

УДК 621.001.2

DOI: 10.15587/2312-8372.2019.183054

ДОСЛІДЖЕННЯ ЕФЕКТИВНОСТІ РОБОТИ ТВЕРДОПАЛИВНОГО КОТЛА НА РОСЛИННІЙ БІОМАСІ

Голуб Г. А., Цивенкова Н. М., Чуба В. В., Кухарець С. М., Ярош Я. Д., Терещук М. Б.

ИССЛЕДОВАНИЕ ЭФФЕКТИВНОСТИ РАБОТЫ ТВЕРДОТОПЛИВНОГО КОТЛА НА РАСТИТЕЛЬНОЙ БИОМАССЕ

Голуб Г. А., Цивенкова Н. М., Чуба В. В., Кухарець С. Н., Ярош Я. Д., Терещук М. Б.

RESEARCH OF THE OPERATION EFFICIENCY OF VEGETABLE BIOMASS-OPERATED SOLID FUEL BOILER

Golub G., Tsyvenkova N., Chuba V., Kukharets S., Yarosh Ya., Tereshchuk M.

Об'єктом дослідження слугує процес забезпечення рівномірного розподілу палива по поверхні горіння топкової камери твердопаливного котла, що працює на біомасі. Рівномірний розподіл палива по поверхні горіння є одним з важливих важелів усунення явищ його хімічного та механічного недоспалювання, що підвищує ефективність роботи котельного обладнання. Однією з проблем дослідження даного питання є відсутність достатньої теоретичної бази і практичного досвіду щодо процесу хіміко-термічної конверсії рослинної біомаси в інші види енергії.

Запропоновано підхід, в основу якого покладена гіпотеза про можливість підвищити ефективність роботи котельного обладнання на рослинній біомасі шляхом встановлення інтенсивного і якісного процесу горіння, забезпечивши рівномірний розподіл палива по поверхні горіння. А також виявити закономірності та зазначити методи оптимізації структури конструкцій котельного обладнання шляхом його адаптації до рослинної сировини. Реалізація такого підходу здійснювалася шляхом проведення багатofакторного експерименту. Під час експерименту визначалася залежність коефіцієнту нерівномірності розподілу палива по площині горіння від висоти розташування сопла навантажувача, кута нахилу регульовальної плити навантажувача до поверхні дзеркала горіння і масової подачі палива.

В результаті дослідження отримано практичні результати, представлено математичні залежності коефіцієнту нерівномірності розподілу палива по поверхні горіння від зазначених змінних факторів у вигляді поліному другого порядку.

Отримані результати досліджень дозволять підвищити ефективність процесу виробництва теплоти з низькосортних твердих палив рослинного

походження в котельних установках, сприятимуть їх більш широкому використанню, та підвищенню екологічної складової самого процесу.

Результати дослідження цікаві як для виробників котельного обладнання на рослинній сировині, так і для його користувачів, що мають за мету спалювати наявну в господарстві біомасу для задоволення потреб в енергії.

Ключові слова: котельне обладнання, поверхня горіння, пневмомеханічний навантажувач, рослинна біомаса.

Объектом исследования служит процесс обеспечения равномерного распределения топлива по поверхности горения топочной камеры твердотопливного котла, работающего на биомассе. Равномерное распределение топлива по поверхности горения является одним из важных рычагов устранения явлений его химического и механического недожога, что повышает эффективность работы котельного оборудования. Одной из проблем исследования данного вопроса является отсутствие достаточной теоретической базы и практического опыта процесса химико-термической конверсии растительной биомассы в другие виды энергии.

Предложен подход, в основу которого положена гипотеза о возможности повысить эффективность работы котельного оборудования на растительной биомассе путем организации интенсивного и качественного процесса горения, обеспечив равномерное распределение топлива по поверхности горения. А также выявить закономерности и указать методы оптимизации структуры конструкций котельного оборудования путем его адаптации к растительному сырью. Реализация такого подхода осуществлялась путем проведения многофакторного эксперимента. Во время эксперимента определялась зависимость коэффициента неравномерности распределения топлива по плоскости горения от высоты расположения сопла загрузчика, угла наклона регулирующей плиты загрузчика к поверхности зеркала горения и массовой подачи топлива.

В результате исследования получены практические результаты, представлены математические зависимости коэффициента неравномерности распределения топлива по поверхности горения от указанных переменных факторов в виде полинома второго порядка.

Полученные результаты исследований позволят повысить эффективность процесса производства теплоты из низкосортных твердых топлив растительного происхождения в котельных установках, способствовать их более широкому использованию, и повышению экологической составляющей самого процесса.

Результаты исследования интересны как для производителей котельного оборудования на растительном сырье, так и для его пользователей, имеющих целью сжигать имеющуюся в хозяйстве биомассу для удовлетворения потребностей в энергии.

Ключевые слова: котельное оборудование, поверхность горения, пневмомеханический загрузчик, растительная биомасса.

1. Вступ

Останнє десятиріччя активно ведуться роботи в напрямку створення обладнання, яке працює на альтернативних джерелах енергії, зокрема на біомасі. Біомаса набула популярності серед товаровиробників за рахунок високої здатності до відновлення, екологічної чистоти та розповсюдженості. Найбільш очевидним способом отримання енергії з біомаси є технологія її прямого спалювання в котлах. Дана технологія є достатньо вивченою, відносно простою та комерційно доступною [1]. Однак залишається актуальним питання знаходження методів підвищення інтенсивності та якості горіння низькосортних палив (стрижнів та качанів кукурудзи, лузги соняшника, лігніну, соломи зернових, а також гранул та брикетів на їх основі) [2]. Також важливим є питання підвищення енергетичної ефективності та екологічної безпеки самого процесу прямого спалювання біомаси в котлах [3].

Дані питання намагаються вирішувати технологічними та конструктивними методами. Зокрема, визначаються основні конструктивні особливості котельного обладнання залежно від обраної технології спалювання [4, 5]:

- конфігурація та розміри топкової камери;
- геометрична форма та спосіб очищення поверхонь нагрівання;
- ступінь екранування;
- система уловлювання і видалення золи;
- система уловлювання і видалення летючих компонентів.

