

РЕЦЕНЗІЯ

на дисертаційну роботу
Рябцуна Руслана Сергійовича
на тему «Енерготехнологічні особливості використання водневих технологій
в технологічних установках»,
представлену на здобуття ступеня доктора філософії
в галузі знань 14 Електрична інженерія
за спеціальністю 142 Енергомашинобудування

Актуальність теми дисертації.

Енергетична незалежність України від імпорту вуглеводнів є важливою запорукою Національної безпеки та сталого розвитку Держави. Для заміни природного газу все більшого поширення набувають технології отримання штучних паливних газів, зокрема такою альтернативою можуть бути продукти газифікації біомаси та відходів, використання звалищного газу та технологічних доменного і коксового газів тощо. Ще одним паливним газом, який може замінити природній газ є водень. У світі вже мають місце пілотні проєкти використання водню як палива, найбільш відомими з яких є приклади застосування водню як моторного палива в Японії та США, а також додавання водню до природного газу в побутові газорозподільні мережі в Німеччині.

Заміна природного газу воднем, окрім очевидних переваг у декарбонізації атмосфери (зменшенні викидів CO_2) спричиняє зміни вогнетехнічних та емісійних характеристик паливно-окислювальних сумішей. Зокрема, це веде до збільшення абсолютного споживання паливного газу через меншу теплоту згоряння водню, а також до зростання утворення оксидів азоту (NO_x) через вищу температуру горіння водню. Таким чином, заміна природного газу на водень, або метано-водневі суміші спричиняє зміну характеристик роботи паливного обладнання і для широкого промислового та побутового застосування водню потрібно виконати відповідні інженерні оцінки та отримати науково-обґрунтовані рекомендації щодо оптимальних умов такого заміщення природного газу воднем. Цим важливим і актуальним питанням присвячена дисертаційна робота Рябцуна Р.С.

Оцінка обґрунтованості наукових результатів дисертації, їх достовірності та новизни.

1. Вперше проведені експериментальні дослідження в лабораторних умовах, підтвердили можливість забезпечення процесу нормального

спалювання змішаного газу із вмістом водню у співвідношенні до $[\text{CH}_4]/[\text{H}_2] = 50 / 50$, % об. і з використанням існуючих промислових пальників.

2. Вперше досліджені характеристики факелу при спалюванні метано-водневих сумішей в порівнянні з випадком спалювання чисто природного газу. Визначені температури продуктів згоряння на осі та периферії факелу. Показано збільшення температури факелу ~ 100 °С для метановодневих сумішей в порівнянні з випадком спалювання природного газу.

3. На основі аналізу результатів експериментів визначено, що при спалюванні метано-водневої суміші зменшуються викиди CO та збільшуються температури викидних газів і емісія NO_x .

4. Встановлено, що емісія оксидів азоту NO_x зростає у 1,5 - 2,0 рази та складає $[\text{NO}_x] = (89 - 50)$ ppm для спалювання чистого водню. В той же час відмічається суттєве зниження утворення CO, приблизно у 20 разів при спалюванні суміші $[\text{CH}_4] / [\text{H}_2] = 50/50$, % об., при цьому рівень утворення CO складає $[\text{CO}] = (1 - 2)$ ppm.

5. Вивчено характеристики та структуру факелу при спалюванні метановодневих сумішей, показано, що температура на осі факелу більша ніж на периферії на ~ 100 °С для суміші $[\text{CH}_4]/[\text{H}_2] = 50/50$, % об. у порівнянні з природним газом.

6. Вперше проведено комп'ютерне CFD моделювання спалювання метано-водневих сумішей в паровому котлі типу ДКВР-10-13.

7. Показана адекватність верифікованих розрахункових моделей до результатів власних експериментальних досліджень щодо емісійних та вогнетехнічних характеристик роботи паливовикористовуючого обладнання.

Наукові дослідження були виконані здобувачем на кафедрі атомної енергетики НН ІАТЕ КПІ ім. Ігоря Сікорського під керівництвом к.т.н. доц. Воробйова М.В.

В дисертаційній роботі поставлені та вирішені наступні наукові завдання:

- визначення вогнетехнічних та екологічних властивостей газових палив, складених з сумішей метану та водню, а саме швидкостей горіння, зміни адіабатичної температури горіння сумішей при збільшенні частки водню у паливі, оцінці утворення оксидів азоту та викидів CO_2 ;
- розроблення та створення дослідної установки для проведення експериментальних досліджень;
- визначення енергоекологічних характеристик спалювання метано-водневих сумішей в промисловому газовому пальнику з визначенням емісії NO_x , CO та температурних характеристик факелу і порівнянням з випадком спалювання чистого природного газу метану;

- визначення середніх характеристик теплообміну в топковій камері котла ДКВР-10-13 за допомогою пакету програм CFD-моделювання ANSYS-Fluent.

