56,57
Тирса сосни [M.V. Gil 2010]	15	$6,60 \cdot 10^8$	102,30
Сосна [Sema Yurdakul, 2009]	10	$7,32 \cdot 10^7$	122,56
Тирса сосни [Мирошник М. М., 2013]	20	164400	87,37
Солома пшениці [Yu Zhaosheng, 2008]	30	$1,57 \cdot 10^7$	115,59
Солома пшениці [Мирошник М. М., 2013]	20	92470	82,00
Соя [Maria Inez G. de Miranda, 2013]	5-20	-	182,00

Розмір частинок палива – дуже важлива характеристика, що з одного боку впливає на повноту вигорання палива, а з другого – на власні витрати енергії ТЕС на подрібнення палива у млинах. Метою наступного дослідження було визначити оптимальні розміри часточок трьох найпоширеніших різновидів біомаси в Україні – деревини сосни, соломи пшениці та лушпиння соняшника.

Експериментальні дослідження з визначення часу виходу летких речовин та вигорання коксозольного залишку твердої біомаси виконувались на лабораторній установці „Піроліз-М”.

Характерні значення часу та швидкості горіння для пелет сосни наведено в табл. 7. Аналіз отриманих даних показує, що час виходу летких суттєво менший за час вигорання частинок біомаси сосни при тому, що летких набагато більше ніж твердого вуглецю в частинці.

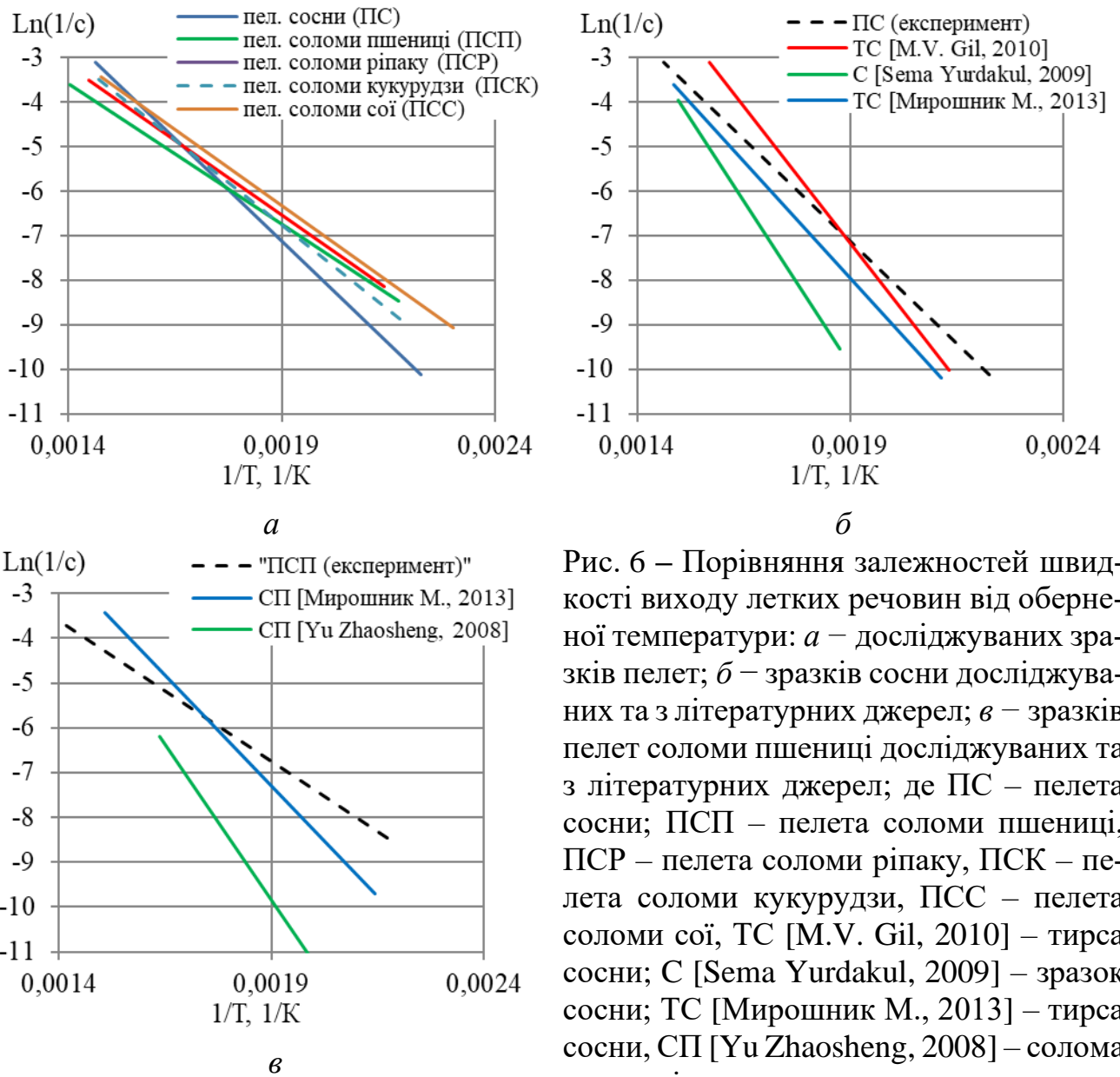


Рис. 6 – Порівняння залежностей швидкості виходу летких речовин від оберненої температури: *а* – досліджуваних зразків пелет; *б* – зразків сосни досліджуваних та з літературних джерел; *в* – зразків пелет соломи пшениці досліджуваних та з літературних джерел; де ПС – пелета сосни; ПСП – пелета соломи пшениці, ПСР – пелета соломи ріпаку, ПСК – пелета соломи кукурудзи, ПСС – пелета соломи сої, ТС [M.V. Gil, 2010] – тирса сосни; С [Sema Yurdakul, 2009] – зразок сосни; ТС [Мирошник М., 2013] – тирса сосни, СП [Yu Zhaosheng, 2008] – солома пшениці.