До технологічних методів відносять [6, 7]:

- організацію подачі газів дуття в зону горіння (одно-, дво- чи триступенева) і ступінчасте спалювання палива;
- методи покращення теплообміну в конвективній частині;
- рециркуляцію димових газів;
- методи подачі палива в топкову камеру котла та ін.

На сьогодні технологія дозволяє за допомогою автоматизації керування спалюванням біомаси, досягти ефективних показників при досить обмежених капіталовкладеннях [8].

Однак, суттєвим резервом покращення спалювання біомаси є питання рівномірності розподілу палива з біомаси по поверхні горіння, що впливає на інтенсивність і якість процесу згорання палива в котлах. Вивчення даного питання дозволить підвищити ефективність процесу прямого спалювання біомаси. Завдяки рівномірності розподілу біомаси по поверхні горіння товщина палива в топковій камері буде відносно однаковою, що забезпечить постійну високу температуру в зоні горіння і, як наслідок, стабільність самого процесу прямого спалювання біомаси в котлах.

Отже, вивчення процесу рівномірного розподілу палива по поверхні горіння топкової камери котла є актуальною задачею, вирішення якої дозволить підвищити ефективність процесу спалювання палив на основі біомаси.

2. Об'єкт дослідження та його технологічний аудит

Об'єктом дослідження слугує процес забезпечення рівномірного розподілу палива по поверхні горіння топкової камери твердопаливного котла,

що працює на біомасі. Пояснюється наявність виникнення, за цих умов, стабільної температури в зоні горіння топкової камери котла. Підкреслюється, що за цих умов, зникає небезпека порушення стабільності процесу горіння внаслідок локального вигорання палива і утворення зон, де процес горіння не протікає та зон зависання палива. Зазначається, що проектування засобів подачі палива в зону горіння та дослідження їх техніко-експлуатаційних параметрів дозволить регулювати процес та підвищити ефективність виробництва теплоти шляхом спалювання низькосортного палива в топкових камерах котлів.

Певною вадою рішення, що пропонується, постає складність рекомендувати універсальний метод забезпечення вище зазначеного для більшості типів котельного обладнання, через відмінні фізико-механічні властивості палив та різні конструкцій котлів і їх призначення.

Однією з проблем дослідження є відсутність достатньої теоретичної бази і практичного досвіду щодо процесу хіміко-термічної конверсії рослинної біомаси в інші види енергії. Роботи в даному напрямку нерідко зводяться до визначення сукупного впливу фізико-хімічних характеристик певного виду рослинної сировини та техніко-експлуатаційних параметрів конкретного виду теплотехнічного обладнання на ефективність роботи даного обладнання. Отримані результати, як правило, можна використовувати під час експлуатації лише певної категорії теплотехнічного обладнання зі схожим призначенням та подібними техніко-експлуатаційними параметрами для зазначеного виду біомаси.

Вказане є причиною стримування широкого використання рослинної біомаси як для виробництва енергії в теплотехнічному обладнанні загалом, так і теплоти в твердопаливних котлах зокрема.

3. Мета за задачі дослідження

Метою дослідження є підвищення ефективності процесу виробництва теплоти з низькосортних палив в твердопаливних котлах шляхом забезпечення рівномірного розподілу палива по поверхні горіння топкової камери.

Для досягнення поставленої мети необхідно розв'язати наступні задачі:

1. Розробити конструкцію навантажувача низькосортного рослинного палива до твердопаливного котла.
2. Методом проведення багатофакторного експерименту визначити раціональні параметри процесу розподілу частинок низькосортного рослинного палива по поверхні горіння котла.

4. Дослідження існуючих рішень проблеми

Збільшення світового споживання енергії та потреба в стійкому промисловому виробництві вказують на те, що відновлювальні ресурси можуть стати ключовими учасниками майбутнього енергетичного розвитку [9]. Біомаса є основою плавного переходу від використання викопних палив до розвитку ринку низько-вуглецевих технологій [10, 11]. Однак виробництво енергії з рослинної біомаси пов'язане з рядом труднощів, такими як: неоднорідність її структури; низький питомий енерговміст; висока гігроскопічність, а, отже, і вологість; низька температура плавлення золи та висока парусність [12, 13].

Якщо розглядати найбільш простий та поширений спосіб отримання теплової енергії, то він полягає у спалюванні біомаси в котлах в нерухомому шарі на колосникових решетах. В роботах [14, 15] досліджено спалювання паливної суміші соломи у колосникових котлах. Проведені дослідження показали ефективність застосування спалювання соломи як із показників теплової та екологічної ефективності. Проте в роботі [15] автори відмічають, що суттєвий недолік використання соломи зернових полягає в утворенні агломератів від спікання золи соломи під час її горіння. Одне із ефективних рішень, для запобігання спікання при спалюванні соломи є застосування спалювання в киплячому шарі. Спалювання в киплячому шарі дозволяє мінімізувати контакт палива із поверхнею технологічного обладнання та не дозволяє спікатися частинам палива між собою.

Аналіз наукових праць [16, 17] свідчить, що високоефективним та економічно вигідним способом виробництва теплоти з рослинних залишків сільськогосподарського виробництва є процес її прямого спалювання в твердопаливних котлах з циркулюючим киплячим шаром. Однією із проблем застосування спалювання у киплячому шарі є необхідність досягнення рівномірного розподілу паливної суміші по дзеркалу горіння котла. При нерівномірному розподілі палива утворюються локальні зони, які мають різний аеродинамічний опір. В зонах зі значною товщиною шару палива аеродинамічний опір є відповідно більшим, що призводить до зменшення кількості повітря, що підводиться до палива. Також, в зазначеній зоні через відсутність потрібної кількості повітря знижується енерговиділення, яке супроводжується зниженням температури шару палива та погіршенням умов та повноти згорання палив.

Тому важливу роль відіграють експериментальні дослідження в напрямку підвищення ефективності процесу спалювання твердого палива з біомаси шляхом забезпечення найменшої нерівномірності розподілу частинок сировини по поверхні горіння.

