

## **ВІДГУК**

офіційного опонента на дисертаційну роботу

*Ніжник Наталії Андріївни*

**«Зниження утворення оксидів азоту при спалюванні метану з додаванням водневих розчинів»,**

яка подана на здобуття ступеня доктора філософії в галузі знань 14

«Електрична інженерія» за спеціальністю 144 «Теплоенергетика»

### **Актуальність теми дисертації.**

Актуальними питаннями сьогодення в світі є практичне забезпечення переходів від традиційних джерел енергії (зазвичай викопних паливних енергетичних ресурсів) до відновлювальних джерел енергії (ВДЕ), тобто таких, які існують постійно або виникають періодично у довкіллі. Сюди можна віднести енергії сонця, вітру, річок, а також біомасу та вторинні ресурси. Проте, широке впровадження ВДЕ для забезпечення стабільного енергопостачання потребує будівництва регулюючих (балансуючих) потужностей. Передбачається, що після 2050 року основні заходи в енергетиці будуть спрямовані на використання ВДЕ, і використання водневих технологій може бути одним з шляхів впровадження ВДЕ. В такому ключі саме водень може бути проміжним продуктом для зберігання надлишкової електроенергії і сприятиме вирішенню цієї проблеми.

Одним з перспективних напрямків з промислового використання водню є використання його в якості палива на об'єктах енергетики, промислових та теплопостачальних підприємствах, на яких у найбільшій кількості (серед інших викопних палив) використовується природний газ. При спалюванні метано-водневої суміші у топкових камерах котельних агрегатах слід враховувати зміну променевих теплових потоків, за рахунок локального підвищення температури, що може призводити до швидкого зношення внутрішніх конструктивних елементів топки котла. Для запобігання цьому необхідно проводити конструктивні зміни, які потребують попереднього перерахунку топкового простору котла, з визначенням нових значень параметрів та кореляційних коефіцієнтів, що враховують добавки водню до газової суміші. Ще однією проблемою є відсутність у нормативному методі розрахунку котельних агрегатів такого палива, як водень, що унеможливило його легітимне використання у котлах.

Тому розроблення способів використання водневого палива на наявному котельному обладнанні та методів пригнічування процесів утворення оксидів азоту при спалюванні палива, що містить водневі розчини є вкрай необхідним для вирішення енергетичних та екологічних задач. Використання водню шляхом утворення синтетичного метану сприятиме також декарбонізації енергетики. Це

все зумовлює **актуальність** наукового завдання цієї дисертаційної роботи, яке потребує вирішення.

### **Зв'язок роботи з науковими програмами, планами.**

Тематика та розділи цієї дисертації входили до складу наукових робіт, які були виконані в Інституті технічної теплофізики Національної академії наук України. Результати досліджень здобувачки отримані в процесі виконання досліджень наступних науково-дослідних робіт та договорів: НДР 1.7.1.873 «Розроблення методів і обладнання для підвищення енергоекологічних характеристик котлоагрегатів комунальної енергетики потужністю 3,15 - 30 МВт відповідно до вимог Директив ЄС» (№ДР 0115U002605); КПКВК 6451230 «Підвищення ефективності спалювання штучних палив з твердих побутових відходів і біомаси в когенераційних установках шляхом використання водню, кисню, синтетичного та біометану для забезпечення енергетичної безпеки України»; Господарчий Договір № 495 від 01.12.2019 р. на надання послуг з розроблення «Схеми теплопостачання м. Києва на період до 2030 року; Господарчий Договір №496 від 01.07.2020 р. на надання послуг з «Розроблення та затвердження у встановленому законодавством порядку схеми теплопостачання м. Одеси».

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

Наукова новизна результатів дисертаційного дослідження полягає в наступному:

- вперше показано, що при температурах понад 800 °С ще присутній вагомий вплив кінетичного механізму утворення монооксиду азоту ( $NO_{\text{пот}}$ ). Експериментально показано, що у різних перерізах фронту полум'я цей вплив різний за характером;
- вперше проведено дослідження утворення у полум'ї окремо  $NO$  і  $NO_2$  показало, що відбувається процес переходу  $NO$  в  $NO_2$  у фронті полум'я шляхом до окиснення;
- вперше показано, що інтенсивність доокислення  $NO$  в  $NO_2$  має свій екстремум, який залежить від концентрації водню у додатковому об'ємі рідини, що вводиться;
- вперше показано що збільшення концентрації розчину  $H_2O_2$  від нуля до 30% призводило до збільшення рівня температур в тому числі внаслідок догорання  $CO$ , а також до збільшення сумарного утворення оксидів азоту на 35-45%;
- вперше запропоновано показник, який характеризує зміну теплотворної здатності одиниці об'єму метано-водневого палива в порівнянні з

метаном, що залежить від об'ємної частки вмісту водню у паливній суміші;

- вперше процес горіння розглядався в цій роботі як трикомпонентна реакція, що окрім палива та окисника, включає водяну пару, яка наявна у вигляді вологи в атмосферному повітрі.