Тому при спільному спалюванні з вугіллям біомаса віддаватиме горючі леткі в зоні запалювання вугілля, недалеко від кореня факелу. Зменшення розміру частинок біомаси призводить як до зменшення часу виходу летких, так і до зростання швидкості горіння коксового залишку, тобто вже при низьких температурах вигорання відбувається в перехідній та дифузійній зонах горіння.

Агропелета порівняно з пелетою сосни відзначається меншою теплотою згорання та вищою зольністю. Дослідження її відбувалося за таких самих умов, як пелет сосни. Час виходу летких для агропелет (табл. 7) виявився приблизно на 10-20% менший, ніж у пелет сосни. При цьому час виходу летких у агропелет слабо залежить від розміру частинок і подальше подрібнення мало впливатиме на процес піролізу.

За технічними характеристиками пелети лушпиння соняшника мали найменшу теплоту згорання і найвищу зольність з досліджуваних твердих біопалив. Час виходу летких для лушпиння соняшника (табл. 7) виявився близьким до отриманих для агропелет і так само слабо залежить від розміру частинок. Тому

розмельювання до розміру меншого за 1,6 мм мало впливатиме на процес піролізу.

Таблиця 7

Характерний час (с) виходу летких речовин та вигорання коксового залишку при нагріванні подрібненої пелети сосни, соломи пшениці та лушпиння соняшника в установці Піроліз-М

Температура, °С	Розмір частинок, мм								
	сосни			соломи пшениці			лушп. соняшника		
	1,6-3	1-1,6	0,63-1	1,6-3	1-1,6	0,63-1	1,6-3	1-1,6	0,63-1
	вихід летких речовин								
450	31	26	17	21	18	17	-	22	21
550	20	16	12	20	17	14	12	11	14
650	20	14	13	12	17	10	15	17	12
750	-	-	13	-	-	-	-	-	-
	вигорання коксового залишку								
450	68	64	62	116	116	118	80	95	95
550	53	45	42	30	23	20	35	22	24
650	37	32	22	25	18	17	24	15	14
750	-	-	15	-	-	-	-	-	-

У четвертому розділі представлені розробки практичної реалізації технології ССБВ в Україні для котлів середньої потужності та енергетичних котлоагрегатів, під час реалізації яких були використані представлені результати експериментальних досліджень. А саме: представлено конструкції двох передтопків у вертикальному та горизонтальному виконанні для переведення вугільних котлів ДКВР на повне або часткове спалювання біомаси; запропоновано комплекс розробок для запровадження спільного спалювання у котлоагрегаті ТПП-210А, який включає реконструкцію пальника, розробку схеми системи подавання біомаси, позонний тепловий повірочний розрахунок та аналіз впливу впровадження технології на екологічність роботи котла.

Для запровадження технології ССБВ на котлах середньої потужності було обрано котли ДКВР з паливними типу ПТЛ-РПК, ТЧЗ, ТЛЗ та ТЛЗМ, які спроектовані для спалювання вугілля. Однак, тверда біомаса має меншу ніж у вугілля енергетичну та фізичну щільність, що унеможливорює безпосереднє запровадження ССБВ в існуючому котлі із збереженням необхідного часу перебування. В таких випадках використовують передтопки – теплотехнічні пристрої, що приєднуються до існуючих котлів та дозволяють збільшити час перебування палива і тим самим зберегти теплову потужність у випадку переведення котла на інше паливо. Було розроблено вертикальну конструкцію передтопку у виконанні, яке зображено на рис. 7. Геометричні розміри було визначено, виходячи з можливості заміщення теплової потужності котла ДКВР паропродуктивністю від 2,5 т/год. Конструкція передбачає, що стабілізація процесу спалювання в камері допалювання досягається спалюванням великих фракцій палива у щільному шарі в нижній камері допалювання. Суміщення спалювання у шарі з спалюванням у вихорі значно активізує процес спалювання над шаром, забезпечує взаємне підтримання шарового та над шарового горіння та знижує недопал палива. За

допомогою програмного пакету Ansys Fluent була створена геометрична модель передтопку та виконано тривимірний розрахунок процесу спалювання біомаси в передтопку з допалюванням в паливні котла ДКВР 2,5 (рис. 8). За прийнятою схемою, на підставі підбору способів подавання та витрат повітря, було обрано режим, який передбачав наступне: транспортне повітря з витратою 400 м³/год подається спільно із біомасою через патрубок вводу біомаси, вторинне повітря з витратою 342 м³/год – через нижній патрубок вторинного повітря, третинне повітря розподіляється на два потоки – 2000 м³/год подається через кільцеву щілину, а решта – 970 м³/год – через розподілений підвід знизу.