5. Методи дослідження

5.1. Матеріали та обладнання, що використовувалися під час експериментальних досліджень

Дослідження впливу рівномірності розподілу палива по поверхні горіння котла дозволить знайти раціональні параметри пневмомеханічного навантажувача палива, при яких інтенсивність і якість процесу горіння буде найвищою. Це дозволить розробити технологічну схеми процесу спалювання низькосортних палив з біомаси та конструкцію установки промислового зразка.

До проведення досліджень з розподілу частинок низькосортного рослинного палива було здійснено попередні дослідження з визначення геометричних розмірів ділянки розкидання палива. Визначалася довжина і ширина ділянки поверхні, на яку припадає падіння основної маси палива. Також визначалися розміри відстані незадіяної зони, яка склала 0,26 м. Це відстань від сопла пневмомеханічного навантажувача, на якій падіння частинок палива не спостерігалось. Ділянка розкидання повинна покривати площу, яка

забезпечує рекомендовану теплову напруженість топкового пристрою. Отримані в результаті досліджень дані враховувалися під час проведення експериментів нерівномірності розподілу частинок палива в топковій камері.

З метою вивчення нерівномірності розподілу палива використано експериментальний стенд, який складався з удосконаленої під пневмомеханічний навантажувач конструкції котла номінальною потужністю 300 кВт (ALTER TRIO «КТ-3Е» (Україна) рис. 1, штатива і переробленого під котел пневмомеханічного навантажувача рис. 2 (базова модель закидача пневмомеханічного (ЗП)).

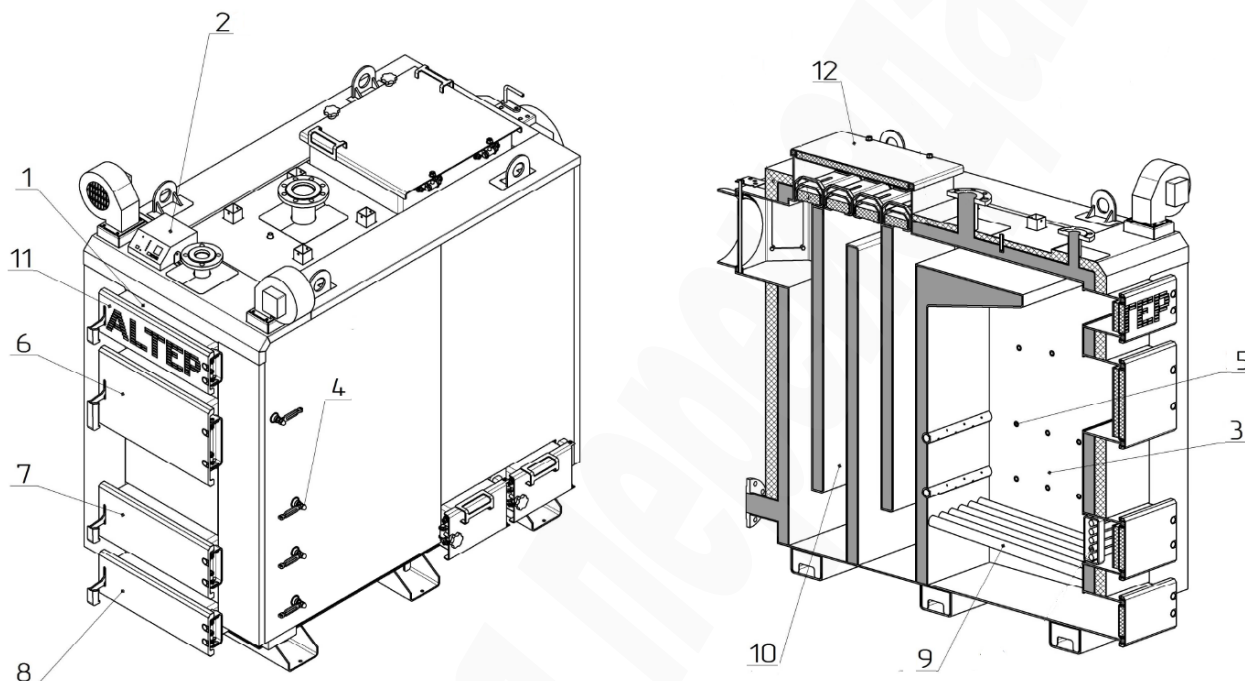
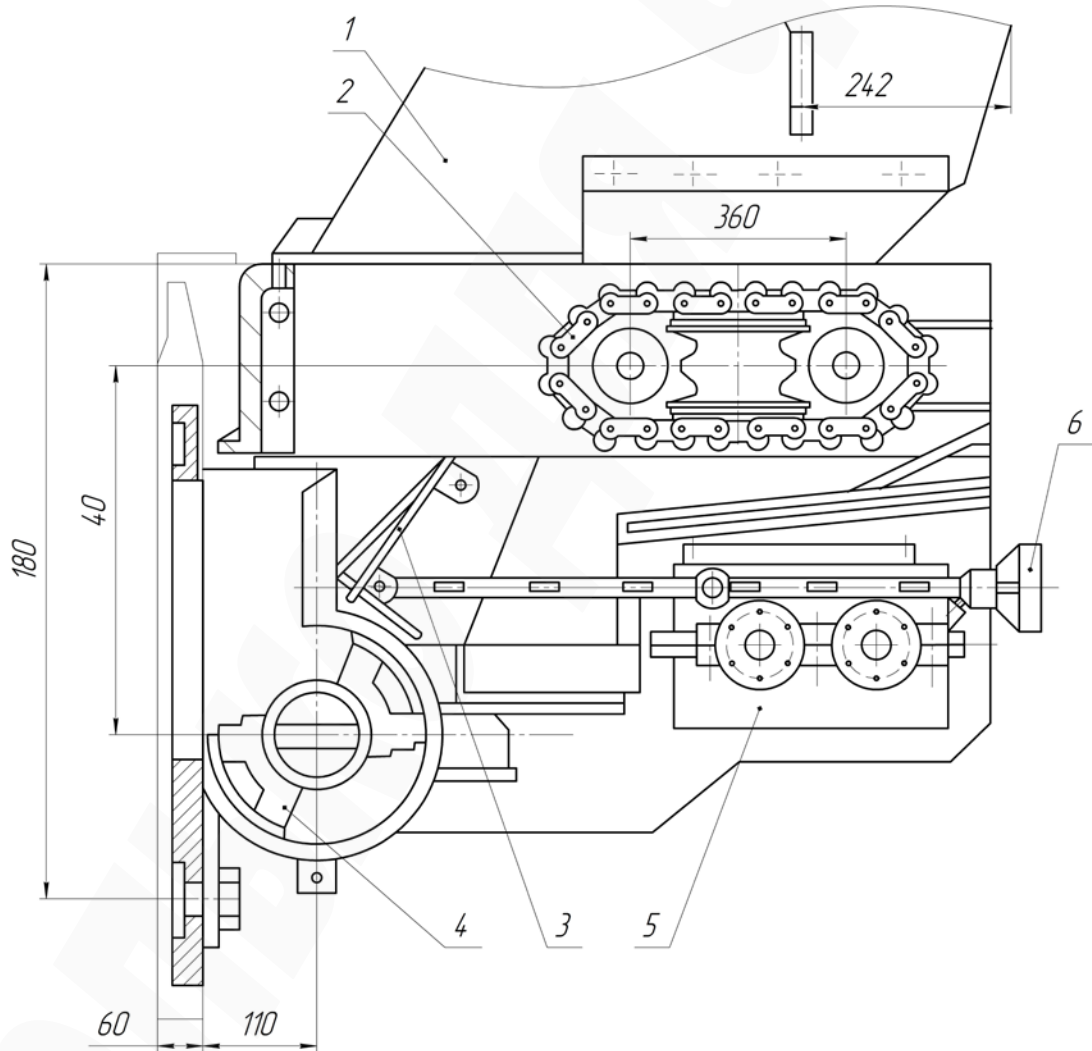