- методами моделювання визначено вплив відсоткового вмісту водню в паливній суміші з метаном на утворення оксидів азоту (NO_x), при використанні в штатних осьових пальниках водогрійного котла ДКВР-10-13.

Таким чином, враховуючи отримані наукові результати можна стверджувати, що поставлені у роботі завдання виконані повністю, а здобувач значною мірою оволодів методологією наукової діяльності.

Оцінка змісту дисертації, її завершеність та дотримання принципів академічної доброчесності.

За своїм змістом дисертаційна робота здобувача Рябцуна Руслана Сергійовича повністю відповідає Стандарту вищої освіти за спеціальністю 142 Енергетичне машинобудування та напрямкам досліджень освітньої програми Енергетичне машинобудування.

Дисертаційна робота є завершеною науковою працею і свідчить про наявність особистого внеску здобувача в науковий напрям «фізика процесів горіння» і «підвищення енергоекологічної ефективності енерготехнологічних об'єктів і систем».

Розглянувши звіт подібності за результатами перевірки дисертаційної роботи на текстові співпадиння, можна зробити висновок, що дисертаційна робота Рябцуна Руслана Сергійовича є результатом самостійних досліджень здобувача і не містить елементів фальсифікації, компіляції, фабрикації, плагіату та запозичень. Використані ідеї, результати і тексти інших авторів мають належні посилання на відповідне джерело.

Мова та стиль викладення результатів.

Дисертаційна робота написана українською.

Матеріали дисертації викладено в логічній послідовності, з використанням загальноприйнятої термінології. В оформленні тексту траплялися незначні граматичні помилки.

Дисертація складається з вступу, 4-х розділів, висновків, списку літератури та 2-х додатків, має 31 рисунок, 2 таблиці. Загальний обсяг дисертації 113 сторінок.

У **вступі** обґрунтовано актуальність, чітко сформульовано мету та основні завдання. Визначено об'єкт і предмет наукового дослідження. Представлено наукову значимість та практичну цінність отриманих результатів, а також окреслено особистий внесок автора. Сформульовано основні висновки роботи. Подано відомості щодо апробації результатів дослідження та можливих напрямів їх застосування на практиці. Окрім цього, наведено загальні відомості про обсяг і структуру дисертації.

У **першому розділі** проведено аналіз наукових джерел, присвячених застосуванню водневмісних палив у промисловості та побуті. Розглянуто особливості технологій виробництва водню, а також перспективи розвитку водневої енергетики. Проаналізовано наукові публікації, що висвітлюють обсяги споживання природного газу та можливості виробництва зеленого водню. Значну увагу приділено екологічним аспектам заміни природного газу водневими сумішами. Наприкінці розділу чітко визначено мету та основні завдання дослідження.

У **другому розділі** здійснено теоретичні та розрахункові дослідження вогнетехнічних і екологічних характеристик газоподібних палив, утворених на основі метано-водневих сумішей. Зокрема, досліджено швидкість горіння, зміну адіабатичної температури згоряння зі зростанням вмісту водню в паливі, а також оцінено рівень утворення оксидів азоту та викидів CO_2 .

Використання водню як компонента для часткового заміщення природного газу, попри очевидні переваги в контексті декарбонізації (зниження викидів CO_2), зумовлює зміну вогнетехнічних і емісійних параметрів паливно-окислювальних сумішей. Зокрема, це проявляється в підвищенні загальної витрати паливного газу через нижчу теплоту згоряння водню, а також у збільшенні утворення оксидів азоту (NO_x) внаслідок вищої температури горіння водню.

У **третьому розділі** представлено результати експериментальних досліджень процесу спалювання метано-водневих сумішей у промисловому газовому пальнику SUEMAX з максимальною тепловою потужністю до 30 кВт. Вивчено режими з вмістом водню в паливі на рівні 30 % об. та 50 % об., а також досліджено режим повного заміщення природного газу воднем ($[\text{H}_2] = 100\%$). Основна мета експерименту — визначити енергоекологічні параметри згоряння метано-водневих сумішей, зокрема рівні емісії оксидів азоту (NO_x), оксиду вуглецю (CO) та температурні характеристики факела, з подальшим порівнянням із традиційним спалюванням чистого метану.

Результати досліджень показали, що використання водневих домішок у паливі призводить до зниження викидів CO та підвищення температури відхідних газів і рівня утворення NO_x . Встановлено, що при спалюванні чистого водню концентрація NO_x зростає приблизно у 1,5–2 рази й досягає (50–89) ppm. Водночас емісія CO суттєво знижується — приблизно у 20 разів при спалюванні суміші з рівним вмістом метану і водню ($[\text{CH}_4]/[\text{H}_2] = 50/50\%$), досягаючи (1–2) ppm.

