

Національний технічний університет України  
«Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»  
Міністерство освіти і науки України

Національний технічний університет України  
«Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»  
Міністерство освіти і науки України

Кваліфікаційна наукова  
праця на правах рукопису

**Рябцун Руслан Сергійович**

УДК 621.43.056

## **ДИСЕРТАЦІЯ**

**ЕНЕРГОТЕХНОЛОГІЧНІ ОСОБЛИВОСТІ ВИКОРИСТАННЯ ВОДНЕВИХ  
ТЕХНОЛОГІЙ В ТЕХНОЛОГІЧНИХ УСТАНОВКАХ**

142 – Енергомашинобудування

14 – Електрична інженерія

Подається на здобуття наукового ступеня доктора філософії

Дисертація містить результати власних досліджень. Використання ідей,  
результатів і текстів інших авторів мають посилання на відповідне джерело

\_\_\_\_\_ Руслан РЯБЦУН

Науковий керівник: Воробйов Микита Валерійович, к. т. н., доцент.

Київ – 2025

## АНОТАЦІЯ

*Рябцун Р.С.* Енерготехнологічні особливості використання водневих технологій в технологічних установках – Кваліфікаційна наукова праця на правах рукопису.

Дисертація на здобуття наукового ступеня доктора філософії за спеціальністю 142 «Енергетичне машинобудування». – Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського», Київ, 2025.

Підготовка здійснювалася на кафедрі атомних та електричних станцій Національного технічного університету України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського» Міністерства освіти і науки України.

**Ключові слова:** воднева енергетика, метано-водневі суміші, CFD моделювання, окисли азоту, процеси горіння, шкідливі викиди, промислові пальники, радіаційний та конвективний теплообмін, котельна установка.

Заміна природного газу воднем, окрім очевидних переваг у зменшенні викидів  $\text{CO}_2$  і декарбонізації атмосфери, спричиняє зміни вогнетехнічних та емісійних характеристик паливно-окислювальних сумішей. Зокрема, це веде до збільшення абсолютного споживання паливного газу через нижчу теплоту згоряння водню, а також до зростання утворення оксидів азоту ( $\text{NO}_x$ ) через вищу температуру горіння водню.

Завдання зменшення викидів парникових газів набуває дедалі більшої актуальності, що стимулює впровадження інноваційних водневих технологій у сфері енергетики, зокрема заміну природного

газу воднем. Змішування водню з природним газом сприяє поліпшенню екологічних показників і зменшенню утворення  $\text{CO}_2$ .

У **вступі** обґрунтовано актуальність дослідження, визначено його мету та основні завдання, а також визначено об'єкт і предмет дослідження. Розкрито наукову новизну та практичну цінність отриманих результатів, окреслено особистий внесок здобувача і зроблено ключові висновки. Наведено інформацію про апробацію результатів дослідження та можливі напрямки їх практичного застосування. Також описано загальний обсяг та структуру дисертаційної роботи.

В **першому розділі** проаналізовані відомі наукові роботи стосовно використання воденьмістких палив для промислових об'єктів та побутових пристроїв, також розглянуто особливості виробництва водню, та перспективи водневої енергетики. Опрацьовані наукові статті щодо кількості використання природного газу та перспективи виробництва зеленого водню. Особливу увагу приділено екологічним аспектам заміщення природного газу на суміші з воднем. На прикінці першого розділу сформульовано мету та завдання роботи.

В **другому розділі** проведені теоретично-розрахункові дослідження 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  $\text{CO}_2$ .

Використання водню при заміщенні природного газу крім очевидних переваг з декарбонізації атмосфери (зменшення викидів  $\text{CO}_2$ ) призводить до зміни вогнетехнічних та емісійних характеристик паливо-окислювальних сумішей, зокрема збільшення абсолютної витрати паливного газу через меншу теплоту згоряння

водню, збільшення утворення оксидів азоту  $\text{NO}_x$  через більшу температуру горіння водню та ін.

В **третьому розділі** проведено експериментальні дослідження спалювання метано-водневих сумішей на промисловому пальнику SUEMAX потужністю до 30 кВт. Доля заміщення воднем природного газу складала відповідно  $[\text{H}_2] = 30\%$  об. та  $50\%$  об. Також в пальнику було спалено чистий водень ( $[\text{H}_2] = 100\%$  об.). Мета дослідження полягала у визначенні енергоекологічних характеристик спалювання метано-водневих сумішей в промисловому газовому пальнику з визначенням емісії  $\text{NO}_x$ , CO та температурних характеристик факелу з порівнянням з випадком спалювання чистого природного газу (метану).

На основі аналізу результатів експериментів визначено, що при спалюванні метано-водневої суміші зменшуються викиди CO та збільшуються температури викидних газів і емісія  $\text{NO}_x$ .

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

Наведені характеристики показують суттєвий вплив конструкції стабілізатору, так для пальника SUEMAX довжина факелу в наведеному робочому режимі коротша на  $20\%$  у порівнянні з СНС.

В **четвертому розділі** основною метою дослідження є визначення впливу процентного вмісту водню в паливній суміші з метаном на утворення оксидів азоту ( $\text{NO}_x$ ), при використанні в штатних осьових пальниках водогрійного котла типу ДКВР-10-13. Також в роботі ставилась задача визначити середні характеристики теплообміну в топковій камері згаданого котельного агрегату за

допомогою відомого пакету програм CFD-моделювання ANSYS-Fluent, що дозволяє після попередньої верифікації з експериментальними даними взятими з робіт інших авторів, розширити діапазони режимних параметрів, що можуть впливати на роботу котельного агрегату в цілому.

**Методи, об'єкт та предмет дослідження.**

**Об'єкт дослідження** – процеси спалювання метано-водневих сумішей у технологічних установках.

**Предмет дослідження** – енергетичні та екологічні характеристики (утворення шкідливих речовин) процесу горіння при спалюванні метано-водневих сумішей.

**Методи дослідження** – у дослідженні застосовувалися як експериментальні, так і розрахунково-теоретичні методи аналізу процесів горіння. Експерименти зі спалювання суміші природного газу та водню проводилися на спеціально обладнаному експериментальному стенді. Отримані результати оброблялися й узагальнювалися із використанням сучасного програмного забезпечення.

## ANNOTATION

*Ryabtsun R.S.* Energy-technological features of the use of hydrogen technologies in technological installations – Qualification scientific work in the form of a manuscript.

Dissertation for the degree of Doctor of Philosophy in specialty 142 "Power Engineering". – National Technical University of Ukraine "Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute", Kyiv, 2025.

The training was carried out at the Department of Nuclear and Power Plants of the National Technical University of Ukraine "Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute" of the Ministry of Education and Science of Ukraine.

**Keywords:** hydrogen energy, methane-hydrogen mixtures, CFD modeling, nitrogen oxides, combustion processes, energy ecology, harmful emissions, industrial burners, radiation and convective heat exchange, boiler plant.

Replacing natural gas with hydrogen, in addition to the obvious advantages in reducing CO<sub>2</sub> emissions and decarbonizing the atmosphere, causes changes in the combustion and emission characteristics of fuel-oxidizer mixtures. In particular, it leads to an increase in the absolute consumption of fuel gas due to the lower calorific value of hydrogen, as well as to an increase in the formation of nitrogen oxides (NO<sub>x</sub>) due to the higher combustion temperature of hydrogen.

The task of reducing greenhouse gas emissions is becoming increasingly urgent, which stimulates the implementation of innovative hydrogen technologies in the energy sector, in particular the replacement of natural gas with hydrogen. Mixing hydrogen with natural gas contributes to improving environmental performance and reducing CO<sub>2</sub> formation.