Запропонована конструкція вертикального передтопку має ряд особливостей, а саме: відносно велика металоємність, а відповідно і вартість, а також деяка складність монтажу. Тому, було розроблено спрощений варіант передтопку, що має горизонтальне розташування та дозволяє спалювання палив з вологістю більше 30% за рахунок подавання повітря змішаного з газами рециркуляції із топки з температурою суміші газів 400 °С. У передтопку реалізується попередня підготовка біомаси до спалювання, а саме: сушіння, вихід та займання летких, прогрів та займання частинок коксового залишку, скидання продуктів згоряння у котел. Вказане мало на меті інтенсифікувати процес сушіння та виходу летких з біомаси, а також знизити концентрацію окислювача у зоні підводу біомаси для розширення зони горіння летких і для подовження перебування частинок у зоні високих температур.

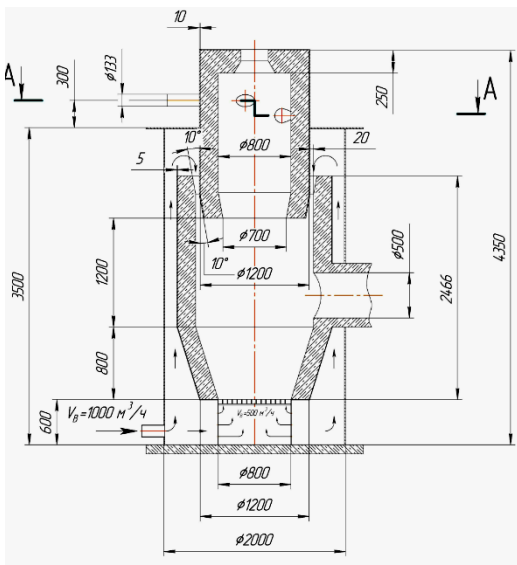


Рис. 7 – Ескіз передтопку у вертикальному виконанні.

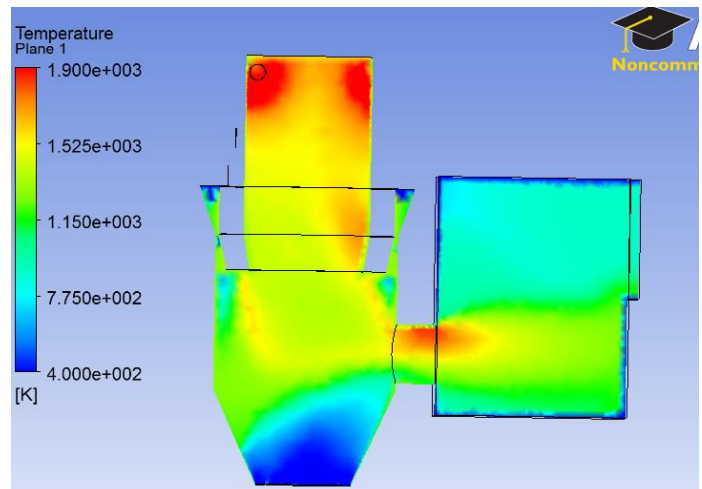


Рис. 8 – Розподіл температури у вертикальному передтопку та у топковому просторі.

Результати розрахунку горизонтального передтопку в пакеті Ansys Fluent наведено на рис. 9-10. Даний передтопок було виконано в металі. Термін його окупності у випадку повного заміщення вугілля непелетованою біомасою складає 4 роки, а капітальні вкладення оцінені у 4,5 млн. грн.

Для впровадження технології ССБВ на діючих на великих енергетичних котлах України було обрано схему прямого спалювання з окремою системою підготовки та подавання біомаси в котел, яка повинна забезпечити надійний та безпечний процес спалювання. Був обраний шлях мінімальної модернізації

вихрового пальника котла ТПП-210А тепловою потужністю до 70 МВт що передбачає встановлення в центрі існуючого пальника каналу подавання подрібнених пелет сосни. Розроблено ескізний проект пальника котла ТПП-210А для ССБВ (рис. 11).

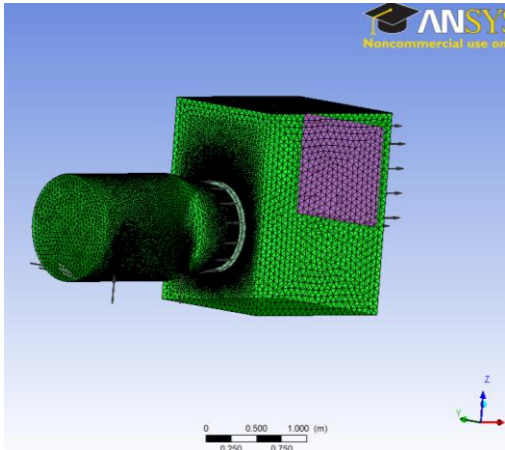


Рис. 9 – Модель горизонтального передтопка з топковою камерою ДКВР-2,5.