Отримані результати також свідчать про значну роль конструкції стабілізатора полум'я: у випадку одностадійного пальника фірми SUEMAX.

Довжина факелу в досліджуваних режимах була на 20 % меншою порівняно з пальником зі струменево-нішевою системою (СНС).

У **четвертому розділі** основною метою дослідження є встановлення впливу відсоткового вмісту водню в метано-водневій паливній суміші на рівень утворення оксидів азоту (NO_x) при спалюванні у штатних осьових пальниках водогрійного котла типу ДКВР-10-13. Крім того, у роботі поставлено завдання визначити усереднені характеристики теплообміну в топковій камері цього котельного агрегату з використанням програмного пакету CFD-моделювання ANSYS Fluent. Завдяки попередній верифікації результатів моделювання з експериментальними даними, наведеними в літературі, стало можливим дослідити ширший діапазон режимних параметрів, що можуть впливати на ефективність роботи котла загалом.

Дисертаційна робота оформлена відповідно до вимог наказу МОН України від 12 січня 2017 р. № 40 «Про затвердження вимог до оформлення дисертації».

Оприлюднення результатів дисертаційної роботи.

Наукові результати дисертації висвітлені у 4-х наукових публікаціях здобувача, серед яких: 4-и статті у наукових виданнях, включених на дату опублікування до переліку наукових фахових видань України;

Також результати дисертації були апробовані на 4-х наукових фахових конференціях.

Усі наукові публікації здобувача відзначаються високим рівнем наукової якості, пройшли рецензування та перевірку на плагіат відповідно до вимог видавництва. Особистий внесок автора у співавторських роботах є суттєвим і підтверджується безпосередньою участю у виконанні досліджень, викладених у відповідних публікаціях.

Таким чином, наукові результати описані в дисертаційній роботі повністю висвітлені у наукових публікаціях здобувача.

Недоліки та зауваження до дисертаційної роботи.

1. У лабораторному дослідженні застосовувалися одностадійні пальники фірми SUEMAX і типу СНС, а в моделюванні розглядався двостадійний котельний пальник ГМГ-4. Доцільніше було б, для отримання коректних результатів використовувати пальники одного типу.

2. Номінальна потужність пальника SUEMAX становила 30 кВт, в той же час основні лабораторні дослідження викидів оксидів азоту та СО проведені на потужності 10 кВт, а порівняння з пальником СНС проведено на потужності 20 кВт. Такі порівняльні дослідження коректніше проводити на номінальній та однаковій потужності розглянутих пальників.

3. В роботі не скрізь представлені похибки шуканих фізичних величин, особливо це зауваження відноситься до важливого розділу експериментальних досліджень.

4. В роботі трапляються поодинокі граматичні помилки і формулювання, які не завжди відповідають вимогам чіткої та однозначної наукової мови, зокрема у висновках, в яких важливо максимально стисло та зрозуміло передати основні результати дослідження.

Вважаю, що висловлені зауваження не є визначальними і не зменшують загальну наукову новизну та практичну значимість результатів та не впливають на позитивну оцінку дисертаційної роботи.

Висновок про дисертаційну роботу.

Вважаю, що дисертаційна робота здобувача ступеня доктора філософії Рябцуна Руслана Сергійовича на тему «Енерготехнологічні особливості використання водневих технологій в технологічних установках» виконана на високому науковому рівні, не порушує принципів академічної доброчесності та є закінченим науковим дослідженням, сукупність теоретичних та практичних результатів якого розв'язує наукове завдання, що має істотне значення для галузі знань 14 Електрична інженерія. Дисертаційна робота за актуальністю, практичною цінністю та науковою новизною повністю відповідає вимогам чинного законодавства України, що передбачені в п.6 – 9 «Порядку присудження ступеня доктора філософії та скасування рішення разової спеціалізованої вченої ради закладу вищої освіти, наукової установи про присудження ступеня доктора філософії», затвердженого Постановою Кабінету Міністрів України від 12 січня 2022 р. № 44.

Здобувач Рябцун Руслан Сергійович заслуговує на присудження ступеня доктора філософії в галузі знань 14 Електрична інженерія за спеціальністю 142 Енергомашинобудування.

Рецензент:

доцент кафедри атомної
енергетики
КПІ ім. Ігоря Сікорського,
кандидат техн. наук, с.н.с.



Валерій РОГАЧОВ



«30» травня 2025 року

Підпис
к.т.н. с.н.с.
Рогова В.А.
засвідчую
В.п. директора
ННІАТЕ
Євген Писемний