Рис. 1. Зовнішній вигляд і основні елементи котла ALTER TRIO «КТ-3Е»:
1 – корпус котла; 2 – мікропроцесорний блок керування роботою систем котла;
3 – камера згорання; 4 – ручки керування повітряними заслінками; 5 – форсунки подачі повітря; 6 – дверцята завантаження твердого палива, 7 – дверцята ревізійні; 8 – дверцята зольника; 9 – колосники; 10 – конвекційний теплообмінник, 11 – дверцята верхньої полиці; 12 – дверцята конвекційної частини котла



a



б

Рис. 2. Пневмомеханічний навантажувач твердого палива на основі біомаси:
a – загальний вигляд; *б* – складальне креслення: 1 – бункер для паливної біомаси; 2 – живильник; 3 – плита регульовальна; 4 – ротор; 5 – варіатор імпульсний; 6 – регулятор дальності закидання

Будова котла ALTEP TRIO «КТ-3Е» має ряд конструкційних рішень, які дозволяють виконувати спалювання біомаси в циркулюючому киплячому шарі без виконання будь-яких особливих конструктивних переробок. До переваг котла слід віднести висоту камери згорання 3, що становить 1132 мм над колосниковою решіткою 9. Дверцята 7, розташовані на відстані 200 мм від колосникових решіт 9, що дозволяє через їх отвір оптимально пристикувати пневмомеханічний навантажувач та здійснювати подачу палива в оптимальну надколосникову зону. В даному котлі реалізовано позонове введення повітря через форсунки 5, що регулюється за допомогою перекидання повітряних каналів ручними повітряними заслінками 4. Система подачі повітря даного котла дозволяє перекрити подачу повітря в зону над колосниками, безперешкодно подавати повітря в підколосникову зону та відрегулювати подачу вторинного повітря в зоні догорання піролізних газів верхньої зони топки. Мікропроцесорний блок 21 дозволяє виконувати гнучке регулювання подачі повітря. Продумане розташування дверцят 8, 11, 12 дозволяє вразі необхідності виконувати оперативне очищення підколосникового простору, горизонтальної та вертикальних стінок конвекційного теплообмінника, вразі раптового припинення горіння та попадання маси в конвекційний теплообмінник.

Пневмомеханічний навантажувач включено в схему лабораторного стенду з метою усунення неповноти згорання паливних сумішей, а отже, зменшення явища хімічного та механічного недоспалювання, яке є характерним для палив з високим вмістом летючих складових. Пневмомеханічний навантажувач подає паливну суміш в топкову камеру шляхом вдування її потоком повітря під тиском. Два потоки повітря з паливними сумішами, при перетинанні забезпечують завихрення частинок в топковому просторі. Змішування частинок паливної суміші та потоку повітря, введеного в зону горіння пневмомеханічним навантажувачем, інтенсифікує процес горіння. Витрати повітря пневмомеханічного навантажувача розраховуються таким чином, щоб швидкість на виході вивантажувального патрубку була вищою за швидкість витання частинок суміші. За рахунок різниці початкових швидкостей потоків, направлення яких перетинається, досягається транспортування частинок в нижню частину топкової камери та забезпечується горіння частинок палива у зваженому стані. Витрати повітря на виході вивантажувального патрубку складають 110 м³/год. Продуктивність пневмомеханічного навантажувача може змінюватися залежно від кількості повітря, яке подається через колосникову решітку. Це пов'язано з надлишковим тиском повітря в топковій камері котла. При зростанні витрат паливної суміші на процес горіння в діапазоні 70–120 кг/год, витрати повітря на процес горіння знаходяться в діапазоні 650–1000 м³/год.

За допомогою штатива, обладнаного транспортером, визначався кут встановлення вивантажувального сопла навантажувача β і висота розташування сопла навантажувача над площиною H , на яку здійснювалося закидання палива. З метою дослідження рівномірної і регульованої подачі твердого палива для пошарового спалювання в топці котла в зону горіння котла встановлено металевий короб, який має розміри отриманої ділянки розкидання палива. Він призначений для дослідження висоти та площі розсіювання палива в топковій

камері котла. Короб розмірами 920×1120×150 мм був розділений на шість однакових секцій 152×185×150 мм. Висота шару палива в секціях вимірювалася металевою лінійкою ДСТУ ГОСТ 427:2009, що встановлена в центрі секцій. Вимірювання швидкості повітряного потоку на виході із сопла навантажувача здійснювалося трубкою Піто з мікроманометром Testo 512 (Німеччина). За оціночний показник якості розсіювання було прийнято коефіцієнт нерівномірності розподілу палива по поверхні розкидання μ .