Практична цінність результатів роботи:

1. Вперше запропоновано спосіб використання водню з отриманням синтетичного метану у замкнутій схемі виробництва теплової енергії на існуючих теплоджерелах, що не потребує зміни конструктивних елементів котельного обладнання; технологія прийнята до впровадження рішеннями сесій відповідних міських рад (отримано Акти впровадження науково-технічних рішень) на двох теплоджерелах:

- створення Водневого ХАБу в м. Києві на базі потужного теплоджерела «СТ-1» за адресою вул. Жилянська, 85;
- створення Водневого ХАБу в м. Одесі на базі потужного теплоджерела РК«Південна-1» за адресою пр-т Ак. Глушка, 11.

2. Вперше запропоновано використання ефекту допалювання СО за рахунок додавання палива, що містить водень, шляхом організації процесу спалювання палива зі зниженим (ближче до стехіометричного) коефіцієнтом надлишку повітря і, як наслідок, збільшеним ККД.

За результатами роботи оформлено та подано заявку на винахід, що стосується способу утилізації надлишкової електричної енергії із застосуванням водневих технологій шляхом використання її для отримання водню, з подальшим утворенням синтетичного метану та спалюванням його в котлах.

Поставлене завдання в дисертаційній роботі виконано в повному обсязі.

Наукові положення та висновки, що містяться в дисертаційній роботі, є теоретично обґрунтованими і підтверджуються проведеними експериментальними дослідженнями під час виконання науково-дослідних робіт, апробацією на наукових міжнародних конференціях і наукових семінарах.

Представлена дисертаційна робота є завершеним науковим дослідженням. Зміст дисертації, структура, послідовність та повнота розв'язаних задач цілком відповідають темі роботи. Також достовірність підтверджується впровадженням результатів дисертаційного дослідження на об'єктах теплопостачання в м. Києві та в м. Одеса. Це підтверджено відповідними актами впровадження науково-технічних рішень.

Представлена робота відповідає принципам академічної доброчесності, а саме: відтворення в тексті наукової роботи результатів дослідження інших науковців наведено з посиланнями, що не порушує Закон України «Про

авторське право і суміжні права»; адекватність та точність наведеної інформації (без спотворення) з цитуванням із іноземних джерел.

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

За своїм змістом дисертаційна робота здобувачки Ніжник Н.А. повністю відповідає Стандарту вищої освіти зі спеціальності 144–Теплоенергетика та напрямкам досліджень відповідно до освітньої програми ІТТФ НАН України зі спеціальності 144– Теплоенергетика.

Наукові положення та висновки, що містяться в дисертаційній роботі, є теоретично обґрунтованими і підтверджуються проведеними експериментальними дослідженнями під час виконання науково-дослідних робіт, апробацією на наукових міжнародних конференціях і наукових семінарах.

Представлена дисертаційна робота є завершеним науковим дослідженням. Зміст дисертації, структура, послідовність та повнота розв'язаних задач цілком відповідають темі роботи. Також достовірність підтверджується впровадженням результатів дисертаційного дослідження на об'єктах теплопостачання в м. Києві та в м. Одеса. Це підтверджено відповідними актами впровадження науково-технічних рішень.

Представлена робота відповідає принципам академічної доброчесності, а саме: відтворення в тексті наукової роботи результатів дослідження інших науковців наведено з посиланнями, що не порушує Закон України «Про авторське право і суміжні права»; адекватність та точність наведеної інформації (без спотворення) з цитуванням із іноземних джерел.

Дисертаційна робота є завершеною науковою працею і свідчить про наявність особистого внеску здобувача у науковий напрям збереження природних ресурсів та навколишнього середовища.

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

Дисертаційна робота написана українською мовою. Матеріали дисертації розміщено послідовно і структуровано з використанням загальноприйнятої термінології.

Дисертаційна робота складається зі вступу, п'яти розділів, висновків, списку використаних джерел та 6 додатків. Загальний обсяг дисертації 181 сторінок.

У вступі розглянуто актуальність, мету та задачі дослідження, наведено наукову новизну та практичне значення одержаних результатів, наведено дані про зв'язок роботи з науковими програмами, викладено наукову новизну та практичне значення отриманих результатів. Представлено інформацію про особистий внесок здобувачки та перелік її наукових публікацій.

**У першому розділі** проведено огляд літературних даних за тематикою досліджень. Зокрема проаналізовано паливно-енергетичний баланс України і динаміку його зміни за крайні роки. Показано пріоритетність розвитку водневих технологій та описано проблематику, яка пов'язана з використанням водню як палива на наявному котельному обладнанні, запропонований спосіб використання водню з перетворенням його на синтетичний метан в рамках «Водневого ХАБу». Вміст синтетичного метану при такому способі використання водню може становити до 85%, а решта 15% - це вміст інших компонентів, що не прореагували, з яких концентрація водню (у водному розчині) - близько 10-11%. Саме вивчення закономірностей утворення оксидів азоту при спалюванні метану з добавками розчинів, що містять водень близько 10...11% потребує цілеспрямованих досліджень. Це зумовлює високу актуальність роботи.