The **introduction** substantiates the relevance of the research, defines its purpose and main tasks, and specifies the object and subject of the research. The scientific novelty and practical value of the obtained results are revealed, the personal contribution of the applicant is outlined, and key conclusions are drawn. Information is provided on the testing of the research results and possible directions for their practical application. The general scope and structure of the dissertation work are also described.

The **first chapter** well-known scientific works on the use of hydrogen-containing fuels for industrial facilities and household appliances are analyzed, the features of hydrogen production and the prospects of hydrogen energy are also considered. Scientific articles on the amount of natural gas used and the prospects for the production of green hydrogen are reviewed. Special attention is paid to the environmental aspects of replacing natural gas with a mixture of hydrogen. At the end of the first section, the goal and objectives of the work are formulated.

**Chapter 2** theoretical and computational studies of the fire-technical and environmental properties of gaseous fuels composed of mixtures of methane and hydrogen were conducted, namely, combustion rates, changes in the adiabatic combustion temperature of mixtures with an increase in the proportion of hydrogen in the fuel, assessment of the formation of nitrogen oxides, and CO<sub>2</sub> emissions.

The use of hydrogen to replace natural gas, in addition to the obvious advantages of decarbonizing the atmosphere (reducing CO<sub>2</sub> emissions), leads to changes in the fire-technical and emission characteristics of fuel-oxidizer mixtures, in particular, an increase in the absolute consumption of fuel gas due to a lower heat of combustion of hydrogen, an increase in the formation of nitrogen oxides NO<sub>x</sub> due to a higher combustion temperature of hydrogen, etc.

**In Chapter 3** the experimental studies were conducted on the combustion of methane-hydrogen mixtures using an industrial SUEMAX burner with a capacity of up to 30 kW. The proportion of hydrogen substitution of natural gas was  $[H_2] = 30\%$  by volume and  $50\%$  by volume, respectively. The purpose of the study was to determine the energy and environmental characteristics of combustion of methane-hydrogen mixtures in an industrial gas burner with the determination of  $NO_x$ , CO emissions and flame temperature characteristics in comparison with the case of combustion of pure natural gas (methane).

Based on the analysis of the experimental results, it was determined that when burning a methane-hydrogen mixture, CO emissions decrease and exhaust gas temperatures and  $NO_x$  emissions increase.

It was found that the emission of nitrogen oxides  $NO_x$  increases by  $\sim 1.5 \dots 2.0$  times and amounts to  $[NO_x] = 89 - 50$  ppm for the combustion of pure hydrogen. At the same time, a significant decrease in CO formation is noted,  $\sim 20$  times when the mixture  $[CH_4] / [H_2] = 50 / 50, \%$  vol. is burned, the level of CO formation is  $[CO] = 1 - 2$  ppm.

The above characteristics show a significant influence of the stabilizer design, so for the SUEMAX burner the torch length in the given operating mode is 20% shorter compared to the SNS.

**Chapter 4** the main objective of the study is to determine the influence of the percentage of hydrogen in the fuel mixture with methane on the formation of nitrogen oxides ( $NO_x$ ), when used in standard axial burners of a water-heating boiler of the DKVR-10-13 type. The work also set the task of determining the average heat transfer characteristics in the combustion chamber of the mentioned boiler unit using the well-known CFD modeling software package ANSYS-Fluent, which allows, after preliminary verification with experimental data taken from the works of



other authors, to expand the ranges of operating parameters that can affect the operation of the boiler unit as a whole.

**Methods, object and subject of research.**

**The object of research** is the processes of combustion of methane-hydrogen mixtures in technological installations.

**The subject of research** is the energy and environmental characteristics (formation of harmful substances) of the combustion process when burning methane-hydrogen mixtures.

**Research methods** – the study used both experimental and computational and theoretical methods for analyzing combustion processes. Experiments on the combustion of a mixture of natural gas and hydrogen were conducted on a specially equipped experimental stand. The results were processed and summarized using modern software.

## СПИСОК ОПУБЛІКОВАНИХ ПРАЦЬ ЗА ТЕМОЮ ДИСЕРТАЦІЇ

### Статті з представленими науковими результатами дисертації:

1. Воробйов М.В., Баранюк О.В. Рябцун Р.С. Визначення енергетичних та екологічних характеристик роботи котла ДКВР-10-13 при додаванні водню до природного газу методом математичного моделювання. Вчені записки Таврійського національного університету імені В. І. Вернадського. Серія: Технічні науки. 2022. Том 33 (72), № 5, С. 183-192. DOI <https://doi.org/10.32782/2663-5941/2022.5/27>
2. Воробйов М.В., Баранюк О.В. Рябцун Р.С. Моделювання екологічних характеристик роботи котла ДКВР-10-13 при використанні метано-водневої суміші як паливного газу. Вчені записки Таврійського національного університету імені В. І. Вернадського. Серія: Технічні науки. 2023. Том 34 (73), № 1. С. 155–161. DOI <https://doi.org/10.32782/2663-5941/2023.1/23>
3. Рябцун Р.С., Воробйов М.В. Дослідження енерготехнологічних характеристик спалювання метано-водневих сумішей у промисловому газовому пальнику / Збірника наукових праць Національного університету кораблебудування імені адмірала Макарова № 3 (496) 2024, С. 59 – 63. DOI [https://doi.org/10.15589/znp2024.3\(496\).8](https://doi.org/10.15589/znp2024.3(496).8)
4. Рябцун Р.С., Воробйов М.В. Оцінка основних вогнетехнічних та екологічних властивостей спалювання метано-водневих сумішей / Збірника наукових праць Національного університету кораблебудування імені адмірала Макарова № 4 2024, С. 39–43. DOI [https://doi.org/10.15589/znp2024.4\(497\).6](https://doi.org/10.15589/znp2024.4(497).6)

**Праці з представленими матеріалами апробації дисертації:**

5. Рябцун Р.С., Воробйов М.В. Можливості використання спалювання суміші природного газу і водню в енергетиці України XVIII міжнародна науково-практична конференція молодих вчених та студентів «Сучасні проблеми наукового забезпечення енергетики», Київ, 23 – 26 квітня 2020 р. – с.

6. Рябцун Р.С., Воробйов М.В. Енерготехнологічні особливості використання водневих технологій в промисловості і комунально-побутовому секторі. XIX міжнародна науково-практична конференція молодих вчених та студентів «Сучасні проблеми наукового забезпечення енергетики», Київ, 20-23 квітня 2021 р. – с. 166-168.

7. Рябцун Р.С., Воробйов М.В. CFD-моделювання екологічних характеристик роботи котла ДКВР-10-13 при додаванні водню до природного газу. Матеріали XVIII Міжнародної науково-практичної конференції «Теплова енергетика: шляхи реновації та розвитку», жовтень 2022 р. – с. 38-43.

8. Воробйов М.В., Сірий О.А., Рябцун Р.С. Експериментальне спалювання метановодневої суміші у промисловому пальнику. Матеріали XVIII Міжнародної науково-практичної конференції «Теплова енергетика: шляхи реновації та розвитку», жовтень 2023 р. – с. 104-107.