В якості палива використовували суміші, виготовлені з гідролізного лігніну та соломи-січки пшениці. Вміст основних компонентів в гідролізному лігніні у % від маси абсолютно сухої речовини складав:

- 12,6–31,9 % полісахариди;
- 48,3–72,0 % лігніну;
- кислотність в перерахунку на H_2SO_4 – рН 2–2,5;
- зольність 0,7–9,6 %.

Солома-січка пшениці додавалася у паливну суміш у вигляді поліфракційної композиції з середньою довжиною стебел 35 мм. Склад соломи з вмістом до сухої маси основних її компонентів: $N=0,52$ %, $C=44,43$ %, $H=5,86$ %, $O=44,43$ %, $S=0,11$ %, зольність – 6,5 %.

Залежно від вмісту соломи та гідролізного лігніну було виготовлено три типи сумішей з відповідною теплотворною здатністю Q_H^P : суміш № 1 – 70 % соломи і 30 % гідролізного лігніну з $Q_H^P=16$ МДж/кг; суміш № 2 – 100 % лузга соняшника з $Q_H^P=17,5$ МДж/кг; суміш № 3 – 100 % соломи з $Q_H^P=13,5$ МДж/кг. Дослідження проводилися для кожної із сумішей окремо.

Для досягнення номінальної потужності в 300 кВт з коефіцієнтом корисної дії 86 % при роботі на паливній суміші № 1 котел споживає близько 78,5 кг/год палива, при роботі на паливній суміші № 2 – 71,8 кг/год, № 3 – 93 кг.

З врахуванням теплової напруженості дзеркала горіння $q=0,3$ МВт/м² і теплового напруження об'єму топкової камери $q_V=0,310$ МВт/м², площа дзеркала горіння складе 1 м², а висота топкової камери 1132 мм.

В циркулюючому киплячому шарі під дією аеродинамічних сил потоку повітря дрібні частинки паливної суміші переходять в рухомий стан в певному об'ємі над колосниковою. Потік повітря подається через колосникову решітку. При певній швидкості повітря, яке продувається крізь шар палива, перепад тиску в шарі чисельно стає рівним питомій вазі частинок. Частинки паливної суміші починають спиратися на потік повітря, а не на колосникову решітку, як було до цього. Через порушення зчеплення між частинками паливної суміші вони стають рухомими, змінюючи пористість та висоту шару. Шар переходить у киплячий стан. Під час подачі пневмомеханічним навантажувачем паливна суміш набуває прискорення, що дозволяє їй рухатися до колосникової решітки, долаючи піднімальні потоки, які складаються із палива, що газифікується, продуктів згорання та суміші піролізних газів. При цьому потоки взаємодіють, створюючи завихрення паливної суміші в киплячому шарі. Для подачі матеріалу в зону горіння пневмомеханічний навантажувач використовує димові гази, що забираються після конвекційного теплообмінника. подача паливної суміші без наявного кисню в потоці дозволяє взаємодіяти з нагрітими

продуктами згорання палива без процесу горіння. Горіння нової порції палива розпочинається після змішування з повітрям в киплячому шарі сировини.

Подача повітря в повітряний короб топкового пристрою та в пневмомеханічний навантажувач здійснювалася вентиляторами. З метою вимірювання загальної кількості повітря, яке подавалося в топковий пристрій, використовували датчик швидкості повітряного потоку, який був встановлений повітрязабірному патрубку. Для вимірювання витрат димових газів вимірялась швидкість потоку газів перед пневмомеханічним навантажувачем. Регулювання витрат повітря у топковому пристрої та димових газів в пневмомеханічному навантажувачі здійснювалося відповідними повітряними заслінками.

Кількість палива визначалася шляхом його зважування в мірній ємності на технічних вагах.

5.2. Методика обробки результатів експериментальних досліджень

Завданням було встановити залежності нерівномірності розподілу палива по поверхні дзеркала горіння μ від масової подачі палива Q_n , висоти H та кута β встановлення вивантажувального сопла пневмомеханічного навантажувача над площиною, на яку здійснюється подача. Щоб встановити характер впливу змінних факторів на нерівномірність розподілу палива по поверхні дзеркала горіння за теорією планування багатофакторного експерименту прийнято некомпозиційний план другого порядку [18].

Рівні та інтервали варіювання факторів представлено в табл. 1.

Таблиця 1

Рівні та інтервали варіювання змінних факторів

Назва фактора	Позначення фактора		Рівні змінювання фактора			Інтервал змінювання фактора
	натуральне	нормалізоване	(-1)	(0)	(+1)	
Висота розташування сопла навантажувача, м	H	X_1	0,5	0,8	1,1	0,3
Кут нахилу вивантажувального сопла навантажувача до поверхні дзеркала горіння, град.	β	X_2	-12	0	12	12
Масова подача палива, г/с	Q_n	X_3	10	15	20	5

Примітка: позначення залежних факторів: висота розташування сопла навантажувача H , м – X_1 ; кут нахилу вивантажувального сопла навантажувача до поверхні дзеркала горіння β , град. – X_2 ; масова подача палива Q_n , м/с – X_3

Досліди виконувалися у трикратній повторності з обов'язковим застосуванням рандомізації, щоб знизити похибки експерименту.

Перевірка відтворюваності дослідів здійснювалася за критерієм Кохрена [18]. У випадку невиконання умови відтворюваності за критерієм Кохрена, перевірялися точність вимірювання та умови проведення дослідів, в результаті яких отримано максимальне значення дисперсії [18].

В усіх проведених дослідях значимість коефіцієнтів рівнянь регресії оцінювалася за критерієм Стюдента, адекватність отриманих рівнянь регресії оцінювалася за критерієм Фішера [18]. Отримані данні було оброблено за допомогою програмного забезпечення «Пошук рішення» програми Microsoft Excel.

