

## **ВІДГУК**

офіційного опонента 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 «Енергетичне машинобудування»

### **Актуальність теми дисертації.**

Залежність від викопного палива – вугілля, нафти та природного газу – спричиняє як енергетичну вразливість країни, так і значне забруднення довкілля внаслідок утворення шкідливих продуктів згоряння. З метою зменшення викидів таких сполук, як  $\text{CO}_2$  та  $\text{NO}_x$ , активно впроваджуються новітні технології у сфері спалювання викопних енергоносіїв. Щоб забезпечити енергетичну автономію та зменшити вплив на клімат, все більше держав переходять на альтернативну енергетику та безвуглецеві рішення. На початку 2021 року частка електроенергії, отриманої з відновлювальних джерел в Україні, становила 9%. Серед різних альтернатив особливу роль відіграє водень, який має значно більшу масову енергоємність порівняно з традиційними паливами, як-от газ, нафта чи вугілля. Головною перевагою водню є те, що при його згорянні не утворюється вуглекислий газ.

Зважаючи на перспективи використанню водню в якості безвуглецевого палива, тема дисертаційної роботи Рябцуна Р.С. є актуальною. Під час дослідження були встановлені енергетичні та екологічні характеристики процесів згоряння газоподібного палива при частковій заміні природного газу воднем. Отримані дані можуть слугувати як теоретичною базою, так і практичним керівництвом для подальшого впровадження водню в енергетиці та промисловості.

### **Оцінка обґрунтованості наукових результатів дисертації, їх достовірності та новизни.**

Наукова новизна результатів дисертаційного дослідження полягає в наступному:

1. Проведено експериментальні дослідження в лабораторних умовах підтвердили можливість забезпечення процесу нормального спалювання сумішевого газу із вмістом водню  $[\text{CH}_4] / [\text{H}_2] = 50 / 50$ , % об.; з використанням існуючих промислових пальників.

2. Вперше досліджені характеристики факелу при спалюванні метано-водневих сумішей в порівнянні з випадком спалювання природного газу.

Визначені температури продуктів згоряння на осі та периферії ї факелу. Показано збільшення температури факелу  $\sim 100$  °C для метано-водневих 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<sub>x</sub>.

4. Встановлено, що емісія оксидів азоту NO<sub>x</sub> зростає в  $\sim 1,5 \dots 2,0$  рази та становить [NO<sub>x</sub>] = 89–50 ppm для спалювання чистого водню. В той же час відмічається суттєве зниження утворення CO,  $\sim 20$  разів при спалюванні суміші [CH<sub>4</sub>] / [H<sub>2</sub>] = 50 / 50, % об., рівень утворення CO становить [CO] = 1 – 2 ppm.

5. Вивчено характеристики та структуру факелу при спалюванні метано-водневих сумішей, показано, що температура на осі факелу більша ніж на периферії на  $\sim 100$  °C для суміші [CH<sub>4</sub>] / [H<sub>2</sub>] = 50 / 50, % об. у порівнянні з природним газом.

6. Вперше проведено комп'ютерне CFD моделювання спалювання метано-водневих сумішей в паровому котлі (на прикладі парового котла ДКВР-10 / 13).

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

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

В дисертаційній роботі поставлені та вирішені такі завдання:

- визначення вогнетехнічних та екологічних властивостей газових палив, складених із сумішей метану та водню, а саме швидкостей горіння, зміни адіабатичної температури горіння сумішей при збільшенні долі водню у паливі, оцінці утворення оксидів азоту, та викидів CO<sub>2</sub>;

- підготовка вимірювальної установки для проведення експериментальних досліджень;

- визначення енергоекологічних характеристик спалювання метано-водневих сумішей в промисловому газовому пальнику з визначенням емісії NO<sub>x</sub>, CO та температурних характеристик факелу з порівнянням з випадком спалювання чистого природного газу (метану).

- визначення середніх характеристик теплообміну в топковій камері згаданого котельного агрегату за допомогою відомого пакету програм CFD-моделювання ANSYS-Fluent

- визначення впливу процентного вмісту водню в паливній суміші з метаном на утворення оксидів азоту (NO<sub>x</sub>), при використанні в штатних осьових пальниках водогрійного котла типу ДКВР-10-13.

Здобувач повною мірою оволодів методологією наукової діяльності.

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

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

Дисертаційна робота Руслана РЯБЦУНА є завершеною науковою працею і свідчить про наявність особистого внеску здобувача у науковий напрям фізика процесів горіння, підвищення енергоефективності та ресурсозбереження енергетичних об'єктів і систем. Вона відповідає пріоритетним тематичним напрямкам наукових досліджень і науково-технічних розробок, затверджених Постановою Кабінету Міністрів України від 30 квітня 2024 р. № 476, а саме – «Енергоефективність і енергозбереження, ринки енергоресурсів» розділу «Енергетика та енергоефективність»

Після розгляду звіту подібності за результатами перевірки дисертаційної роботи на текстові збіги можна зробити висновок, що дисертаційна робота Рябцуна Руслана Сергійовича є результатом самостійних досліджень здобувача і не містить елементів фальсифікації, копії, 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 мовою.

