

В І Д Г У К

офіційного опонента на дисертаційну роботу Мумана Мохаммеда на тему «Підвищення ефективності спалювання водовугільного палива шляхом додавання відходів виробництва біодизеля», що подана на здобуття ступеня доктора філософії зі спеціальності 144 – Теплоенергетика

ЗАГАЛЬНА ХАРАКТЕРИСТИКА РОБОТИ

Актуальність теми

Вугілля залишається одним з основних енергетичних ресурсів у світі, причому великі запаси вугілля і низька вартість в порівнянні з іншими органічними паливами робить його привабливим ресурсом для країн з розвинутою вугільною промисловістю, в тому числі, і для України. Передчасність відмови від вугілля стала зрозумілішою в останній рік, коли з'ясувалось, що в країнах зі збільшеною часткою відновлюваних джерел енергії теплова енергетика залишилась єдиним надійним засобом регулювання споживання тепла та електроенергії в умовах кліматичних коливань. У зв'язку з широким спектром галузей споживання вугілля актуальним є питання диверсифікації способів застосування цього виду палива і зниження шкідливого впливу на довкілля при його використанні. Одним з перспективних напрямків паливного використання вугілля є його спалювання у вигляді водовугільного палива (ВВП).

Застосування ВВП має ряд переваг в порівнянні з мазутом та вугіллям, але ці переваги досягнуті в Китаї та інших країнах при використанні лише малозольного та низькосірчистого вугілля. Існує ряд чинників, що стримують розвиток технологій ВВП в Україні. До них відносяться, перш за все, нестабільність даного виду палива при транспортуванні, нестійкість займання й горіння, низька ефективність його спалювання при звичайних для вітчизняної вугільної продукції рівнях зольності 10-30% та помітні викиди сірчистого ангідриду при вмісті сірки понад 1,5%.

Одним з напрямків отримання водовугільного палива з необхідними енергетичними та реологічними властивостями є використання добавок з відходів нафтопереробної та хімічної промисловості, рідких біопалив і т.п. в якості рідкої фази. Такою добавкою може бути, наприклад, технічний гліцерин, який є побічним продуктом при виробництві біопалива; його суттєві переваги - досить висока калорійність, відсутність сірки, "вуглецева нейтральність" та сприятливі реологічні властивості. Для ефективного використання ВВП з додаванням гліцерину, в тому числі з реалізацією встановленого раніше ефекту термічної активації для покращення займання, потрібен розвиток знань щодо впливу гліцерину на властивості палива та ефективність його спалювання.

Наведене пояснює, чому рецензована робота, яка спрямована на дослідження закономірностей займання і горіння ВВП з додаванням гліцерину, визначення його

теплофізичних властивостей та особливостей теплообміну, є актуальною як в науковому, так і прикладному плані.

Зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами

Робота виконана відповідно до наукових напрямів кафедри енергетичних систем та енергоменеджменту Національної металургійної академії України і є частиною досліджень, що проводились у рамках держбюджетних тем: «Наукове обґрунтування та розробка ефективних тепломасообмінних процесів в інноваційних металургійних технологіях» № 0115U003176 та «Розробка інноваційної «зеленої» технології глибокої переробки вугілля з метою отримання термоантрациту та штучного графіту високої якості» № 0121U109528, в яких здобувач був співвиконавцем.

Методи дослідження

Для вирішення поставлених у дисертаційній роботі завдань використано комплексний підхід, який включав у себе експериментальні та теоретичні (числові) дослідження. Для реалізації експериментальної частини досліджень використані спеціально розроблені установки і методики кафедри енергетичних систем та енергоменеджменту, теоретичні та числові дослідження виконувалися за допомогою розробленого автором прикладного програмного забезпечення та ліцензійного програмного комплексу для термодинамічної розрахунку рівноважного складу і властивостей багатокомпонентних гетерогенних систем «Terra».

Наукова новизна та практична цінність отриманих результатів

Новими результатами, отриманими в процесі виконання дисертаційної роботи, є наступні.

