

## ВІДГУК

офіційного опонента, доктора технічних наук, старшого наукового співробітника, головного наукового співробітника Інституту технічної теплофізики НАН України Давиденка Бориса Вікторовича на дисертаційну роботу Рябцуна Руслана Сергійовича «Енерготехнологічні особливості використання водневих технологій в технологічних установках», представлену на здобуття наукового ступеня доктора філософії в галузі знань 14-Електрична інженерія за спеціальністю 142 -Енергомашинобудування.

**Актуальність теми дисертації.** Застосування водню як енергоносія є важливою задачею сучасної енергетики. Одним з варіантів використання водню полягає у створенні його суміші з природним газом для подальшого використання цієї суміші як палива. Це сприятиме зменшенню викидів вуглекислого газу в атмосферу, що утворюється при згорянні викопного вуглеводневого палива, зменшенню негативного навантаження на довкілля з боку енергетики та запобіганню глобальних кліматичних змін. Таким чином, застосування водню як додаткового компонента до органічного палива може вважатися одним із шляхів декарбонізації енергетики, тому що при згоранні водню утворюється лише вода. Але суттєвою проблемою на шляху використання водню в енергетиці є висока вартість його виробництва та складності у технології його спалювання. Ці питання можуть бути вирішені на основі результатів поглиблених наукових досліджень процесів спалювання метано - водневих сумішей у технологічних установках. Отже тему дисертаційної роботи Рябцуна Р. С. «Енерготехнологічні особливості використання водневих технологій в технологічних установках», мета якої полягає у визначенні енергетичних та екологічних характеристик процесів горіння газового палива при заміщенні природного газу на водень, слід вважати актуальною.

**Структура і обсяг дисертації.** Дисертаційна робота складається зі вступу, чотирьох розділів, висновків, списку використаних джерел, що включає 42 найменування, і додатків. Загальний обсяг роботи складає – 113 сторінок, у тому числі 31 – рисунок, 2 – таблиці, 2 додатка на 2 сторінках.

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

За своїм змістом дисертаційна робота Рябцуна Р.С. повністю відповідає Стандарту вищої освіти зі спеціальності 142 Енергомашинобудування та напрямкам досліджень відповідно до освітньої програми Енергомашинобудування кафедри атомної енергетики Національного технічного університету України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського» Міністерства освіти і науки України.

Дисертаційна робота є завершеною науковою працею і свідчить про наявність особистого внеску здобувача у науковий напрям дослідження фізики процесів горіння, підвищення енергоефективності та ресурсозбереження енергетичних 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.

**Коротка характеристика змісту роботи.**

У **вступі** обґрунтовано актуальність теми дисертаційної роботи, сформульовано мету роботи, розглянуто об'єкт, предмет та методи досліджень, визначено наукову новизну, ступінь обґрунтованості наукових результатів та висновків, практичну цінність результатів роботи. Приведені відомості про особистий внесок автора. Наведено дані про апробацію результатів

дисертаційної роботи, про публікації за темою дисертації, структуру та обсяг роботи. Визначено зв'язок дисертаційної роботи з науковими програмами, планами і темами.

В **першому розділі** представлено літературний огляд і аналіз наукових джерел, присвячених застосуванню палив із вмістом водню у промислових і побутових сферах. Розглядаються особливості технологій виробництва водню. Визначено можливості розвитку водневої енергетики, аналізується її ефективність та склад викидів шкідливих речовин під час спалювання метано-водневої суміші. Зазначається, що визначальним фактором щодо емісії шкідливих речовин є технологія спалювання. Проаналізовано результати досліджень, що стосуються обсягу споживання природного газу і перспективи виробництва "зеленого" водню. У даному розділі розглядаються основні типи альтернативних газових палив, що можуть заміщувати природний газ. Увага також приділяється екологічним проблемам щодо заміщення природного газу паливними сумішами на основі водню. Розглядаються перспективи промислового виробництва водню. Наведено аналіз результатів використання водню як палива. За результатами літературного огляду і аналізу відомих наукових результатів формулюється мета дослідження та його основні завдання.

В **другому розділі** згідно з завданнями виконано теоретичний аналіз вогнетехнічних та екологічних характеристик газових палив, оснований на метано-водневих сумішах. Вивчено зміну швидкості горіння і адіабатичної температури згоряння при збільшенні частки водню в паливі, а також оцінено утворення оксидів азоту і викиди CO. Показано, що при використанні водню як палива треба враховувати екологічний ефект, який пов'язаний зі збільшенням емісії  $\text{NO}_x$  при досить помірному зменшенні утворення  $\text{CO}_2$ .

В **третьому розділі** наведено результати експериментальних досліджень спалювання метано-водневих сумішей. Визначено температури продуктів згоряння на осі та периферії факелу. Показано збільшення температури факелу  $\sim 100^\circ\text{C}$  для метано- водневих сумішей в порівнянні з випадком спалювання

природного газу. Результати експериментальних досліджень показали, що введення водню до складу паливної суміші сприяє суттєвому зменшенню викидів оксиду вуглецю. Водночас при цьому підвищується температура димових газів і зростає емісія оксидів азоту.

Результати експериментальних досліджень демонструють також суттєвий вплив конструктивних особливостей пальника на характеристики факела. У досліджуваних режимах довжина факела пальника SUEMAX була на 20 % меншою, ніж у пальника типу СНС.