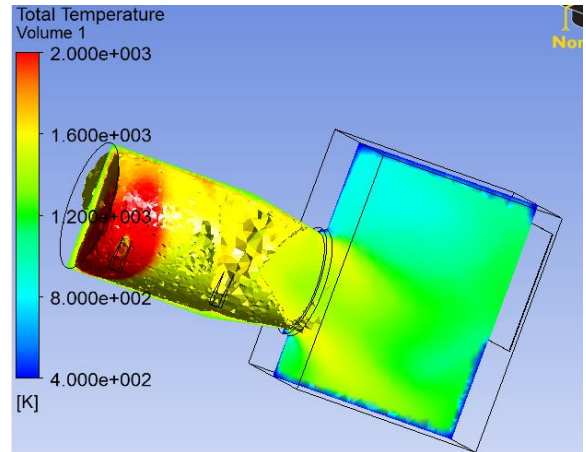


Рис. 10 – Поле та область температур $T > 1600$ К.

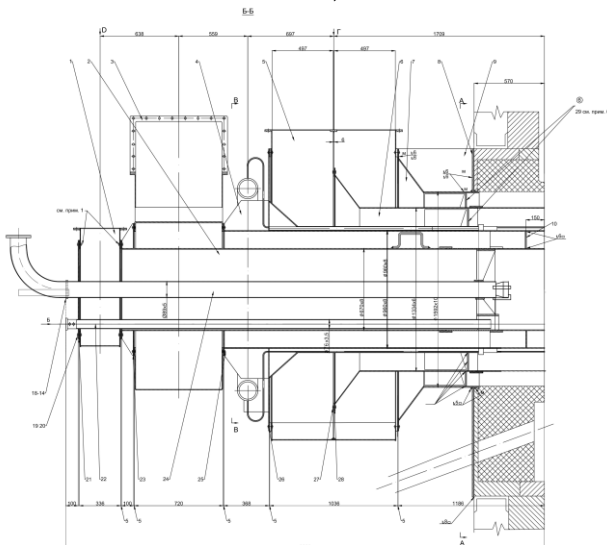


Рис. 11 – Пальник для сумісного спалювання вугілля з біомасою потужністю 70 МВт котла ТПП-210А.

Було проведено розрахунки пілотного проекту, що передбачає розміщення на ТЕС системи зберігання, транспортування, дозування та подавання пелет твердої біомаси в 1 або 2 з 12 пальників котла ТПП-210А і має на меті відпрацювання технічних рішень та демонстрацію технології з можливістю її наступного розвитку в Україні. Загальна схема системи подавання пелет у паливню котла зображено на рис. 12.

Метою проведення позонного теплового повірного розрахунку є контроль температури в НРЧ паливні, що впливає на якість умов видалення рідкого шлаку та температура газів на виході з паливні. Виконані розрахунки температур в паливні котла ТПП-210А для варіантів спалювання при номінальному навантаженні антрациту та пелет сосни окремо, а також їх суміші у співвідношенні 90%/10% у.п. (табл. 8). Було розраховано коефіцієнти корисної дії для проектного антрациту, пелет сосни та їх суміші що показують збільшення ККД котла

на 0,43% для суміші палив, пов'язану із меншими втратами в котлі з фізичною теплотою шлаку та меншим механічним недопалом біомаси.

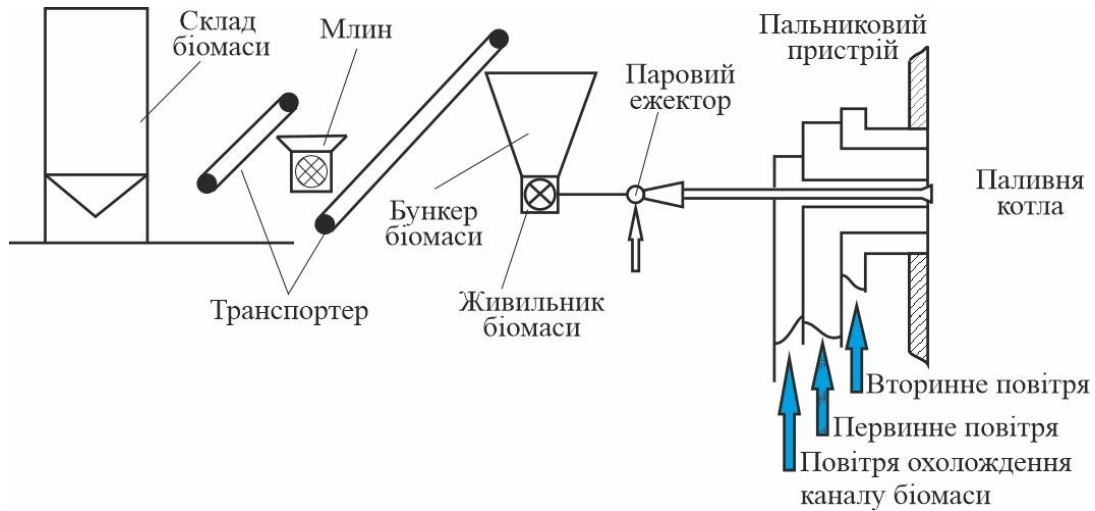


Рис. 12 – Схема подавання біомаси в модернізований паливник.