## ПЕРЕЛІК УМОВНИХ СКОРОЧЕНЬ ТА ПОЗНАЧЕНЬ

### Основні скорочення:

АКМ – адіабатична конверсія метану;

МВС – метано-воднева суміш;

ГТУ – газо-турбінна установка;

МЕА – Міжнародного енергетичного агентства;

АЕС – Атомна електростанція;

ВЕС – вітрова електростанція;

СЕС – сонячна електростанція;

ПГ – парникові гази;

СНС – струменево-нішева система;

ДВЗ – двигун внутрішнього згоряння;

ДКВР – двохбарабанный котел водотрубний реконструйований;

CFD – (Computational Fluid Dynamics) метод комп'ютерного моделювання;

КПІ ім. Ігоря Сікорського – Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського».

## ЗМІСТ

ЗМІСТ .....	13
ПЕРЕЛІК УМОВНИХ СКОРОЧЕНЬ ТА ПОЗНАЧЕНЬ .....	15
ВСТУП .....	16
РОЗДІЛ 1 ОГЛЯД СУЧАНИХ ТЕХНОЛОГІЙ ЩОДО ЗАМІЩЕННЯ ПРИРОДНОГО ГАЗУ ВОДНЕМ ТА ВИКОРИСТАННЯ ВОДЕНЬМІСТКИХ ПАЛИВ .....	25
1.1 Загальні відомості .....	25
1.2 Дослідження використання палива та структура споживання природного газу в Україні .....	31
1.3 Досвід використання зеленого водню .....	33
1.4 Перспективи промислового виробництва водню .....	40
1.5 Дослідження використання водню як палива .....	46
1.6 Досвід спалювання суміші коксового газу з 50-60% воднем .....	52
1.7 Експериментальні дослідження екологічності спалювання паливної суміші метан-водень .....	58
1.8 Висновки по розділу 1 .....	59
РОЗДІЛ 2 РОЗРАХУНКОВО ТЕОРЕТИЧНИЙ АНАЛІЗ ОСОБЛИВОСТЕЙ ВИКОРИСТАННЯ ВОДЕНЬМІСТКИХ СУМІШЕЙ ПРИ ЗАМІЩЕННІ ПРИРОДНОГО ГАЗУ .....	61
2.1 Аналіз характеристики суміші природного газу з воднем .....	61
2.2 Теоретичні аспекти використання водень міських палив .....	62

2.3 Визначення вогнетехнічних характеристик спалювання метано-водневих сумішей .....	63
2.4 Визначення енергоекогічних характеристик спалювання метано-водневих сумішей .....	68
2.5 Висновки до розділу 2 .....	71
РОЗДІЛ 3 ЕКСПЕРЕМЕНТАЛЬНІ ДОСЛІДЖЕННЯ СПАЛЮВАННЯ МЕТАНО-ВОДНЕВИХ СУМІШЕЙ .....	73
3.1 Заходи з промислового використання водню .....	73
3.2 Експериментальні дослідження на установці .....	75
3.3 Порівняння енергоекологічних характеристик при спалюванні метано-водневих сумішей у пальниках різних конструкцій .....	81
3.4 Порівняння температурних характеристик роботи пальникових пристроїв при спалюванні метано-водневих сумішей і природного газу.....	87
3.5 Висновки до розділу 3 .....	89
РОЗДІЛ 4 CFD МОДЕЛЮВАННЯ СПАЛЮВАННЯ МЕТАНО-ВОДНЕВИХ СУМІШЕЙ У КОТЕЛЬНИХ УСТАНОВКАХ .....	90
4.1 Розробка розрахункової чисельної моделі котельної установки .....	90
4.2 Аналіз результатів чисельного моделювання.....	97
4.3 Висновки до розділу 4 .....	102
ЗАГАЛЬНІ ВИСНОВКИ .....	103
СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ .....	105
ДОДАТОК А Список публікацій здобувача за темою дисертації .....	112
ДОДАТОК Б Акт впровадження .....	114

**Умовні позначення:**

$Q_{H^P}$  – нижча теплота згоряння палива, КДж/(м<sup>3</sup>);

$S_l$  – нормальна швидкість розповсюдження полум'я, м/с;

$T$  – температура,

$p_0$  – тиск Па;

$\alpha$  – коефіцієнт надлишку повітря;

**Основні індекси:**

п – повітря;

г – пальний газ;

пр – природний газ;

в – водень;

сум – суміш;

к.зг. – камера згоряння.

## ВСТУП

Вже багато років викопне паливо забезпечує електроенергією та теплом промисловість, транспорт і побутовий сектор. Проте використання викопних видів палива продукує в атмосферу 73% від усіх викидів парникових газів у світі. За 150 років це значно посилило парниковий ефект і призвело до кліматичної кризи. Для пом'якшення наслідків та адаптації до зміни клімату держави створюють власні стратегії «нульових» викидів, що спираються на використання новітніх енергоефективних технологій, застосуванню практик відновлення екосистем та розвитку відновлюваних джерел енергії. За таку амбітну ціль взялися країни від Південної Африки та Великобританії до Німеччини та Японії, а віднедавна – і Україна, яка заявила про свою довгострокову мету досягти нульових викидів до 2060-го року [1].

На сучасному етапі розвитку енергетики для виробництва водню використовуються як електроліз (виробництво «зеленого водню») так і технології конверсії природного газу та газифікації вугілля. Особливої уваги заслуговує саме «зелений водень», як продукт використання нічної потужності АЕС та утилізації зайвої електричної енергії. Далі, отриманий водень може використовуватися як в комунально-побутовому так і в промислово-енергетичному секторі як газоподібне паливо при заміщенні природного газу на вже працюючому обладанні та технологіях. Також, використання водню в якості часткової заміни традиційного природного газу паливоспалюючим устаткуванням може бути першим кроком на шляху забезпечення діючих та майбутніх екологічних норм.

Тому, представлена робота присвячена аналізу можливості застосування водню в технологіях спалювання у якості домішки до



основного палива з метою часткового заміщення традиційного природного газу об'єктами побутового та промислового призначення. При дослідженні можливості використання водню в якості часткової заміни традиційного природного газу паливоспалюючим устаткуванням, основним питанням є визначення можливої і допустимої частки водню у таких горючих сумішах. Вирішення цього питання є компромісом між намаганням, з однієї сторони, збільшити частку водню, як замітника природного газу, а з іншої – забезпечити основні принципи безпеки і ефективності використання таких сумішей, а також мінімізації інвестицій, які необхідні для переходу газоспалювальних і топкових пристроїв з чистого природного газу, для якого вони були призначені, на горючу суміш природного газу і водню.

**Актуальність теми.** Відомо, що традиційна енергетика є галуззю, що в першу чергу відповідає за генерацію парникових газів. За 150 років її існування значно підсилювався парниковий ефект, що призвело до кліматичної кризи. На сьогоднішній день проблема зменшення використання викопних вуглеводнів, зокрема природного газу визнана в більшості країн світу як проблема національної безпеки. Для її вирішення втілюють різноманітні заходи, які пов'язані з ефективним використанням альтернативних видів палив та підвищенням енергоефективності об'єктів теплової енергетики.

Для вирішення згаданої проблеми все більше використовуються водневі технології. Відомо, що водень вже достатньо широко використовують як автомобільне паливо [2]. Роботи авторів [3] свідчать, що використання водню у двигунах з іскровим запалюванням дає можливість покращити якість згоряння палива та покращити їх екологічні показники. Це в свою чергу спонукало до використання водню в енергетиці і комунально-побутовому секторі

при заміщенні природного газу шляхом домішування водню в газові мережі [4,5].

Дослідження та розробки, що пов'язані з використанням водню у якості палива на сьогоднішній день є надзвичайно актуальними. Найбільш поширеною є ідея використання спалювання водню у суміші з природним газом для забезпечення декарбонізації атмосфери та зменшення впливу на глобальні кліматичні зміни шляхом скорочення викидів вуглекислого газу з продуктами згорання вуглеводневого палива.