6. Результати дослідження

Рівномірний розподіл паливної суміші по дзеркалу горіння є однією з умов, яка забезпечує повноту вигорання палива. З метою її вивчення проведено багатофакторні експерименти і отримано залежності коефіцієнта нерівномірності μ від факторів, які чинять вплив на розподіл дрібнозернистих паливних сумішей. Дослідження здійснювалися для трьох паливних сумішей № 1, № 2, № 3. Значення факторів, які впливають на розподіл паливних сумішей по поверхні розкидання, встановлювалися у відповідності з матрицею планування експерименту. Отримані в результаті експерименту значення коефіцієнтів нерівномірності для різних комбінацій змінних факторів представлено в табл. 2.

Таблиця 2

Матриця планування багатофакторного експерименту для визначення коефіцієнта нерівномірності

№	Метод планування експерименту				Результати експерименту		
	X_0	X_1	X_2	X_3	$\mu_{1сер}$	$\mu_{2сер}$	$\mu_{3сер}$
1	+	+	+	0	0,922	0,800	0,708
2	+	+	-	0	1,201	1,074	0,981
3	+	-	+	0	0,987	0,873	0,867
4	+	-	-	0	0,905	0,758	0,695
5	+	0	0	0	0,878	0,818	0,704
6	+	+	0	+	1,323	1,083	0,921
7	+	+	0	-	0,874	0,705	0,607
8	+	-	0	+	0,958	0,865	0,822
9	+	-	0	-	1,387	1,103	0,981
10	+	0	0	0	0,911	0,797	0,662
11	+	0	+	+	0,803	0,671	0,631
12	+	0	+	-	1,377	1,209	1,031
13	+	0	-	+	1,317	1,123	1,015
14	+	0	-	-	0,967	0,816	0,713
15	+	0	0	0	0,990	0,761	0,700

Математичний опис залежності коефіцієнту нерівномірності розподілу μ від змінних факторів у вигляді поліному другого порядку має вигляд:

– для паливної суміші № 1:

$$\mu_1 = 0,926 - 0,005 \cdot X_1 - 0,029 \cdot X_2 - 0,026 \cdot X_3 - 0,09 \cdot X_1 \cdot X_2 + 0,22 \cdot X_1 \cdot X_3 - 0,231 \cdot X_2 \cdot X_3 + 0,049 \cdot X_1^2 + 0,029 \cdot X_2^2 + 0,161 \cdot X_3^2; \quad (1)$$

– для паливної суміші № 2:

$$\mu_2 = 0,792 + 0,014 \cdot X_1 - 0,016 \cdot X_2 - 0,011 \cdot X_3 - 0,1 \cdot X_1 \cdot X_2 + 0,154 \cdot X_1 \cdot X_3 - 0,211 \cdot X_2 \cdot X_3 + 0,034 \cdot X_1^2 + 0,05 \cdot X_2^2 + 0,113 \cdot X_3^2; \quad (2)$$

– для паливної суміші № 3:

$$\mu_3 = 0,69 - 0,015 \cdot X_1 - 0,018 \cdot X_2 + 0,007 \cdot X_3 - 0,11 \cdot X_1 \cdot X_2 + 0,12 \cdot X_1 \cdot X_3 - 0,176 \cdot X_2 \cdot X_3 + 0,055 \cdot X_1^2 + 0,07 \cdot X_2^2 + 0,09 \cdot X_3^2; \quad (3)$$

де X_1 – висота розташування сопла над поверхнею горіння, м;

X_2 – кут нахилу вивантажувального сопла до поверхні горіння, град;

X_3 – масова подача палива, г/с.

Табличне значення коефіцієнту Кохрена рівне $G(0,05; n; f_U)=0,5157$ для 5 %-го рівня значущості, кількості дослідів $n=8$ і числа ступенів вільності кожного дослідів $f_U=2$ при $m_0=3$ повторності [19]. Розрахункове значення коефіцієнту Кохрена:

– для паливної суміші № 1 – $G=0,432 < G(0,05; n; f_U)=0,5157$, що свідчить про відтворюваність дослідів;

– для паливної суміші № 2 – $G=0,388 < G(0,05; n; f_U)=0,5157$, що свідчить про відтворюваність дослідів;

– для паливної суміші № 3 – $G=0,345 < G(0,05; n; f_U)=0,5157$, що свідчить про відтворюваність дослідів.

Розрахункове значення коефіцієнту Фішера становить:

– для паливної суміші № 1 – $F=2,04 < F(0,05; f_{ad}; f_y)=19,3$;

– для паливної суміші № 2 – $F=9,05 < F(0,05; f_{ad}; f_y)=19,3$;

– для паливної суміші № 3 – $F=17,5 < F(0,05; f_{ad}; f_y)=19,3$.

Отже моделі є адекватними і можуть бути використані для опису об'єкта.

Для визначення значень факторів, за яких функція набуває максимального значення, було здійснено раціоналізацію залежностей (1)–(3) за допомогою сервісу «Пошук рішення» програми Microsoft Excel [19].

Якщо в трубопроводі навантажувача швидкість руху суміші палива і повітря наближена до критичної, щоб забезпечити мінімальну нерівномірність розсіювання палива слід регулювати кут нахилу вивантажувального сопла до поверхні горіння. Для соломи-січки цей кут складає -12...-6 градусів, для лузги соняшника – -10...-6, для суміші соломи з лігніном -8...+2 градуси. При цьому швидкість подачі суміші для соломи-січки повинна бути в межах 10 м/с, для лузги соняшника – 13 м/с, а для суміші соломи з лігніном – 15 м/с. Слід відмітити, що характер зміни коефіцієнта нерівномірності для соломи-січки та

лузги соняшника схожі, на відміну від суміші соломи з лігніном.

Отримані залежності можуть бути використані при виборі режиму роботи і розташування основних вузлів завантажувача палива, які забезпечують найменшу нерівномірність. Основним показником, від якого залежить вибір параметрів роботи завантажувача, є критична швидкість руху суміші в трубі завантажувача (швидкість руху суміші повинна бути більшою чи дорівнювати критичній).