Вперше за умов додавання до ВВП гліцерину експериментально визначено вплив останнього на теплоємність та коефіцієнт теплопровідності палива, що дозволило встановити відповідні емпіричні залежності.

Отримали подальший розвиток відомості про вплив вмісту гліцерину у ВВП в діапазоні 5...20 % мас. на тривалість і температуру кожної стадії горіння, що дозволило визначити напрямки підвищення ефективності спалювання палива.

Набуло подальшого розвитку уявлення про закономірності теплообміну при примусовому русі водовугільного палива як неньютонівської рідини з урахуванням отриманих теплофізичних властивостей та вперше встановлено критеріальне рівняння подоби виду $Nu=f(Gz)$ для діапазону числа подоби Пекле $137...15 \cdot 10^5$.

Отримали подальший розвиток відомості про утворення азото- та сірковмісних сполук у продуктах згоряння ВВП в залежності від вмісту гліцерину в ньому та від температури процесу, що дозволило визначити напрямки зменшення негативного впливу на довкілля при його спалюванні.

Практична цінність отриманих результатів полягає в наступному.

Визначено раціональні параметри ефективного спалювання ВВП з додаванням гліцерину, які забезпечують максимальну реалізацію енергетичного потенціалу даного палива зі зменшенням негативного впливу на довкілля.

Отримано вихідні дані та практичні рекомендації для проектування теплообмінних апаратів для термічної активації ВВП при температурі 150-200 °С (витрата, швидкість, температура теплоносіїв, площа теплообміннику).

Розроблені режимні параметри роботи випалювальних печей при використанні для їх опалення водовугільного палива з додаванням гліцерину передані для впровадження на ділянці виробництва вапна ТОВ «МЗ «Дніпросталь» (акт від 17.11.2020 р).

Матеріали дисертаційної роботи використовуються у навчальному процесі кафедри енергетичних систем та енергоменеджменту Національної металургійної академії України у курсі дисциплін «Тепломасообмін», «Спеціальні питання тепломасообміну», «Паливо та його спалювання», при виконанні випускних робіт бакалаврів та магістрів за спеціальністю 144 – Теплоенергетика (довідка про використання від 20.01.2021 р.).

Особистий внесок здобувача

Всі результати, представлені в дисертаційній роботі, базуються на теоретичних і експериментальних дослідженнях, виконаних особисто і при безпосередній участі Мумана М. Особистий внесок здобувача полягає у проведенні експериментальних і розрахунково-теоретичних досліджень з обробкою отриманих даних, узагальненні та аналізі результатів, і достатньо висвітлений в публікаціях. Дисертаційна робота виконана з дотриманням вимог академічної доброчесності, не містить елементів плагіату, самоплагіату, фабрикації, фальсифікації. Використані результати і тексти інших авторів мають посилання на відповідні джерела.

Апробація роботи і достовірність результатів

Достовірність отриманих здобувачем результатів підтверджена коректністю постановки задачі, застосуванням апробованих методик експериментальних досліджень та сучасного обладнання, високими значеннями довірчої ймовірності (не менше 95%), використанням в роботі фундаментальних закономірностей тепломасообміну, гідрогазодинаміки, теорії горіння. Отримані результатами узгоджуються з даними інших авторів, які опубліковані в науковій літературі.

Основні положення і результати дисертаційної роботи доповідались і обговорювались на 7 наукових конференціях.

Повнота викладення основних положень дисертації в опублікованих роботах

Основні результати дисертаційної роботи опубліковані у 9 наукових працях, в тому числі: 4 статті у виданнях, що індексуються у міжнародних наукометричних

базах Scopus або Web of Science (2 статті - в виданнях, віднесених до першого квартиля Q1, 2 статті - в виданнях, віднесених до третього квартиля Q3) та 5 матеріалів праць і тез науково-технічних конференцій.

Мова та стиль роботи

Стиль написання дисертаційної роботи відповідають вимогам до наукових праць, зміст роботи викладено послідовно і логічно. Текст роботи повністю відображає результати наукових досліджень, при викладі використана сучасна загальноприйнята наукова і технічна термінологія.