На сьогоднішній день актуальною є проблема декарбонізації атмосфери, зниження викидів парникових газів в промисловості, енергетиці, транспорті та ін., що зумовлює необхідність істотного удосконалення процесів перетворення енергії і підвищення техніко-економічних характеристик систем енергопостачання на їх основі. Вирішити цю проблему здатні інноваційні водневі технології, які повинні зіграти важливу роль в диверсифікації потоків енергоносіїв, що має істотно зменшити споживання вуглеводневих палив і дозволить поліпшити стан навколишнього середовища.

Дослідження та розробки, що пов'язані з використанням водню у якості палива на сьогоднішній день є надзвичайно актуальними. На сьогодні поширеною є ідея спалювання водню в суміші з природним газом для забезпечення декарбонізації атмосфери та зменшення впливу на глобальні кліматичні зміни шляхом скорочення викидів вуглекислого газу з продуктами згорання вуглеводневого палива, представлена наприклад в. Проте, необхідно з'ясувати енерготехнологічні особливості заміщення природного газу воднем щодо технічних особливостей роботи процесів та агрегатів. Використання водню як додаткового компонента до органічного палива, зокрема природного газу, є одним зі шляхів декарбонізації

енергетики. Основна мета полягає в зниженні викидів  $\text{CO}_2$  при спалюванні палива шляхом часткової заміни вуглецевих компонентів на водень, який при згорянні утворює лише воду.

Однією з головних перешкод для широкого використання водню є його висока вартість виробництва. Вартість виробництва «чистого» водню, станом на 2024 рік, складає, в залежності від метода, від €1,7 /кг до €10,2/кг [6]. Проте в майбутньому, при зниженні вартості електроенергії, виробництво «зеленого» водню може стати більш вигідним.

До основних методів виробництва метано-водневих сумішей можна віднести:

1. Змішування природного газу з воднем, отриманим електролізом води. Цей метод дозволяє отримати "зелений" водень із використанням відновлюваних джерел енергії, таких як сонячна та вітрова енергія. Основний недолік цього підходу – висока вартість виробництва водню шляхом електролізу, що робить його економічно невигідним на сьогодні через високу ціну електроенергії.

2. Адіабатична конверсія метану. Цей метод дозволяє отримати метано-водневу суміш без залучення зовнішніх джерел енергії. Сировиною виступає природний газ, а джерелом енергії є продукти його згорання. Хоча цей процес не виробляє "зеленого" водню, він може бути ефективнішим для певних промислових застосувань.

### **Мета і завдання дослідження.**

**Мета роботи** – визначення енергетичних та екологічних характеристик процесів горіння газового палива при заміщенні природного газу на водень. Отримані результати мають стати теоретичним та практичним підґрунтям для широкого використання водню в енергетиці, промисловості та комунально-побутовому секторі при частковому (а в перспективі і повному) заміщенні природного газу.

Для досягнення поставленої мети потрібно виконати 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  $\text{CO}_2$ ;
- підготовка вимірювальної установки для проведення експериментальних досліджень;
- визначення енергоекологічних характеристик спалювання метано-водневих сумішей в промисловому газовому пальнику з визначенням емісії  $\text{NO}_x$ ,  $\text{CO}$  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 ( $\text{NO}_x$ ), при використанні в штатних осьових пальниках водогрійного котла типу ДКВР-10-13.

**Об'єкт дослідження** – процеси спалювання метано-водневих сумішей у технологічних установках.

**Предмет дослідження** – енергетичні та екологічні характеристики (утворення шкідливих речовин) процесу горіння при спалюванні метано-водневих сумішей.

**Методи дослідження** – у дослідженні застосовувалися як експериментальні, так і теоретичні методи аналізу процесу горіння. Експерименти зі спалювання суміші природного газу та водню проводилися на спеціально обладнаному експериментальному стенді.

Отримані результати оброблялися й узагальнювалися із використанням сучасного програмного забезпечення.

### **Наукова новизна отриманих результатів.**

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 її факелу. Показано збільшення температури факелу  $\sim 100$  °C 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  $\text{NO}_x$ .

4. Встановлено, що емісія оксидів азоту  $\text{NO}_x$  зростає в  $\sim 1,5 \dots 2,0$  рази та складає  $[\text{NO}_x] = 89 - 50$  ppm для спалювання чистого водню. В той же час відмічається суттєве зниження утворення CO,  $\sim 20$  разів при спалюванні суміші  $[\text{CH}_4] / [\text{H}_2] = 50 / 50$ , % об., 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  $\sim 100$  C 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 (на прикладі парового котла ДКВР-10 / 13.

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

**Обґрунтованість та достовірність** наукових результатів підтверджуються правильним формулюванням завдань теоретичного та експериментального досліджень, глибоким аналізом, удосконаленою тепловою моделлю стабілізації процесу горіння, ефективним плануванням експериментів на дослідній лабораторній установці, отриманими даними моделювання, а також відповідністю розрахункових даних.

#### **Практичне значення та реалізація результатів досліджень.**

1. Отримані практичні результати є науковим підґрунтям для широкого використання водню в сумішах з природнім газом в промисловості та 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 використовуючому обладнанні без зміни його конструкції та теплових характеристик роботи. Продемонстровано можливість роботи пальників як на чистому метані так і суміші  $[\text{CH}_4] / [\text{H}_2] = 50 / 50$ , % об.

3. Показано, що при заміщенні природного газу воднем очікуваний рівень емісії  $\text{CO}_2$  не відповідає внесеній долі водню в паливі, так для палива  $[\text{CH}_4] / [\text{H}_2] = 50 / 50$  %, об. відмічається скорочення викидів  $\text{CO}_2$  лише на 23,34 %, що не є суттєвим.

4. Оцінені емісійні характеристики утворення  $\text{NO}_x$  та  $\text{CO}$  – як основних токсичних компонентів продуктів згоряння палива для пальників різних конструкцій.

**Особистий внесок здобувача.** Автор проаналізував наукову літературу, присвячену проблемам горіння суміші природного газу із воднем, енергоефективності використання паливних сумішей, а також зменшення викидів парникових газів та різних способів добування водню. Він брав участь у проведенні експериментальних досліджень емісійних характеристик під час спалювання суміші природного газу з воднем, CFD моделюванні, а також у обробленні та обговоренні отриманих результатів. Особлива увага приділялася оцінці впливу енерготеплотехнічних, вогнетехнічних характеристик процесу спалювання суміші водню із природним газом.

#### **Апробація результатів дисертації.**

Результати досліджень були представлені на XVIII міжнародній науково-практичній конференції молодих вчених та студентів «Сучасні проблеми наукового забезпечення енергетики», Київ, 23 – 26 квітня 2020 р., XIX міжнародній науково-практичній конференції молодих вчених та студентів «Сучасні проблеми наукового забезпечення енергетики», Київ, 20-23 квітня 2021 р., XVIII Міжнародній науково-практичній конференції «Теплова енергетика: шляхи реновації та розвитку», жовтень 2022 р., XVIII Міжнародній науково-практичній конференції «Теплова енергетика: шляхи реновації та розвитку», жовтень 2023 р.

**Публікації.** Основний зміст дисертації викладено у 4 статтях, опублікованих у фахових періодичних журналах.

**Конференції.** Взято участь у 4 наукових конференціях.

**Структура і обсяг дисертації.** Дисертаційна робота складається зі вступу, чотирьох розділів, висновків, списку використаних джерел і додатків. Загальний обсяг роботи складає – 110 сторінок, у тому числі 32 – рисунка, 2 – таблиці, список використаної літератури, що включає 42 найменування, 2 додатка на 2 сторінках.

**Зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами,  
грантами:**

Робота виконана у відповідності з перспективними напрямками розвитку науки і техніки зі створення та впровадження нових енергозберігаючих технологій та концепції розвитку водневої стратегії України до 2050 року.



## **РОЗДІЛ 1. ОГЛЯД СУЧАСНИХ ТЕХНОЛОГІЙ ЩОДО ЗАМІЩЕННЯ ПРИРОДНОГО ГАЗУ ВОДНЕМ ТА ВИКОРИСТАННЯ ВОДЕНЬМІСТКИХ ПАЛИВ**

### **1.1 Загальні відомості**

На сьогоднішній день існує гостра необхідність економії дефіцитних енергоресурсів і в першу чергу, це твердження стосується випадку спалювання природного газу. Тому до пальників висувуються підвищені вимоги стосовно розширення меж потужності за рахунок зниження пускових тисків палива, збільшення одиничної потужності при нормативних показниках по емісійним характеристикам, а також ефективності вигорання палива. Таким чином, розуміння механізмів утворення шкідливих речовин і можливість прогнозування їх емісії на кількісному рівні при зміні співвідношення палива і окислювача в суміші є одними з основних питань забезпечення норм охорони навколишнього середовища.

Одним із способів досягнення низьких рівнів шкідливих речовин є додавання до паливо-повітряної суміші газоподібного водню. В європейських країнах, передбачається використання водню як компонента, що додається до органічного палива, насамперед – природного газу, з метою забезпечення декарбонізації атмосфери та зменшення впливу на глобальні кліматичні зміни шляхом скорочення викидів  $\text{CO}_2$  з продуктами згорання. З огляду на це  $\text{H}_2$  розглядається саме як «зелений водень», який одержують з використанням «екологічно чистої» (green, renewable) енергії (сонячної, вітряної).

Проте, виробництво «зеленого» водню шляхом електролізу є дуже витратним. Передбачається, що вартість 1 кВт·год у місці виробництва  $H_2$  у 2030 р. становитиме 0,1 євро [7].

З іншого боку, останнім часом значний інтерес виявлено до створення нового палива – «hythane». Це метано-воднева суміш (MBC) із вмістом  $[H_2]$  від 20 до 44–48%. Використовуються два принципово різні типи технологій одержання цього палива:

- шляхом змішування природного газу з воднем, що виробляється електролізом води;
- з застосуванням технології адіабатичної конверсії метану (АКМ), що реалізується без сторонніх енергоносіїв; сировина при цьому – природний газ, енергоносіїв – продукти згоряння природного газу.

Передбачається використання MBC в ГТУ, енергетиці, транспорті та в промислових технологіях.

Автори роботи [7] виконали експериментальні дослідження направлені на визначення енергетичної ефективності та викидів шкідливих речовин під час спалювання метано-водневої суміші в побутовому двоконтурному котлі «MICRA DUO CS 24» фірми «RÖDA». Визначено вплив складу палива на утворення шкідливих викидів, що наглядно представлено на рис. 1.1. Співвідношення  $[H_2]/[CH_4]$  в паливній суміші вказано на графіку.

Автори роблять висновок, що викиди  $NO_x$  збільшуються із зростанням витрат палива. Водночас зберігається тенденція суттєвого зменшення викидів в усьому діапазоні варіювання теплової потужності (паливоспоживання) із збільшенням вмісту  $H_2$ , в тому числі – для випадку максимально випробуваного вмісту  $[H_2]$  в паливі ( $[H_2] = 50\%$ ). Для такого палива концентрація  $[NO_x]$  3% $O_2$  зростає від 20 (1л/ хв) до  $[NO_x]$  3% $O_2 \approx 80$  ppm (при 6 л/хв).

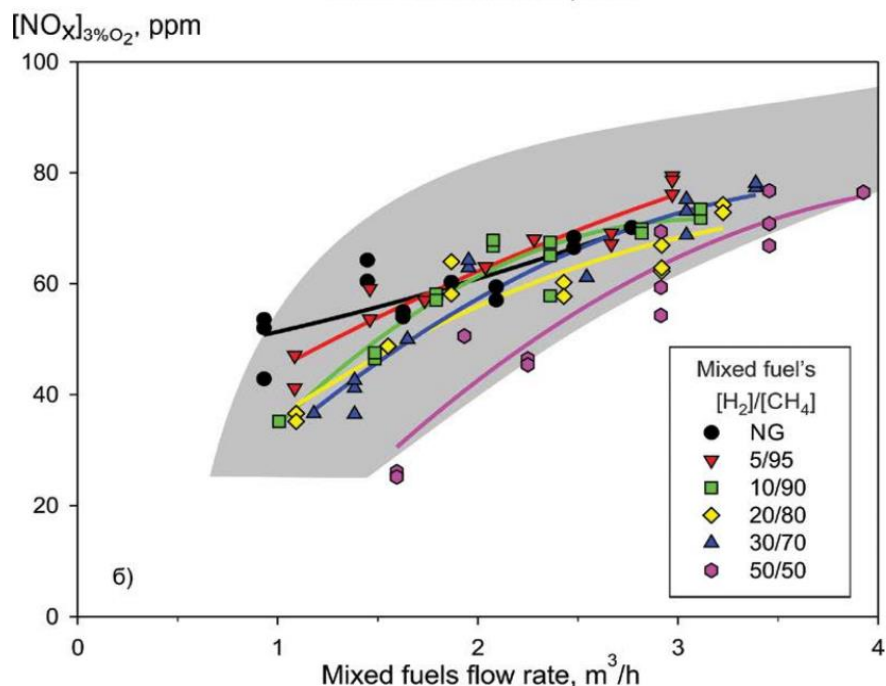


Рисунок 1.1 –Залежність викидів  $\text{NO}_x$ , ppm для котла від витрат палива,  $\text{m}^3/\text{год}$  [7].

Слід зазначити, що визначальним фактором щодо емісії шкідливих речовин є технологія спалювання. В роботі [8] розглянуто головні етапи побудови CFD-моделі процесу згоряння суміші палив метан-водень в струменево-нішевій системи (CHC) стабілізації та спалювання палива. Автори зазначають, що як для чистого метану, так і для суміші метан-водень, при збільшенні коефіцієнту надлишку повітря відбувається підвищення локальних температур горіння в об'ємі ніші, а отже й зменшення довжини факелу реагуючої суміші. Домішки водню збільшують швидкість витікання струменів палива та їх далекобійність в середньому на 18%, при забезпеченні робочого режиму пальника. Так, при спалюванні суміші дещо збільшується гідродинамічний показник, тому стабілізація та горіння факелу відбувається не тільки безпосередньо над нішею (як для випадку з

чистим метаном), а й частково зміщується далі у потоці реагуючої суміші. З розрахунків встановлено, що додавання водню в об'ємі від  $\frac{1}{4}$  до  $\frac{1}{2}$  збільшує емісію  $\text{NO}_x$  на 27 %.