У поданій роботі результати дослідження подано логічно й доступно, із використанням усталеної наукової термінології. Матеріал дисертації належним чином доповнено ілюстраціями та таблицями, що забезпечує повноту та наочність викладення.

Дисертація складається з вступу, чотирьох розділів, висновків, списку літератури на 42 джерела та додатків. Загальний обсяг дисертації 113 сторінок.

У вступі обґрунтовано вибір теми дослідження, визначено мету, сформульовано завдання, окреслено об'єкт і предмет дослідження, описано використані методи. Представлено наукову новизну, практичну значущість отриманих результатів, подано інформацію про апробацію дослідження та перелік наукових публікацій. Також визначено перелік завдань, необхідних для досягнення поставленої мети.

У першому розділі здійснено аналіз наукових джерел, присвячених застосуванню водневмісних палив у промислових та побутових умовах. Розглянуто особливості процесів виробництва водню та визначено потенціал розвитку водневої енергетики. Проаналізовано наукові праці, у яких описуються масштаби використання природного газу та перспективи

впровадження зеленого водню. Окрему увагу зосереджено на екологічних перевагах заміни природного газу паливами з воднем. Розділ завершується чітким формулюванням мети дослідження та переліком основних завдань.

У другому розділі у рамках дослідження виконано теоретичний та аналітичний аналіз вогнетехнічних і екологічних властивостей газових палив, утворених на основі метано-водневих сумішей. Досліджено зміну швидкості горіння й адіабатичної температури згоряння зі збільшенням вмісту водню в паливі, а також проведено оцінку утворення оксидів азоту та обсягів викидів  $\text{CO}_2$ .

У третьому розділі експериментальні результати показали, що введення водню до складу паливної суміші сприяє суттєвому зменшенню викидів оксиду вуглецю, водночас підвищуючи температуру димових газів і призводячи до зростання емісії оксидів азоту. Зокрема, при спалюванні чистого водню концентрація  $\text{NO}_x$  збільшувалася у 1,5–2 рази, досягаючи значень 50–89 ppm. При цьому вміст CO при об'ємному відношенні  $[\text{CH}_4]/[\text{H}_2] = 50/50$  знижувався приблизно у 20 разів – до рівня 1–2 ppm.

Також виявлено вплив конструктивних особливостей пальника на характеристики факела: у досліджуваних режимах довжина факела пальника SUEMAX була на 20 % меншою, ніж у пальника типу СНС, що свідчить про ефективнішу роботу стабілізатора полум'я в його конструкції.

У четвертому розділі досліджено, як зміна частки водню в метано-водневій суміші впливає на рівень утворення оксидів азоту ( $\text{NO}_x$ ) під час згоряння в стандартних осьових пальниках водогрійного котла моделі ДКВР-10-13. Також у роботі проведено визначення середніх параметрів теплообміну в топковій камері цього котла за допомогою CFD-моделювання у програмному пакеті ANSYS Fluent. Після попередньої верифікації моделі на основі експериментальних даних із публікацій, було здійснено аналіз розширеного набору режимних параметрів, що впливають на продуктивність котельної установки.

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 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 здобувача 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.

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

Окрім отриманих в роботі оригінальних результатів можна навести такі зауваження:

1. В роботі ніяким чином не проведена оцінка похибок вимірювань характеристик горіння та похибок визначення складу сумішевих метано-водневих палив.
2. В роботі чомусь не приводиться енергетичний вклад водню при спалюванні суміші метану та водню. Доцільно було привести оцінку максимальної частки водню в метано-водневій суміші для стандартного газового пальника.
3. Дослідження характеристик горіння метано-водневих сумішей фактично проведені лише на одній конструкції пальника – одно стадійному пальнику фірми SUEMAX. Не зрозуміло як отримані результати будуть корисуватимся при використанні газових пальників інших типів та виробників.
4. В роботі не розкрито механізм зміни характеристик світимості факела при переході на спалювання метано-водневих сумішей при збільшенні частки водню в паливі.
5. При проведенні математичного моделювання спалювання метано-водневих сумішей в котлі ДКВР-10-13 не зрозуміло, яким чином враховано зміну характеристик роботи штатного двохстадійного пальника при переході на нове сумішеве паливо.
6. При оцінці впливу частки водню в суміші на викид діоксиду сірки та інших інгредієнтів слід враховувати саме енергетичну частку водню, а не об'ємну.
7. В роботі часто присутня плутаниця термінів: «доля», а вірно – «частка», «складати», а вірно – «становити».

Але вказані зауваження не є визначальними і не зменшують загальну наукову новизну та практичне значення результатів та 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 «Енергетичне машинобудування».

**Офіційний опонент:**

заступник директора з наукової роботи  
Інституту теплоенергетичних технологій  
НАН України

д.т.н., професор



Ігор ВОЛЬЧИН

«28» травня 2025 року