Структура і обсяг роботи

Дисертація складається зі вступу, 4 розділів, висновків, 3 додатків. Список використаних літературних джерел складає 127 найменувань. Основна частина дисертації викладена на 110 сторінках і містить 57 рисунків і 10 таблиць. Загальний обсяг роботи становить 139 сторінок.

АНАЛІЗ ДИСЕРТАЦІЙНОЇ РОБОТИ

У вступі викладено обґрунтування актуальності роботи, визначено мету і завдання дослідження, наукову новизну і практичну цінність отриманих результатів, дані про апробацію результатів та публікації здобувача за темою дисертації. Обсяг і форма вступу відповідають загальноприйнятим нормам і вимогам до дисертацій і є достатніми для ознайомлення з вихідними передумовами та основними положеннями, які виносяться автором на захист.

У першому розділі автор розглядає сучасний стан споживання енергії у світі та Україні, виконує аналіз світової та української вугільної галузі. Обґрунтовує важливу роль вугілля навіть в умовах збільшення частки відновлюваних джерел.

Автор оцінює сучасний стан та перспективи використання ВВП, його технологічні властивості та особливості спалювання. Спираючись на досвід інших дослідників, робить висновок про те, що для підвищення ефективності спалювання водовугільного палива доцільно додавати до нього відходи виробництва біодизеля, у тому числі гліцерин.

Виконаний аналіз дав змогу авторові визначити мету роботи – підвищення енергоефективності спалювання водовугільного палива з додаванням відходів виробництва біодизеля із забезпеченням максимальної реалізації його енергетичного потенціалу та мінімізації негативного впливу на довкілля – та перелік завдань, які необхідно вирішити для досягнення зазначеної мети. Поставлені завдання відповідають рівню вимог до дисертаційних робіт.

У другому розділі дисертації викладено результати досліджень основних закономірностей горіння ВВП з додаванням гліцерину, виявлено вплив різних параметрів на процеси його займання і горіння.

Дослідження проводилися на окремих краплях палива розміром 1 мм та 5 мм. Це дозволило виявити детальну послідовність процесів, що відбуваються при попаданні палива в простір нагрітої печі. Отримана автором стадійність процесу спалахування і горіння краплі палива, з одного боку, підтвердила результати попередніх досліджень різних авторів, з іншого боку, дозволила виявити деякі раніше невідомі особливості горіння ВВП з добавкою гліцерину, в тому числі впливу вмісту гліцерину на температуру займання палива, час до займання та повного вигорання, максимальну температуру палаючої краплі палива і час досягнення цієї температури.

У третьому розділі розглянуто методологічні підходи до визначення теплофізичних властивостей ВВП, детально описані експериментальні дослідження коефіцієнта теплопровідності і теплоємності та їх результати. Для визначення значення коефіцієнту теплопровідності водовугільного палива обрано оригінальну методику поєднання фізичного і числового експериментів. Для визначення теплоємності палива обрано калориметричний метод з урахуванням особливостей ВВП.

Отримані в процесі виконання експериментальних досліджень залежності теплофізичних властивостей водовугільного палива від вмісту гліцерину мають безперечну наукову і практичну цінність. Результати підтверджують, що ВВП за своїми структурою і е властивостям є не просто сумішшю вугілля, води та гліцерину, а являє собою складну дисперсну систему. Автором виконано узагальнення отриманих даних у вигляді емпіричних залежностей, які можуть бути використані як при інженерних оцінках в процесі проектування спеціалізованого обладнання, так і при вирішенні задач подачі, розпилювання й горіння водовугільного палива в енергетичних установках.