7. SWOT-аналіз результатів досліджень

Strengths. Серед сильних сторін даного дослідження слід зазначити те, що отримано практичні результати щодо процесу спалювання в твердопаливних котлах таких низькосортних палив рослинного походження, як солома зернових, лігнін та лузга соняшника. Встановлено, що найкращу якість та інтенсивність процесу горіння можна досягти шляхом спалювання цих видів палива в котлах з циркуляційним киплячим шаром. Отримано техніко-експлуатаційні параметри котельного обладнання на цьому виді біомаси. Оскільки зазначені види біомаси є найбільш розповсюдженими в невеликих аграрних та фермерських господарствах, отримані результати можуть бути використані виробниками котельного обладнання при виготовленні для цього енергетичного сектору ринку нових високоефективних і екологічно-безпечних зразків обладнання. Отримані практичні результати дозволять оптимізувати процес конструювання котельного обладнання шляхом уніфікації деталей і вузлів на зразок топкової камери, колосникової решітки, завантажувального патрубку сировини, тощо. Використання уніфікованих деталей і вузлів першочергово позначиться на швидкості проектування виробів не лише в межах однієї модельної лінії, але й інших споріднених і неспоріднених напрямків та призначень. Як наслідок, маємо суттєве зниження собівартості такого обладнання і його ціни для споживача, що підвищує конкурентну спроможність кінцевого продукту.

Weaknesses. Серед слабких сторін можна виділити відсутність ґрунтового математичного опису отриманих практичних результатів. Також отримані результати дослідження можна застосувати при проектуванні та удосконаленні лише котельного обладнання та навантажувача, які працюють на рослинній сировині з подібними фізико-механічними властивостями і теплою згорання. Постійно розвиваючий ринок енергетичного обладнання потребує створення нового універсального високоефективного котельного обладнання для будь-якого типу біомаси.

Opportunities. Використання отриманих практичних результатів має значні перспективи для опису і подальшого моделювання процесу спалювання твердого низькосортного біопалива з врахуванням законів збереження маси та енергії для компонентів суміші. Суттєвими можуть бути отримані результати для здійснення теоретичного аналізу та моделювання режимних параметрів топкового пристрою, аналізу аеродинаміки системи паливо-повітряподачі.

Перспективи подальших досліджень в цьому напрямку мають бути зорієнтовані на розробку методик інженерного розрахунку топкових пристроїв з пневмомеханічними навантажувачами палива, які будуть враховувати

особливості подачі та горіння дрібнозернистого палива з біомаси. А також для створення бази уніфікованих деталей та вузлів універсального котельного обладнання та системи паливо-повітряподачі для широкого спектру рослинної біомаси з різними фізико-механічними властивостями.

Threats. Основними загрозами для широкого застосування отриманих результатів є стрімкий розвиток технологій хіміко-термічної конверсії біопалив та вимог щодо експлуатаційних параметрів теплоенергетичного обладнання, які надзвичайно динамічно змінюються. Крім того, використання широкої лінійки котельного обладнання з циркулюючим киплячим шаром, обладнаних пневмомеханічним навантажувачем, є доцільним для палив з високою парусністю в межах дрібних та середніх сільськогосподарських та фермерських господарств. Проектування потужних вискоефективних котельних установок на основі зазначеного технічного прийому потребує значних інвестицій, що є доступним лише певній категорії споживачів.

8. Висновки

1. Розроблено конструкцію навантажувача низькосортного рослинного палива з масовою подачею палива в діапазоні 36–72 кг/год до твердопаливного котла ALTEP TRIO «КТ-3Е». Відмінністю навантажувача є можливість регулювання кута нахилу вивантажувального сопла для палива в діапазоні -12–12 град, масової подачі палива за допомогою заслінки та висоти встановлення вивантажувального сопла для палива над поверхнею дзеркала горіння в межах 0,5–1,1 м. Для соломи пшениці ця висота складає 0,5 м, для лузги соняшника 0,8 і для суміші з 70 % соломи і 30 % гідролізованого лігніну висота становить 1,1 м. Встановлено, що використання пневмо-механічного навантажувача забезпечує рівномірне розподілення шару палива в топковому просторі, підвищується інтенсивність і покращується якість процесу горіння. Загальна ефективність від використання твердопаливного котла, обладнаного навантажувачем зростає на 13,6 %.

2. Шляхом проведення багатofакторного експерименту досліджено вплив масової подачі палива, висоти встановлення та кута нахилу вивантажувального сопла для палива до поверхні горіння на коефіцієнт нерівномірності розподілу палива по поверхні розкидання. Якщо в трубопроводі навантажувача швидкість руху суміші палива і повітря наближена до критичної, щоб забезпечити мінімальну нерівномірність розсіювання палива слід регулювати кут нахилу вивантажувального сопла до поверхні горіння. Для соломи-січки цей кут складає -12...-6 градусів, для лузги соняшника – -10...-6, для суміші соломи з лігніном -8...+2 градуси. При цьому швидкість подачі суміші для соломи-січки повинна бути в межах 10 м/с, для лузги соняшника – 13 м/с, а для суміші соломи з лігніном – 15 м/с.

Для кожного досліджуваного параметру отримано відповідні регресійні залежності.