У **четвертому розділі** наведено результати комп'ютерного моделювання процесу спалювання метано-водневих сумішей у котельних установках. Моделювання виконується з метою визначення впливу відсоткового вмісту водню в паливній суміші з метаном на утворення оксидів азоту ( $\text{NO}_x$ ) в пальниках водогрійного котла типу ДКВР-10-13 та для порівняння отриманих результатів з експериментальними даними. Було досліджено, як змінюється утворення оксидів азоту ( $\text{NO}_x$ ) при зміні частки водню в метано-водневій суміші при згорянні суміші в стандартних осьових пальниках водогрійного котла моделі ДКВР-10-13. Також у роботі проведено розрахунок середніх параметрів теплообміну в топковій камері котла за допомогою CFD-моделювання у середовищі ANSYS Fluent. Після попередньої верифікації моделі на основі експериментальних даних, отриманих із наукових публікацій, здійснено аналіз ширшого діапазону режимних параметрів, що впливають на роботу котельного агрегату.

У **висновках** наведено узагальнення отриманих у дисертаційній роботі наукових й практичних результатів.

**Наукова новизна результатів** дисертаційного дослідження полягає в наступному:

1. Отримані нові експериментальні дані, що підтверджують можливість організації процесу нормального спалювання газової суміші водню з метаном зі

співвідношенням компонентів 50/50, % об. при використанні існуючих промислових пальників.

2. Вперше досліджені характеристики факелу, що утворюється при спалюванні метано-водневих сумішей, та виконано порівняння цих характеристик з характеристиками факелу, що утворюється при спалюванні природного газу. Визначено температури продуктів згоряння на осі та на периферії факелу. Показано, що при співвідношенні компонентів газової суміші водню з метаном 50/50, % об. температура факелу збільшується на  $\sim 100$  °C в порівнянні з випадком спалювання природного газу. При цьому, температура на осі факелу більша, ніж на периферії на  $\sim 100$  C.

3. За результатами аналізу експериментальних даних визначено, що при спалюванні метано-водневої суміші зменшуються викиди CO та збільшується температура викидних газів, а також збільшується емісія  $\text{NO}_x$ . При спалюванні чистого водню емісія оксидів азоту зростає в  $\sim 1,5 \dots 2,0$  рази, а утворення CO при співвідношенні компонентів газової суміші водню з метаном 50/50, % об зменшується в 20 разів.

4. Вперше проведено комп'ютерне моделювання процесу спалювання метано-водневих сумішей в паровому котлі. Як приклад розглядається паровий котел ДКВР-10/13. Показано відповідність і адекватність комп'ютерних моделей результатам власних експериментальних досліджень щодо емісійних та вогнетехнічних характеристик роботи обладнання, призначеного для спалювання метано-водневої суміші.

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

**Практична цінність** результатів роботи полягає в тому, що

1. Отримані практичні результати є науковим підґрунтям для широкого використання водню в сумішах з природнім газом в промисловості та в комунально-побутовому секторі.

2. Показано можливості використання метано-водневих сумішей при заміщенні природного газу на водень, як перспективне екологічно чисте паливо для роботи на існуючому обладнанні без зміни його конструкції та теплових характеристик роботи.

3. Визначено рівні емісії  $\text{NO}_x$  та  $\text{CO}$  при спалюванні метано-водневої суміші для пальників різних конструкцій.

### **Мова та стиль викладення результатів**

Дисертаційна робота написана українською мовою. У цій роботі результати дослідження викладені послідовно і зрозуміло з використанням загальноприйнятої наукової термінології. Текст дисертації супроводжується достатньою кількістю ілюстрацій та таблиць, що сприяє повному й наочному представленню матеріалу.

### **Оприлюднення результатів дисертаційної роботи**

Наукові результати дисертації висвітлені у 4 наукових публікаціях здобувача, серед яких: 4 статті у наукових виданнях, включених на дату опублікування до переліку наукових фахових видань України. Також результати дисертації були апробовані на 4 наукових фахових конференціях.

Публікації здобувачки виконані на високому науковому рівні та відображають результати проведеного дослідження. У наукових роботах дотримано принципи академічної доброчесності. Таким чином, наукові результати, описані в дисертаційній роботі, повністю висвітлені у наукових публікаціях здобувача.

### **Оформлення дисертаційної роботи**

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

## **Недоліки та зауваження до дисертаційної роботи.**

1. В роботі, що розглядається, проведені дослідження з використання водню, як перспективного газового палива. Причому автор рекомендує максимально-допустиму кількість водню в суміші на рівні 50 %. Проте автор ніяким чином не проаналізував, чи можливо забезпечити транспортування суміші такого складу через наявні газо-розподільчі мережі до споживача. Також ніяким чином не проаналізовано та не розглянуте питання щодо зменшення міцності зварних швів трубопроводів при використанні такого палива.

2. При аналізі роботи пальників автор порівняв між собою пальники тільки двох типів – одностадійного SUEMAX (пальник дифузійного типу спалювання) та струменево-нішового (пальник кінетичного типу спалювання), проте коректно було б проводити таке порівняння для пальників одного типу спалювання, зокрема привести дослідження зменшення емісії оксидів азоту для двостадійного пальника та для умов використання рециркуляції.

3. При проведенні розрахунків та моделювання роботи котла на метано-водневих паливах відбувається збільшення температури відхідних газів через меншу теплотворну здатність такої суміші у порівнянні з метаном, та відповідно зменшення ККД котла. Але автор оцінок зміни ККД в роботі не привів.

Висловлені зауваження не є визначальними і не зменшують наукову новизну та практичну цінність результатів дисертації. Вони також не впливають на загальну 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.

**Офіційний опонент:**

головний науковий співробітник  
Інституту технічної теплофізики  
НАН України  
д.т.н., ст. наук. співр.



Борис ДАВИДЕНКО

«29» травня 2025 року