У четвертому розділі роботи представлені дослідження теплообміну при вимушеному русі ВВП в трубопроводі, детально описано методику проведення експериментальних досліджень і обробки отриманих результатів. При обробці експериментальних даних по дослідженню теплообміну використовувалися теплофізичні параметри водовугільного палива, отримані в розділі 3. Аналіз результатів досліджень підтвердив, що ВВП являє собою неньютонівську рідину, а рішення для ньютонівських рідин не є придатним для розрахунку процесів тепловіддачі. Отримані результати експериментальних досліджень оброблені з використанням теорії подоби і виконано узагальнення результатів у вигляді критеріального рівняння виду $Nu = f(Gz)$ для широкого діапазону складу ВВП та режимних умов течії.

З використанням нових знань і результатів, отриманих в четвертому розділі, автор виконав розрахункове дослідження впливу вихідних параметрів на площу поверхні нагріву теплообмінника, призначеного для попередньої термічної активації водовугільного палива, в тому числі з додаванням гліцерину, при

температурі 150-200°C під тиском, для енергетичних агрегатів з потужністю від 1 до 10 МВт. Загалом, отримані автором експериментальні та теоретичні результати забезпечують можливість ефективного впровадження термічної активації ВВП.

У **Висновках** відображено основні науково-технічні здобутки дисертаційної роботи. Вони свідчать, що робота містить нові науково обґрунтовані результати проведених здобувачем досліджень, які розв'язують науково-практичне завдання підвищення енергоефективності спалювання водовугільного палива з додаванням відходів виробництва біодизеля, що має істотне значення для енергетичної науки. Зауважень до формулювань висновків немає.

ЗАУВАЖЕННЯ ПО ДИСЕРТАЦІЙНІЙ РОБОТІ

1. Во вступі дисертації зазначено, що «розроблені режимні параметри роботи випалювальних печей при використанні для їх опалення водовугільного палива з додаванням гліцерину.....», але в тексті дисертації, зокрема, в розділі 4, не наведено жодної інформації стосовно цього.

2. У другому розділі дисертації зазначено, що процес горіння водовугільного палива з гліцерином можна розділити на 4 стадії, але на рисунках 2.5-2.9 не зазначено межі цих стадій, що ускладнює аналіз отриманих даних.

3. При аналізуванні результатів досліджень другого розділу автор слушно зазначає, що час вигорання краплі залежить не тільки від вмісту гліцерину у ВВП, але й від дефіциту окисника при горінні крапель, проте не наводить кількісної оцінки впливу дефіциту окисника, в тому числі в залежності від розміру крапель. А така оцінка б показала, що вплив обмеження швидкості дифузії окисника до поверхні частинки є не тільки суттєвим, а й визначальним, особливо для крапель з діаметром 5 мм. Саме внаслідок цих обмежень, скоріше за все, і реалізується квазістаціонарний режим горіння таких крапель (рисунки 2.5-2.11), тоді як для крапель 2 мм характерне швидке збільшення температури і швидкості горіння до максимуму з подальшим спадом (рисунки 2.15-2.17). Тому встановлені в цьому розділі емпіричні залежності мають лише якісний характер і не можуть бути перенесені на реальні енергоустановки з іншими умовами підведення окисника до крапель. Оскільки при подальшому викладенні автор зосереджується на дослідженні теплофізичних властивостей ВВП і не використовує знайдені кількісні показники процесу вигорання крапель, це зауваження не є критичним, але потребує врахування в подальших дослідженнях.

4. Дані з розрахунку кількості сірковмісних газів в продуктах згорання програмним комплексом «Тerra», наведені в таблиці 2.5, потребують додаткового роз'яснення. При пиловидному спалюванні вугілля з таким вмістом сірки, як досліджуване (понад 5%), емісія сірчистого ангідриду перевищує 8000 мг/нм³, в таблиці ж вказано рівні емісії 5,01-5,72 мг/м³. З чим пов'язана така різниця – з

уповільненням горіння внаслідок вказаних вище обмежень швидкості дифузії окисника, з помилкою розмірності або з якоюсь іншою причиною?

5. В третьому розділі при опису експериментальної установки та методики визначення теплоємності водовугільного палива не наведені об'єми контейнеру та зразку палива, що заважає оцінити можливий вплив на спостережну теплоємність теплоти пароутворення при нагріванні зразку до температур понад 100°C.