**У другому розділі** проаналізовано процеси та параметри, які впливають на ефективність спалювання вуглецевого палива та механізми утворення оксидів азоту. Процес горіння розглядався в цій роботі як трикомпонентна реакція, що окрім палива та окисника, включає водяну пару, яка наявна у вигляді вологи в атмосферному повітрі. Визначено, що «кінетичний» механізм утворення NO вивчений недостатньо, але саме він має значний вплив на процеси у невеликих спалювальних установках.

**У третьому розділі** описано модернізовану експериментальну установку та методики, використані для досліджень вивчення утворення оксидів азоту та локальних температур у фронті полум'я від зміни вмісту водневих розчинів у суміші, що спалюється. Проведено аналіз похибки досліджень.

**У четвертому розділі** досліджено вплив введення крапельної вологи та перекису водню різної концентрації на процес горіння і утворення оксидів азоту, визначено найсприятливіші умови доокиснення діоксиду азоту в оксид азоту.

**У п'ятому розділі** запропоновано спосіб використання водню на існуючому котельному обладнанні на прикладі систем централізованого тепlopостачання міст Києва та Одеси.

**В додатках** наведені: інформація про подану заявку патенту на винахід, короткий опис водневої стратегії, характеристики та акти повірки вимірювальних приладів, короткий опис двох теплогерел, для яких запропонований спосіб використання водню, та відповідні Акти впровадження.

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 28 наукових публікаціях здобувача, серед яких: 2 статті представлені у виданнях, які включено до міжнародних наукометричних баз даних *SCOPUS* та *WoS*; 2 статті у наукових спеціалізованих виданнях України, перелік яких затверджено МОН України; 1 стаття в колективній монографії закордонного видання, 1 стаття у закордонних наукових виданнях, 1 заявка на винахід.

Також результати дисертації були апробовані на 6 наукових фахових конференціях міжнародного рівня та Робочій зустрічі при Мінрегіоні України.

Усі публікації розкривають наукові здобутки отримані під час роботи над дисертацією та мають особистий внесок здобувачки. Таким чином, наукові результати описані в дисертаційній роботі повністю висвітлені у наукових публікаціях здобувачки.

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

1. У розділі 1 значна частина тексту стосується доцільності впровадження водневих проектів саме для України, тоді як було б корисно зробити більш масштабний аналіз відзначивши не тільки досягнення, а проблематику.
2. Не розглянуті всі хімічні процеси, що відбуваються в цьому циклі при спаленні метану з додаванням водневих розчинів.
3. На рис. 4.1.3. для перерізу фронту полум'я при  $\delta=0,51$  мм з представленою відмінності результатів вимірювання і очікуваного значення концентрації оксиду азоту, не зрозуміло чи це похибка експерименту чи зона, яка дійсно потребує детального вивчення.
4. Недостатньо уваги приділено вивченню термодинамічної складової на утворення оксидів азоту.
5. Перекис водню є окисником, тому необхідно наводити показник концентрації кисню у водному розчині, що додається при спаленні метану.
6. В переліку публікацій здобувачки стаття за п.2 не стосується теми дисертаційної роботи, а в посиланні на статтю за п. 24 відсутнє прізвище здобувачки серед авторів.

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.

### **Загальний висновок опонента по дисертаційній роботі.**

Детальний аналіз матеріалу дисертаційної роботи та опублікованих наукових праць дає змогу стверджувати, що дисертаційна робота здобувачки

ступеня доктора філософії Ніжник Наталії Андріївни на тему: «Зниження утворення оксидів азоту при спалюванні метану з додаванням водневих розчинів» містить усі ознаки завершеної наукової роботи. В ній отримані нові науково обґрунтовані теоретичні та експериментальні результати, що дають змогу зменшити утворення оксидів азоту при спалюванні метану.

Дисертаційна робота Ніжник Н.А. є самостійно виконаним науковим дослідженням, 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 теплоенергетичної галузі. Матеріал дисертації викладено послідовно, стиль викладання доказовий, чіткий та лаконічний. Висновки до кожного розділу і дисертації в цілому відображають суть виконаних досліджень. Публікації автора повністю висвітлюють наукові положення і результати наукових досліджень.

Враховуючи актуальність теми дисертаційної роботи, а також отримані достовірні наукові результати, що мають наукову і практичну значимість, та враховуючи достатню повноту висвітлення основних положень дисертаційної роботи в опублікованих працях, вважаю, що представлена дисертаційна робота повністю відповідає вимогам чинного законодавства України, що передбачені «Порядком 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, а її автор Ніжник Наталія Андріївна заслуговує присудження наукового ступеня доктора філософії зі спеціальності 144 – Теплоенергетика.

#### Офіційний опонент

кандидат технічних наук,  
старший дослідник,  
провідний науковий співробітник  
Інституту загальної енергетики  
Національної академії наук України

Олександр ТЕСЛЕНКО

Підпис Тесленка Олександра засвідчую  
Учений секретар Інституту загальної енергетики  
Національної академії наук України  
канд. техн. наук, ст. наук. співр.



Ірина ЛЕЩЕНКО