Аналіз робіт, направлених на обґрунтування ефективності використання водневмісного газу у двигунах внутрішнього згоряння свідчить, що додавання 10% водню до дизельного палива дозволяє на 30% скоротити його витрату, що у свою чергу зменшує токсичні викиди [10]. В підтвердження цього твердження автори, свідчать, що додавання водню суттєво впливає на поліпшення екологічних показників відпрацьованих газів. В ході проведених експериментальних досліджень авторами було виявлено, що кількість викидів вуглеводнів ( $\text{C}_m\text{H}_n$ ) знизилася на 40–50 %, монооксиду вуглецю (CO) – на 15...25 %. Поряд з цим зазначається, що викиди оксидів азоту  $\text{NO}_x$  збільшилися на 3...7 %.

Підсумовуючи проведений аналіз, можна констатувати, що застосування водню у якості домішки до основного палива з ціллю часткового заміщення традиційного природного газу об'єктами побутового призначення є одним з перспективних напрямів є використання його в технологіях спалювання [9].

Розвиток цивілізації призводить до невинного споживання енергії. Внаслідок цього значно збільшується антропогенне забруднення довкілля, значна частина якого в'язана із викидами промислових і енергетичних підприємств, транспорту, житлово-комунальних господарств й інших галузей економіки.

Одним із способів досягнення низьких рівнів шкідливих речовин є додавання до паливо-повітряної суміші газоподібного водню. Для класичної теорії і практики спалювання горючого газу питання взаємозамінності двох різних горючих газів не є новим. У різних країнах до цього питання приходили тоді, коли виникала

альтернатива використання основного горючого газу, наприклад природного. Такою альтернативною міг бути біогаз, генераторний газ, нафто заводський газ, скраплений пропан-бутан, скраплений природний газ і інші горючі гази та їх суміші. Такою альтернативою може бути також водень, або горючі суміші водню із іншими газами. В підтвердження цього твердження у серпні 2020 року в Україні стартував Водневий проект Регіональної газової компанії і розпочалися випробування сумішей природного газу та водню для використання у газорозподільних мережах. Як висновок представлено твердження – якщо використати суміш з 20% водню, то можна заощадити на рік 6 млрд кубометрів природного газу, а якщо у суміші 50% водню, то економія – 15 млрд кубів.

Проте, слід враховувати, що метан (доля якого в природному газі становить більше 85 %) і водень мають надзвичайно велику відмінність у горючих характеристиках, що спричиняє повну відсутність їх взаємозамінності. Витрати повітря для повного згорання і об'єм продуктів згорання відрізняються у 4 рази, швидкість розповсюдження полум'я – у 7 разів, кількість первинного повітря, яка гарантує горіння без проскоку відрізняється у 4 рази. Порівняння індексів взаємозамінності Воббе для метану і водню підтверджує факт неможливості переведення пальників на природному газі на водень – відмінність індексу Воббе для цих газів становить 15%, що у 3 рази перевищує нормовану величину 5%. Забезпечити перехід роботи пальника з природного газу на водень без змін у конструкції пальника і без втрати теплової потужності установки неможливо. Такі висновки зроблені автором шляхом дослідження, що проведені при спалюванні нафто-заводського газу на Кременчуцькому Нафтопереробному заводі із змінною складовою водню від 20% до 54% об., свідчать про те, що спалювання газів із значною кількістю водню призводить до

кардинальних змін у роботі газопальникових пристроїв і масовому переходу їх роботи у режим проскоку полум'я. Змінюється також емісійна тепловіддача факелів і конвективний теплообмін на поверхнях нагрівання.

Автори роботи [7], що виконали експериментальні дослідження направлені на визначення енергетичної ефективності та викидів шкідливих речовин під час спалювання метано-водневої суміші в побутовому двоконтурному котлі «MICRA DUO CS 24» фірми «RÖDA» роблять висновок, що викиди  $\text{NO}_x$  збільшуються із зростанням витрат палива. Водночас зберігається тенденція суттєвого зменшення викидів в усьому діапазоні варіювання теплової потужності (паливоспоживання) із збільшенням вмісту  $\text{H}_2$ , в тому числі – для випадку максимально випробуваного вмісту  $[\text{H}_2]$  в паливі ( $[\text{H}_2] = 50\%$ ).

Автор зауважує [10], що забезпечити перехід роботи пальника з природного газу на горючу суміш з умістом водню більше за 20-25% без внесення змін в конструкцію пальника і режим його роботи, а також конструкцію і режим роботи тяго-дутьових пристроїв установки неможливо з міркувань забезпечення сталості теплової потужності і оптимальних параметрів роботи установки. Але, крім цього, є ще одна складова цього питання. Це зміна характеру теплообміну у топкових пристроях, які будуть працювати на газах – замінниках з підвищеним умістом водню. Так наприклад, при переході на спалювання суміші з умістом водню до 30% об. об'єм продуктів згорання зменшується з  $11,95 \text{ м}^3/\text{м}^3$  до  $7,59 \text{ м}^3/\text{м}^3$  з одночасним зменшенням умісту  $\text{CO}_2$  у складі продуктів згорання. Ці два фактори призведуть до погіршення теплообміну у топках теплогенеруючих агрегатів.

Отже, питання застосування водню у якості домішки до основного палива з метою часткового заміщення традиційного

природного газу об'єктами побутового призначення є одним з перспективним і дискусійним.

## **1.2. Дослідження використання палива та структура споживання природного газу в Україні.**

Проблема економії природного газу шляхом його раціонального використання та повної чи часткової заміни альтернативними видами палива містить багато невирішених виробничих і наукових аспектів, які потребують подальшого дослідження.

Проблема економії природного газу шляхом його раціонального використання та повної чи часткової заміни альтернативними видами палива містить багато невирішених виробничих і наукових аспектів, які потребують одночасного вивчення для забезпечення промислового впровадження методів енергозбереження. Протягом останніх десятиліть зусилля багатьох учених були спрямовані на розробку процесів і обладнання як для підвищення ефективності використання газового палива, так і для виробництва його альтернатив.

За даними Держкомстату України, загальний обсяг споживання природного газу в Україні у 2023 році становив 19,8 млрд м<sup>3</sup>. Зокрема, на потреби населення було витрачено 8,24 млрд м<sup>3</sup>, а муніципальна енергетика (теплоцентралі) та промисловість спожили 11,56 млрд м<sup>3</sup> (58,3 %).

Розумно частину витрат на природний газ для забезпечення теплопостачання покривати за рахунок місцевих видів палива, таких як синтез- та біогази. Великі перспективи відкриваються при

поєднанні природного газу з піролізним газом або частковій заміні одного виду палива іншим. В межах стратегії зменшення споживання органічного палива, ефективним рішенням для покриття промислових потреб є повне або часткове заміщення природного газу технологічними газами, зокрема в металургії — коксовим, доменним, конвертерним газами та їх сумішами, а також сумішшю з природним газом.

Попри особливості споживання енергії та значні різниці в структурах джерел первинної енергії та палива в різних країнах, питання заміщення природного газу альтернативними газами біологічного та технологічного походження має вирішуватись за допомогою сучасних універсальних підходів до економії вуглеводневих палив.

У контексті потенційних можливостей заміщення природного газу, розглянемо основні типи альтернативних газових палив, класифікація яких наведена в [11] і базується на існуючих типах палива для газових двигунів (ДВЗ). Зазначено, що з цих газів 80% складає природний газ. Інші відносяться до опосередковано копалин палив, таких як синтез-газ, та інших альтернативних газів. Загалом, розподіл газових палив на дві основні групи здійснюється за наявністю вуглецю: перша група включає гази, що містять вуглець (C), а друга — гази, в яких вуглець (C) відсутній. Перша група охоплює прямі копалини, опосередковано викопні та відновні гази, а друга група представлена воднем ( $H_2$ ).