Таблиця 8

Результати теплового розрахунку по зонах котла ТПП-210А

№ зони	Параметр розрахунку	АШ	пел. сосни	суміш АШ 90% пел. сосн. 10%
1	Частка палива, яка згоріла у зоні, %	91,00	91,00	91,00
	Температура на виході із зони, °С	1749	1732	1744
2	Частка палива, яка згоріла у зоні, %	3,00	7,00	3,53
	Температура на виході із зони, °С	1519	1636	1533
3	Частка палива, яка згоріла у зоні, %	1,50	1,00	1,43
	Температура на виході із зони, °С	1435	1555	1449
4	Частка палива, яка згоріла у зоні, %	0,50	0,50	0,50
	Температура на виході із зони, °С	1347	1475	1361
5	Частка палива, яка згоріла у зоні, %	0	0	0
	Температура на виході із зони, °С	1313	1444	1327
6	Частка палива, яка згоріла у зоні, %	0	0	0
	Температура на виході із зони, °С	1136	1276	1152

Розрахунок показав зниження адіабатної температури спалювання при переході з чистого антрациту до суміші з біомасою, тому спостерігається тенденція до зниження температури на виході з нижньої радіаційної зони, зниження теплосприйняття поверхонь нагріву та відповідно збільшення температури димових газів на виході з паливни. При цьому, заміщення 10% теплоти антрациту пелетами сосни забезпечує задовільний рівень температур в паливні, однак суттєве збільшення частки біомаси потребуватиме реконструкції поверхонь нагріву конвективної шахти для забезпечення номінальної паропродуктивності котла.

Спалювання вугілля на ТЕС призводить до викидів в атмосферу газів включаючи оксиди сірки, азоту, двоокису вуглецю, а також тверді речовини. Для оцінки зменшення шкідливих викидів внаслідок впровадження спільного спалювання, використовувався елементний склад антрациту для еквівалентних сумішей антрациту з біомасою розрахований за даними теплового розрахунку. З

використанням нормативних методик ГКД 34.02.305—2002, що встановлює порядок визначення викидів основних забруднюючих речовин та парникових газів, що надходять у атмосферне повітря з димовими газами та утворюються під час спалювання органічного палива в енергетичних установках, були розраховані викиди оксидів сірки та азоту для звичайної роботи блоку та для випадків спільного спалювання вугілля з твердою біомасою (табл. 9 та 10).

Таблиця 9

Результати розрахунку викидів оксидів сірки

Паливо	SO ₂		Зменшення викидів, %	Річні виплати (5500 год./рік), млн. грн./рік
	г/ГДж	мг/м ³		
Антрацит (А) 100%	1401	3301	–	53,116
А 90%+пелет сосни 10%	1264	2968	9,8	47,920
А 90%+агропелет 10%	1278	2990	8,8	48,453
А 90%+пелет лушпиння 10%	1285	3009	8,3	48,714

Таблиця 10

Результати розрахунку викидів оксидів азоту

Паливо	NO ₂		Зменшення викидів, %	Річні виплати (5500 год./рік), млн. грн./рік
	г/ГДж	мг/м ³		
Антрацит (А) 100%	420,0	989	–	15,918
А 90%+пелет сосни 10%	397,0	932	5,5	15,044
А 90%+агропелет 10%	412,2	964	1,9	15,629
А 90%+пелет лушпиння 10%	427,3	1001	-1,7	16,204

У разі запровадження в Україні законодавчої ініціативи про звільнення від екологічного податку на викиди двоокису вуглецю для енергії, виробленої з біомаси, заміщуючи 10% теплової потужності CO₂-нейтральною твердою біомасою, для всіх трьох варіантів спільного спалювання на Трипільській ТЕС що розглядаються, отримаємо показник емісії двоокису вуглецю 91851 г/ГДж або 216 г/м³. За умови роботи блоку 5 500 годин на рік, виплати за викиди двоокису вуглецю для роботи на антрациті складуть 15,8 млн. грн., а після запровадження спільного спалювання – 14,2 млн. грн.

ВИСНОВКИ

В дисертаційній роботі на підставі результатів експериментальних та розрахункових досліджень повноти вигорання вугілля в залежності від частки біомаси при спалюванні пиловидного антрациту з подрібненою деревиною сосни в потоковому реакторі, процесів термічного розкладу зразків вугілля, деревини сосни та їх сумішей, інших різновидів твердої біомаси України в термогравіметричному аналізаторі, динаміки вигорання частинок біомаси з розмірами 0,63-1, 1-1,6 та 1,6-3 мм визначено оптимальні умови спільного спалювання антрациту та газового вугілля з твердою біомасою у котлоагрегатах, що сприяє вирішенню

важливої науково-прикладної задачі – диверсифікації паливної бази та поліпшення екологічних показників вугільних ТЕС України.

При виконанні роботи одержані такі нові науково-практичні результати.