6. В четвертому розділі слід було б навести значення густини та в'язкості водовугільного палива з гліцерином в залежності від температури, значення яких використовувались при обробці отриманих даних.

7. В четвертому розділі наведено розрахункові дослідження теплообмінного апарату для термічної активації водовугільного палива, але у висновках до цього розділу недостатньо чітко сформульовано рекомендації щодо проектування таких апаратів. Крім того, відкритим залишилось питання поведінки краплі ВВП, яка після термічної активації при температурі 150-200°C під тиском попадає в пічний або топковий об'єм при атмосферному тиску і може зазнавати, зокрема, парового вибуху, який здатний суттєво змінити закономірності займання та вигорання ВВП.

8. Робота б суттєво виграла, якщо б у четвертому розділі на підставі результатів досліджень було б наведене техніко-економічне порівняння енергоефективності застосування добавки відходів виробництва біодизеля до ВВП з урахуванням ринкової вартості технічного гліцерину (до 400 дол./т).

Наведені зауваження не є критичними і не порушують загального позитивного враження від роботи в цілому.

ВИСНОВКИ ОПОНЕНТА

Дисертаційна робота Мумана Мохаммеда є завершеною науково-дослідницькою працею, в якій на основі виконаних експериментально-теоретичних досліджень вирішені поставлені завдання і досягнута мета дослідження. Роботу виконано на сучасному науково-технічному рівні, отримані результати мають наукову новизну, розширюють знання та уявлення в галузі теплофізичних і тепломасообмінних процесів спалювання водовугільного палива, що є важливим для енергетичної науки, і визначають доцільність додавання гліцерину до палива для підвищення ефективності його спалювання, що є практично цінним для енергетичної галузі України.

Представлені результати досліджень, методичних та технічних розробок автора дисертації можуть бути використаними при оптимізації споживання власних енергоносіїв в Україні; на підприємствах і в організаціях, які використовують відповідні технології або займаються їх розробкою; у вищих навчальних закладах України при викладанні навчальних дисциплін, пов'язаних з аспектами теплофізики, теплоенергетики, екології печей, тощо.

Зроблені зауваження в цілому не впливають на рівень наукових результатів, висновків і рекомендацій, виконаних здобувачем, їх новизну і достовірність і не зменшують загальну позитивну оцінку дисертаційної роботи.

Сформульовані в роботі наукові положення, висновки та рекомендації є цілком обґрунтованими, їх достовірність і новизна не викликають сумнівів.

Оформлення та стиль викладу матеріалу дисертаційної роботи доступні для сприйняття і відповідають сучасним вимогам, що пред'являються до наукових праць.

Основні наукові положення, висновки та рекомендації дисертаційної роботи досить повно відображені в публікаціях автора в авторитетних міжнародних наукових виданнях, матеріали дисертації в достатній мірі були представлені на конференціях державного та міжнародного рівня. Особистий внесок здобувача достатньо висвітлений в публікаціях і не викликає сумніву.

Вважаю, що дисертаційна робота Мумана Мохаммеда на тему «Підвищення ефективності спалювання водовугільного палива шляхом додавання відходів виробництва біодизеля», що подана на здобуття ступеня доктора філософії зі спеціальністю 144 – Теплоенергетика, за своїми науковим рівнем та практичною цінністю, змістом і оформленням повністю відповідає вимогам пп. 9, 10, 11, 12 Порядку проведення експерименту з присудження ступеня доктора філософії, затвердженого постановою Кабінету Міністрів України від 06 березня 2019 р. №167 «Про проведення експерименту з присудження ступеня доктора філософії» зі змінами (Постанова Кабінету Міністрів України від 21 жовтня 2020 р. №979), а її автор заслуговує на присудження йому наукового ступеня доктора філософії зі спеціальністю 144 – Теплоенергетика.

Офіційний опонент,
завідувач лабораторії паливних проблем енергетики
Інституту теплоенергетичних технологій
НАН України, д.т.н.,
старший науковий співробітник

М.В. Чернявський



(Берешча Л. А.)