У роботі [11] наведено наступний узагальнений опис газових палив:

Біогази (BG) — це загальна назва для палив, що утворюються в результаті ферментації органічних матеріалів. Основними компонентами біогазів є метан ( $CH_4$ ) та вуглекислий газ ( $CO_2$ ).



Синтез-гази (SG) — гази, що містять водень ( $H_2$ ) і є продуктами сухої перегонки вугілля (коковий, вугільний газ). Вони складаються з метану ( $CH_4$ ), водню ( $H_2$ ), монооксиду вуглецю (CO) та вуглекислого газу ( $CO_2$ ).

Використання синтез-газів у двигунах внутрішнього згоряння (ДВЗ) є складним через змінний склад і наявність шкідливих для обладнання компонентів, таких як смоли, парафіни, сірка тощо.

Також існують низькокалорійні газоподібні палива, які називаються «бідними газами», наприклад, гази стічних вод.

### **1.3 Досвід використання зеленого водню.**

Постачання водню на даний момент практично повністю залежить від конверсії природного газу та газифікації вугілля, які є високовуглецевими процесами, що спричиняють понад 1 Гт викидів  $CO_2$  щорічно. Потенціал чистого водню для декарбонізації існуючих постачань і розвитку нових кінцевих застосувань на великому масштабі є справжнім проривом у цій сфері. На сьогодні «зелений» водень, що виробляється за допомогою електролізу з відновлювальної електроенергії, є найбільш перспективною та сталою технологією. «Блакитний водень», що виготовляється з природного газу з використанням технологій уловлювання та зберігання вуглецю, також може бути визнаний «чистим», якщо він відповідає жорстким стандартам щодо викидів метану та ефективності вловлювання вуглецю.

Прогноз компанії Deloitte [12], яка досліджує створення вуглецево-нейтральної економіки за допомогою чистого водню, вказує на постійне зростання ринку зеленого водню. За моделлю Deloitte Hydrogen Pathway Explorer (HyPE), доходи від цього ринку

зростуть з 642 млрд дол. США щорічно у 2030 році до 1,4 трлн дол. США на рік у 2050 році, що стане важливим етапом на шляху до досягнення кліматичної нейтральності.

Щоб досягти чистих нульових викидів вуглецю до 2050 року, необхідно розвинути ринок чистого водню до 170 МтН<sub>2</sub>екв до 2030 року, і збільшити його до майже 600 МтН<sub>2</sub>екв до 2050 року. Це еквівалентно більше ніж 85% світового споживання електроенергії в 2019 році (22 850 ТВт·год) [13].

Цікаво, що 30 червня 2023 року в Китаї було відкрито перший у світі завод з виробництва зеленого водню потужністю 20 000 тонн на рік. Завод «Sinopres» охоплює виробництво сонячної енергії потужністю 300 МВт, передачу електроенергії, електроліз водню та має ємності для зберігання водню об'ємом 210 000 Нм<sup>3</sup>, а також трубопровід для транспортування водню [14].

В Європі перший комерційний завод з виробництва зеленого водню буде побудований у Німеччині та розпочне свою роботу в другій половині 2024 року. Завод зможе виробляти 4 тонни зеленого водню на день, що становить близько 1000 тонн на рік. Цей проект є частиною ініціативи HyFIVE (Водень для інноваційних автомобілів), що фінансується Європейським фондом регіонального розвитку (ЄФРР) на суму 6,4 млн євро. Вироблений водень буде використовуватися в промисловому парку «H<sub>2</sub>-Aspen» та водневій заправній станції в рамках угоди між компанією Lhyfe і спільним підприємством JET H<sub>2</sub> [15].

Збільшення виробництва безвуглецевого «зеленого» водню суттєво сприятиме зменшенню викидів CO<sub>2</sub> в атмосферу. Однак для досягнення значних результатів важливо знижувати вартість водню, використовуючи технології утилізації вуглецю. Це потребує впровадження високопродуктивних технологій електролізу, які

працюють на недорогих відновлювальних джерелах енергії. Тому для ефективного промислового виробництва водню необхідно збільшувати кількість електролізерів, що дозволить значно знизити витрати і досягти економії.

Зважаючи на сучасні тенденції та перехід до водневої економіки, на ринку виробників електролізерів спостерігається конкуренція між західними та китайськими компаніями. Китайські виробники електролізерів активно шукають нові бізнес-можливості на міжнародних ринках, зокрема в контексті глобального переходу до зеленого водню. Серед найбільш ефективних і конкурентоспроможних у світі є електролізери ALK від компанії CPU Hydrogen Power Technology (Suzhou). Їхня вартість на 70% нижча за західні аналоги, а ціна варіюється від 200 до 230 доларів США за кВт [16]. У червні 2023 року компанія CPU Hydrogen Power Technology уклала угоду з DCH Group (Німеччина) на постачання обладнання для виробництва водню на ринки Німеччини, Швейцарії та Австрії.

Використання електролізерів для виробництва чистого водню у поєднанні з сучасними резервуарами для його зберігання дозволяє реалізувати технологію сезонного накопичення періодично виробленої відновлювальної енергії, що суттєво підвищує її ефективність. Окрім зберігання енергії у вигляді водню, перспективним є також метод «енергія в газ», який передбачає впровадження чистого водню в газові мережі або його перетворення в синтетичний метан через з'єднання з CO<sub>2</sub>. Відомо, що відновлювальні джерела енергії, такі як сонячна та вітрова, генерують енергію за певними циклами. Наприклад, сонячні станції виробляють енергію тільки вдень, а влітку її виробляється значно більше, ніж взимку. Цю енергію можна накопичувати для

використання у періоди зниженої генерації. Така технологія накопичення енергії може бути здійснена за допомогою водню через електроліз. Ці методи особливо важливі для важкодоступних територій, де немає традиційної електрифікації, і водень може бути використаний як елемент зберігання та підтримки стабільності в електромережах.

Активний розвиток водневих технологій у світі, зокрема виробництва зеленого водню, електролізерів для отримання доступного водню та резервуарів для його зберігання, сприяє поширенню водневих технологій у транспортному секторі, що, у свою чергу, дозволить значно знизити викиди CO<sub>2</sub>.

В останні роки досягнуто помітного прогресу у розвитку транспорту на водневих паливних елементах у всіх сферах транспортної інфраструктури. Лідерами у розробці легкових водневих автомобілів є компанії: Hyundai (Південна Корея), Honda (Японія), Mercedes-Benz, BMW, Audi (Німеччина), Peugeot (Франція); вантажівок — Nikola Motor Company (США), Mercedes-Benz (Німеччина); у залізничному транспорті — Alstom (Франція), Porterbrook (Великобританія), Central Japan Railway (Японія); у суднобудуванні — Energy Observer Development (Франція), Kawasaki Heavy Industries (Японія), Fincantieri (Італія), Yanmar Holdings (Японія); у авіації — Universal Hydrogen (США), H2Fly (Німеччина), ZeroAvia, Airbus (США) та інші.

Використання водневих паливних елементів і батарей для зберігання водню на транспортних засобах приносить численні переваги для транспортної галузі, зокрема з точки зору збільшення запасу ходу, швидкої перезарядки, зменшення забруднення навколишнього середовища в містах і зниження рівня шуму.

Для підвищення ефективності роботи транспортних засобів, що працюють на водневому паливі, важливо використовувати додаткові батареї у вигляді резервуарів для водню. Проблеми часто виникають саме з цими резервуарами під час проектування та випробувань. Водень, що зберігається в стиснутому вигляді, є джерелом додаткової енергії для вантажних та електричних транспортних засобів. Через використання паливного елемента водень перетворюється на електричну енергію, яка живить електродвигун і забезпечує опалення салону. Робота паливного елемента для транспорту подібна до функціонування акумулятора.