1. Обґрунтовано доцільність застосування біомаси як додаткового палива для факельних котлоагрегатів, основним паливом для яких є вугілля різного ступеню метаморфізму. Літературний огляд експериментальних досліджень спільного спалювання біомаси з вугіллям показав неоднозначні результати щодо наявності синергетичного ефекту в процесі їх взаємодії, що вказує на необхідність проведення таких досліджень для вітчизняних біомаси та вугілля.
2. Експериментально встановлено можливість ефективного факельного спалювання донецького антрациту з деревиною сосни в потоковому реакторі. Найбільша повнота вигорання антрациту забезпечується його заміщення деревиною сосни з тепловою часткою 9,3 %.
3. Експериментально встановлено, що під час факельного спалювання, деревина забезпечує на 7-12% більшу повноту вигорання антрациту, ніж природний газ, за рахунок більшої випромінюючої здатності.
4. Експериментально встановлені теплові частки заміщення газового вугілля деревиною сосни, лушпинням соняшника та соломою пшениці що забезпечують максимальний ступінь вигорання вугілля під час факельного спалювання.
5. Отримано кінетичні характеристики спалювання найпоширенішої видів біомаси України. Порівняння отриманих даних з результатами інших досліджень показало суттєві відмінності в швидкості реагування, що свідчить про необхідність визначення кінетичних характеристик для кожного палива.
6. В умовах лабораторної установки визначено, що оптимальний з точки зору швидкості горіння часточок пелет деревини сосни, соломи пшениці та лушпиння соняшника є розмір 1-1,6 мм.
7. Розроблено конструкції двох вихрових передтопків для повного або часткового заміщення вугілля біомасою у вугільних котлах ДКВР паропродуктивністю 2,5 т/год або більше.
8. Розроблено схему спільного факельного спалювання вугілля та пелет з рослинної сировини на котлах ТПП-210А та проект модернізованого пальника, що передбачає заміщення до 10% теплової частки вугілля за рахунок біомаси.
9. Показано, що при заміщенні 10% теплової частки антрациту пелетами сосни на котлі ТПП-210А забезпечується прийнятний рівень температур в паливні та збільшується ККД котла на 0,43% у порівнянні зі спалюванням 100% антрациту. При цьому, значне збільшення частки біомаси потребуватиме реконструкції поверхонь нагріву конвективної шахти для забезпечення номінальної паропродуктивності котла.
10. Показано зменшення викидів оксидів сірки та азоту при заміщенні 10% теплової частки антрациту пелетами сосни на котлі ТПП-210А, що призводить до економії 5,81 млн. грн щорічно на екологічних виплатах.
11. Результати роботи використані організаціями ВАТ «Энергетическое и нефтяное оборудование»; асоціацією «Український пелетний союз»; Трипільською ТЕС ПАТ «Центренерго», що підтверджено Актами впровадження.

ОСНОВНІ ПУБЛІКАЦІЇ ПО ТЕМІ ДИСЕРТАЦІЇ

1. Technology of Anthracite and Solid Biofuels Co-Firing in Pulverized Coal Boilers of TPP and CHP / N.I. Dunaevska, D.L. Bondzyk, M.M. Nehamin, Ye.S. Miroshnichenko, I.V. Beztseynyi, V.Ya.Yevtukhov, T.S. Shudlo // Science and Innovation. – 2020. – №16 (5). – P.86-96. DOI: 10.15407/scine16.05.079. *(Здобувач надав вихідні данні для розрахунку полів швидкостей у пальнику для спільного спалювання біомаси з вугіллям).*
2. Dunaievska N. Co-combustion of solid biomass in pulverized anthracite-coal firing boilers / N. Dunaievska, M. Chernyavskiy, T. Shchudlo // Ukrainian Food Journal. – 2016. – Volume 5. – Issue 4. – P. 748–764. DOI: 10.24263/2304-974X-2016-5-4-14. *(Здобувач брав участь у проведенні експериментів, розрахував константи швидкості реакції зразків твердої рослинної біомаси).*
3. Dunayevska Natalya. Thermal destruction kinetics of coal and solid biomass mixtures / Natalya Dunayevska, Yaroslav Zasiadko, Taras Shchudlo // Ukrainian Food Journal. – 2018. – Volume 7. Issue 4. – P.738–753. DOI: 10.24263/2304-974X-2018-7-4-17. *(Здобувач виконував обробку експериментальних даних).*
4. 3-dimensional and feasibility study of biomass/coal co-combustion burner / N. Dunayevska, Ya. Zasyadko, P. Zasyadko, T. Shchudlo // Food and Environment Safety. – 2017. – Volume 16. – Issue 2. – P.77–91. *(Здобувач брав участь у проведенні експериментів, розрахував константи швидкості реакції зразків твердої рослинної біомаси).*
5. Исследование особенностей горения смесей коксов углей различной степени метаморфизма и коксов биомассы / И.В. Бесценный, Т.С. Щудло, Н.И. Дунаевская, А.И. Топал // Теплоэнергетика. – 2013. – №12. – С.4–8. DOI: 10.1134/S0040363613120035. *(Здобувач брав участь у проведенні експериментів, виконав розрахунки питомої швидкості горіння коксів біомаси).*
6. Технологія та пальник для спалювання біомаси як допоміжного палива в факельних котлоагрегатах / О.Ю. Майстренко, Н.И. Дунаевська, Я.І. Засядько, Д.Л. Бондзик, Т.С. Щудло, В.Г. Вифатнюк // Наука та інновації. – 2012. – №4. – С.83–88. DOI: doi.org/10.15407/scin8.04.083. *(Здобувач підготував вихідних даних для розрахунку швидкості горіння частинок біомаси у передтопку).*
7. Экспериментальное исследование процесса совместного факельного сжигания антрацита с древесной биомассой / Н.И. Дунаевская, Я.И. Засядько, Т.С. Щудло, I.В. Бесценный, Д.Л. Бондзик // Энерготехнологии и ресурсосбережение. – 2009. – №3. – С.10–17. *(Здобувач брав участь у проведенні експериментів, виконував обробку експериментальних даних).*
8. Технологии совместного сжигания биомассы и угля в пылеугольных топках / Н.И. Дунаевская, Я.И. Засядько, И.С. Шупик, Т.С. Щудло // Экотехнологии и ресурсосбережение. – 2007. – №3. – С.3–8. *(Здобувач провів аналіз сучасного стану технологій спільного спалювання біомаси та вугілля у пиловугільних паливнях).*
9. Моделювання та експериментальні дослідження спільного спалювання біомаси та вугілля / Ю.П. Корчевой, Н.И. Дунаевська, Я.І. Засядько Т.С. Щудло // Відновлювальна енергетика.– 2007.– №1(8).– С.9–15. *(Здобувач брав участь у обробці літературних даних та написанні літературного огляду).*
10. Досвід впровадження спільного спалювання вугілля з біомасою на існуючих