Література

1. Qiu, G., Shao, Y., Li, J., Liu, H., Riffat, S. B. (2012). *Experimental investigation of a biomass-fired ORC-based micro-CHP for domestic applications*. *Fuel*, 96, 374–382. doi: <http://doi.org/10.1016/j.fuel.2012.01.028>
2. Demirbas, A. (2004). Combustion characteristics of different biomass fuels. *Progress in Energy and Combustion Science*, 30 (2), 219–230. doi: <http://doi.org/10.1016/j.pecs.2003.10.004>
3. Roni, M. S., Chowdhury, S., Mamun, S., Marufuzzaman, M., Lein, W., Johnson, S. (2017). Biomass co-firing technology with policies, challenges, and opportunities: A global review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 78, 1089–1101. doi: <http://doi.org/10.1016/j.rser.2017.05.023>
4. ECU lab-scale combustor. 2014. Available at: <https://www.ecu.edu.au/schools/engineering/research-activity/thermofluids-research-group>
5. Zhou, H., Jensen, A., Glarborg, P., Jensen, P., Kavaliauskas, A. (2005). Numerical modeling of straw combustion in a fixed bed. *Fuel*, 84 (4), 389–403. doi: <http://doi.org/10.1016/j.fuel.2004.09.020>
6. Abelha, P., Gulyurtlu, I., Crujeira, T., Cabrita, I. (2008) Co-combustion of several biomass materials with bituminous coal in a circulating fluidized bed combustor. *Proceedings of the 9th International Conference on Circulating Fluidized Beds in conjunction with the 4th International VGB Workshop Operating Experience with Fluidized Bed Firing Systems*. Hamburg.
7. Knöbig, T., Werther, J., Åmand, L.-E., Leckner, B. (1998). Comparison of large- and small-scale circulating fluidized bed combustors with respect to pollutant formation and reduction for different fuels. *Fuel*, 77 (14), 1635–1642. doi: [http://doi.org/10.1016/s0016-2361\(98\)00092-1](http://doi.org/10.1016/s0016-2361(98)00092-1)
8. Saidur, R., Abdelaziz, E. A., Demirbas, A., Hossain, M. S., Mekhilef, S. (2011). A review on biomass as a fuel for boilers. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 15 (5), 2262–2289. doi: <http://doi.org/10.1016/j.rser.2011.02.015>
9. Openshaw, K. (2010). Biomass energy: Employment generation and its contribution to poverty alleviation. *Biomass and Bioenergy*, 34 (3), 365–378. doi: <http://doi.org/10.1016/j.biombioe.2009.11.008>
10. Werther, J. (2009). Potentials of Biomass Co-Combustion in Coal-Fired Boilers. *Proceedings of the 20th International Conference on Fluidized Bed Combustion*, 27–42. doi: http://doi.org/10.1007/978-3-642-02682-9_3
11. Jenkins, B., Baxter, L., Miles, T., Miles, T. (1998). Combustion properties of biomass. *Fuel Processing Technology*, 54 (1-3), 17–46. doi: [http://doi.org/10.1016/s0378-3820\(97\)00059-3](http://doi.org/10.1016/s0378-3820(97)00059-3)
12. Bridgwater, T. (2006). Biomass for energy. *Journal of the Science of Food and Agriculture*, 86 (12), 1755–1768. doi: <http://doi.org/10.1002/jsfa.2605>
13. Van Loo, S., Koppejan, J. In, Van Loo, S., Koppejan, J. (2008). *The handbook of biomass combustion and co-firing*. London: Earthscan, 465.
14. Van Der Lans, R., Pedersen, L. T., Jensen, A., Glarborg, P., Johansen, D. (2000). Modelling and experiments of straw combustion in a grate furnace. *Biomass and Bioenergy*, 19 (3), 199–208. doi: [http://doi.org/10.1016/s0961-9534\(00\)00033-7](http://doi.org/10.1016/s0961-9534(00)00033-7)

15. Kaer, S. (2001) Numerical investigation of ash deposition in straw-fired boilers: using CFD as the framework for slagging and fouling predictions. *Department of Energy Technology Fluid Mechanics and Combustion*. Denmark: Videnbasen for Aalborg Universitet VBN, 203.

16. Yin, C., Rosendahl, L., Kær, S. K., Clausen, S., Hvid, S. L., Hille, T. (2008). Mathematical Modeling and Experimental Study of Biomass Combustion in a Thermal 108 MW Grate-Fired Boiler. *Energy & Fuels*, 22 (2), 1380–1390. doi: <http://doi.org/10.1021/ef700689r>

17. Ku, X., Li, T., Løvås, T. (2015). CFD–DEM simulation of biomass gasification with steam in a fluidized bed reactor. *Chemical Engineering Science*, 122, 270–283. doi: <http://doi.org/10.1016/j.ces.2014.08.045>

18. Melnikov, S. V., Atselkin, V. R., Roshchin, P. M. (1980). *Planirovaniye eksperimenta v issledovaniyakh sel'skokhozyaystvennykh protsessov*. Leningrad: Kolos, 168.

19. Vasylovskyy, O., Leshchenko, S., Vasylovskaya, K., Petrenko, D. (2016). *Pidruchnyk doslidnyka*. Kirovohrad, 204.

The object of research is the process of ensuring uniform distribution of fuel over the combustion surface of the combustion chamber of a solid fuel boiler operating on biomass. The uniform distribution of fuel over the combustion surface is one of the important levers for eliminating the phenomena of its chemical and mechanical under-conditioning, which increases the efficiency of boiler equipment. One of the problems of studying this issue is the lack of a sufficient theoretical base and practical experience in the process of chemical-thermal conversion of plant biomass to other types of energy.

An approach is proposed based on the hypothesis that it is possible to increase the efficiency of boiler equipment on plant biomass by establishing an intensive and high-quality combustion process, ensuring an even distribution of fuel on the combustion surface. And also to identify patterns and indicate methods for optimizing the structure of boiler equipment designs by adapting it to plant materials. The implementation of this approach is carried out by conducting a multivariate experiment. During the experiment, the dependence of the coefficient of uneven distribution of fuel along the combustion plane on the height of the loader nozzle, the angle of inclination of the loader control plate to the surface of the combustion mirror and mass fuel supply is determined.

As a result of the study, practical results are obtained, mathematical dependences of the coefficient of uneven distribution of fuel over the combustion surface on the indicated variable factors in the form of a second-order polynomial are presented.

The obtained research results will improve the efficiency of the process of heat production from low-grade solid fuels of vegetable origin in boiler plants, facilitate their wider use, and increase the environmental component of the process.

The research results are interesting both for manufacturers of boiler equipment based on vegetable raw materials and for its users who want to burn the biomass available on the farm to meet energy needs.

Keywords: boiler equipment, combustion surface, pneumatic-mechanical loader, vegetable biomass.