енергетичних котлоагрегатах / Н.И. Дунаевская, Г.А. Вольчин, Я.І. Засядько, А.А. Потапов, Т.С. Щудло // Новини енергетики. – 2011. – №12. – С.34–43. (Здобувач брав участь у обробці літературних даних та написанні літературного огляду).

11. Щудло Т.С. Дослідження кінетичних характеристик зразків твердої біомаси / Т.С. Щудло, Н.І. Дунаєвська // Проблеми загальної енергетики. – 2016. – №1(44). – С.18–23. DOI: 10.15407/pge2016.01.018. (Здобувач підготував проби та розраховував константи швидкості реакції зразків твердої рослинної біомаси).

12. Дунаєвська Н.І. Спільне спалювання біомаси та антрациту в пиловугільних котлоагрегатах / Н.І. Дунаєвська, Д.Л. Бондзик, Т.С. Щудло // Екологія и промисленность. – 2016. – №4. – С.87–96. (Здобувач розраховував константи швидкості горіння рослинної біомаси, підготував вихідні дані для розрахунку швидкості горіння частинок біомаси у передтопку).

13. Математична модель процесів спільного спалювання біомаси з вугіллям в котлі теплової електростанції / Н.І. Дунаєвська, Я.І. Засядько, П.Я. Засядько, Т.С. Щудло // Электронное моделирование. – 2017. – Т.39. – № 3. – С.89–104. (Здобувач надав вихідні дані для розрахунку процесів спільного спалювання біомаси з вугіллям в котлі теплової електростанції).

14. Дунаєвська Н.І. Дослідження кінетики термічної деструкції сумішей вугілля та твердої біомаси / Н.І. Дунаєвська, Я.І. Засядько Т.С. Щудло // Электронне моделювання. – 2018. – Т. 40. № 5. – С.91–110. DOI: 10.15407/emodel.40.05.091. (Здобувач виконав обробку експериментальних даних).

15. Дослідження кінетики горіння коксозольних залишків різних видів твердого біопалива / І.В. Безценний, Д.Л. Бондзик, Т.С. Щудло, Н.І. Дунаєвська // Вугільна теплоенергетика: шляхи реконструкції та розвитку: 15-та міжнар. наук.-практич. конф. Зб. наук. праць. – Київ: Ін-т вугільних енерготехнологій НАН України, 2019. – С. 8–11. (Здобувач брав участь у проведенні експериментів з дослідження кінетики горіння коксозольних залишків різних видів твердого біопалива).

16. Дослідження особливостей спільного спалювання вугілля марок П та Г з твердим біопаливом в потоковому реакторі / І.В. Безценний, Н.І. Дунаєвська, Д.Л. Бондзик, В.Я. Євтухов, Т.С. Щудло // Вугільна теплоенергетика: шляхи реконструкції та розвитку: 14-та міжнар. наук.-практич. конф. Зб. наук. праць. – Київ: Ін-т вугільних енерготехнологій НАН України, 2018. – С. 146–150. (Здобувач брав участь у проведенні експериментів).

17. Особливості організації спільного спалювання твердого біопалива та вугілля на ТЕС України на прикладі котла ТПП-210А / Д.Л. Бондзик, Н.І. Дунаєвська, Є.С. Мірошніченко, І.В. Безценний, Т.С. Щудло, Н.І. Музалевська // Вугільна теплоенергетика: шляхи реконструкції та розвитку: 14-та міжнар. наук.-практич. конф. Зб. наук. праць. – Київ: Ін-т вугільних енерготехнологій НАН України, 2018. – С. 105–113. (Здобувач надав вихідні дані для розрахунку процесів спільного спалювання біомаси з вугіллям в котлі теплової електростанції).

18. Совместное сжигание биомассы и угля украинских месторождений / Ю.П. Корчевий, Н.І. Дунаєвська, Я.І. Засядько Т.С. Щудло // «Энергоэффективность»: міжнар. наук.-практич. конф. Зб. наук. праць. – Київ: НАН України, 2008. – С. 132–135. (Здобувач брав участь у проведенні експериментів).

19. Анализ перспектив внедрения технологий совместного сжигания биомассы и угля на пылеугольных ТЭС / Н.І. Дунаєвська, Я.І. Засядько Т.С. Щудло // Угольная теплоэнергетика: проблемы реабилитации и развития: 3-я міжнар. наук.-практич. конф. Зб. наук. праць. – Алушта: Ін-т вугільних енерготехнологій НАН України, 2006. – С. 86. (*Здобувач провів аналіз сучасного стану технологій спільного спалювання біомаси та вугілля у пиловугільних паливнях*).

АНОТАЦІЯ

Щудло Т.С. Спільне спалювання біомаси та вугілля українських покладів в факельних котлоагрегатах. – Кваліфікаційна наукова праця на правах рукопису.

Дисертація на здобуття наукового ступеня кандидата технічних наук (доктора філософії) за спеціальністю 05.14.06 «Технічна теплофізика і промислова теплоенергетика». – Національний університет харчових технологій, Київ, 2020.

Дисертація присвячена визначенню оптимальних умов спільного спалювання вугілля з твердою біомасою у вітчизняних котлоагрегатах. В потоковому реакторі проведено експериментальні дослідження зі спільного факельного спалювання антрациту з деревиною сосни, а також газового вугілля з пелетами сосни, соломи пшениці та лушпинням соняшника та визначені їх оптимальні співвідношення, що забезпечують найбільший ступінь вигорання суміші палив. Наведено методіку обрахунку та на основі термогравіметричних досліджень термічного розкладу, розраховані кінетичні константи для стадій зневоднення, виходу летких та горіння коксового залишку для сумішей зразків антрациту з пелетами сосни та соломи пшениці, а також для зразків твердої біомаси, доступної в Україні. Представлено результати експериментів з визначення оптимальних з точки зору швидкості горіння та витрат на подрібнення розмірів часточок біомаси пелет деревини сосни, соломи пшениці та лушпиння соняшника в лабораторній установці киплячого шару. Розроблено схему запровадження технології спільного спалювання на котлах ТПП-210А. Представлено результати теплового розрахунку котла ТПП-210А для заміщення 10% його потужності пелетами сосни.

Ключові слова: спільне спалювання вугілля, біомаса, пиловугільний факел, кінетичні характеристики, антрацит, газове вугілля

ABSTRACT

Shchudlo T.S. Biomass and Ukrainian deposits coal co-firing features in pulverized coal boilers. – Qualifying scientific work on the rights of the manuscript.

Thesis for candidate degree; specialization 05.14.06 – Engineering Thermal Physics and Industrial Heat Power Engineering. – National University of Food Technologies, Kyiv, 2020.

The dissertation is devoted to determination of optimal conditions of coal with solid biomass co-firing in domestic boilers. Experimental studies of anthracite with pine wood co-firing, as well as bituminous coal with pine pellets, wheat straw and sunflower husks were carried out in the flow reactor and their optimal ratios were

determined, which provide the highest degree of fuel mixture combustion. The method of calculation and on the basis of thermogravimetric studies of thermal decomposition, calculated kinetic constants for the stages of dehydration, volatile and charcoal combustion residue for mixtures of anthracite samples with pellets of pine and wheat straw, as well as for samples of solid biomass of Ukraine. The results of experiments to determine the optimal in terms of burning rate and grinding costs of biomass pine wood pellets particle size, wheat straw and sunflower husks in a laboratory fluidized bed stand are presented. The scheme of introduction of co-firing technology on TPP-210A boilers is developed. The results of thermal calculation of the boiler TPP-210A to replace 10% of its capacity with pine pellets are presented.

For the first time, the possibility of Donetsk anthracite efficient pulverized combustion with pine wood in a flow reactor was experimentally established. The share of anthracite replacement by pine wood was established, which provides the highest completeness of anthracite burning in the torch, which is 9.3% by heat. It has been experimentally established that, with the same share of anthracite substitution in all experimental modes, wood provides 7-12% greater completeness of coal combustion than natural gas due to greater emissivity. Experimentally established thermal particles of replacement of gas coal with biomass that provide the maximum degree of coal burning during pulverized combustion, and which are for pine wood - 11%, sunflower husk - 7% and wheat straw - 12%. Kinetic constants for all stages of thermal decomposition of the most common solid biomass of Ukraine samples were obtained and compared with known literature data, which showed significant differences in its reaction rate, which indicates the need to determine the kinetic characteristics for each fuel.

Designs of two vortex pre-furnaces (horizontal and vertical) for complete replacement of coal with biomass in coal boilers DKVR 2,5 t / h or for partial replacement of coal with steam productivity 4, 6,5, 10 t / h are developed. The horizontal version of the pre-furnace is made. The horizontal version of the pre-furnace is made. It is shown that when replacing 10% of the thermal fraction of anthracite with pine pellets on the boiler TPP-210A provides an acceptable level of temperature in the fuel and increases the efficiency of the boiler by 0.43% compared to burning 100% anthracite. It is shown to reduce emissions of sulfur oxides by 9.8% and nitrogen oxides by 5.5% with the introduction of joint combustion of pine pellets with anthracite on the boiler TPP-210A, which leads to savings of UAH 5.81 million annually on environmental payments.

Key words: coal combustion, biomass, pulverized coal torch, kinetic characteristics, anthracite, bituminous coal