Оскільки на сьогодні більшість автомобільних парків складаються з транспортних засобів із двигунами внутрішнього згоряння, а частка водневих автомобілів залишається невеликою, собівартість перевезень поки що залишається високою. Проте в майбутньому, завдяки новим технологіям і значному зниженню вартості електролізу, ціна водню на заправних станціях має становити лише 1,5 €/кг, що відповідатиме вартості енергії, яку генерує дизельний двигун. Великий обсяг споживання водню в автомобільному транспорті, особливо на фоні погіршення стану навколишнього середовища, має стати рушійною силою для розвитку водневих технологій і створення економічно вигідних водневих заправних станцій.

Для стимулювання процесу розробки та впровадження зеленого водню у всіх сферах промисловості, особливо в найбільш шкідливих для довкілля, необхідно забезпечити підтримку на державному, міжнародному та глобальному рівнях. Така підтримка значно прискорить перехід до водневої економіки.

Для ефективного використання водню як енергоносія важливо реалізовувати стратегії довгострокової перспективи, що

служитимуть дорожніми картами для створення інтегрованих систем, включаючи відновлювальні джерела енергії, виробництво та зберігання водню, а також розвиток інфраструктури для використання водню як палива.

Зокрема, в Європейському Союзі було ухвалено низку нормативних актів, які визначають основи низьковуглецевого розвитку та водневої трансформації в усіх сферах суспільного життя: Європейська Зелена Угода (2020), Стратегія інтеграції енергетичних систем (2019), Воднева стратегія для кліматично нейтральної Європи (2020) та Fit for 55 (2021) [17]. Основною метою цих документів є створення екологічно стійкої та енергетично ефективної системи на основі водню та скорочення викидів парникових газів у Європі. Вони фактично визначають курс на кліматичну сталість та водневу економіку в Європі через впровадження безвуглецевих водневих технологій.

В Україні наприкінці 2021 року також була розроблена та подана на громадське обговорення Українська воднева стратегія [18], основними напрямками якої є: розширення виробничих потужностей для виробництва водню, розробка регуляторної бази, поширення використання водневого палива в транспортному секторі та початок експортних продажів українського водню.

Водночас варто зазначити, що нормотворча діяльність у ЄС щодо підтримки та впровадження водневих технологій та розвитку водневої інфраструктури триває постійно. Зокрема, 8 грудня 2023 року Європейська комісія, Рада міністрів і Європейський парламент досягли остаточної угоди щодо пакету водню та декарбонізованого газу, який включає регламент та директиву, що визначають ринок транспортування, розподілу та зберігання водню [19]. Ця угода конкретизує водневу стратегію ЄС від 2020 року та є важливим

кроком у розвитку водневої інфраструктури в Європейському Союзі. Це законодавство сприятиме проникненню в енергетичну систему відновлювальних та низьковуглецевих газів, зокрема водню та біометану, та дозволить декарбонізувати ринок водню, зменшити використання викопного палива та знизити залежність від імпорту викопного палива [19].

Відновлюваний водень відіграє ключову роль у майбутньому енергетичному балансі Європи, зокрема для декарбонізації важкої промисловості та деяких транспортних секторів, замінюючи викопне паливо та допомагаючи створити чисту водневу економіку.

Наприкінці 2022 року в промові про стан Європейського Союзу було оголошено про створення Європейського водневого банку (Hydrogen Bank) для підтримки внутрішнього виробництва водню в ЄС та імпорту відновлюваного водню від міжнародних партнерів. Основною метою цього банку є сприяння залученню приватних інвестицій, подолання початкових інвестиційних бар'єрів, усунення інвестиційного розриву та підключення споживачів до майбутніх поставок відновлюваного водню.

У 2023 році Єврокомісія запустила перший аукціон в рамках Європейського водневого банку, щоб підтримати виробництво відновлюваного водню в Європі. Початкові 800 млн євро доходів від торгівлі викидами будуть спрямовані через Інноваційний фонд. Виробники відновлюваного водню можуть претендувати на підтримку у вигляді фіксованої премії за кожен кілограм виробленого водню. Ця премія має на меті подолання розриву між ціною виробництва і ціною, яку споживачі готові платити на ринку, де виробництво невідновлюваного водню все ще дешевше [20].

Hydrogen Bank також розробив інші інструменти політики для створення ринку відновлюваного водню, стимулювання інвестицій у

виробничі потужності та масштабування виробництва. Забезпечуючи швидке впровадження інноваційних водневих технологій, пілотний аукціон має сприяти досягненню мети плану REPowerEU щодо виробництва 10 млн тонн водню всередині ЄС до 2030 року.

#### **1.4 Перспективи промислового виробництва водню**

Ядерна енергетика на сьогодні є одним із основних економічно вигідних джерел виробництва електроенергії та тепла з низьким рівнем викидів вуглецю. Щорічно вона сприяє уникненню понад мільярда тонн викидів CO<sub>2</sub>, забезпечуючи стабільність енергосистем, енергетичну безпеку та протидію кліматичним змінам [11].

Однак, попри значний внесок ядерної енергетики та інших низьковуглецевих джерел, обсяги глобальних парникових викидів залишаються на рівнях, що перевищують необхідні для досягнення цілей Паризької угоди. Для утримання глобального потепління в межах 1,5 °C або 2 °C світова енергетика повинна досягти нульових викидів CO<sub>2</sub> до 2050 року (для 1,5 °C) або невдовзі після цього (для 2 °C).

Згідно з більшістю сценаріїв, зокрема тих, які передбачають суттєве скорочення викидів відповідно до цілей Паризької угоди, очікується значне збільшення ролі ядерної енергетики до 2050 року. У понад 80% сценаріїв, де рівень викидів CO<sub>2</sub> у 2050 році знижується до 20 гігатон (що відповідає обмеженню глобального потепління нижче 2 °C), передбачається розширення використання ядерної енергії. Зокрема, у більш ніж половині сценаріїв прогнозується її як мінімум дворазове зростання, а в приблизно 30% – триразове або більше порівняно з рівнем 2020 року. Згідно зі сценарієм Міжнародного



енергетичного агентства (МЕА) «Чисті нульові викиди до 2050 року», виробництво ядерної енергії має зрости більше ніж удвічі [12].

Енергетичний сектор, включаючи виробництво електроенергії, теплопостачання, транспорт, будівлі, промисловість, спалювання палива та неорганізовані викиди, є відповідальним за майже 75% глобальних викидів парникових газів (ПГ). Для скорочення цих викидів необхідно реалізувати два ключові заходи: по-перше, електрифікувати вуглецеві сектори там, де це технічно та економічно можливо; по-друге, декарбонізувати сектор електроенергетики. Це означає, що в умовах зростаючої електрифікації енергетичні джерела повинні переходити від викопного палива до низьковуглецевих джерел, таких як ядерна енергетика та відновлювані джерела енергії.

Попри те, що ядерна та відновлювана енергетика класифікуються як низьковуглецеві, рівень викидів CO<sub>2</sub> протягом їх життєвого циклу відрізняється. Зокрема, атомна енергетика та більшість технологій вітрової генерації продукують менше ніж 12 грамів CO<sub>2</sub>-еквівалента на кіловат·годину (кВт·год) виробленої енергії. Сонячна енергетика має трохи вищі показники – близько 27 грамів CO<sub>2</sub>-еквівалента на кВт·год, що пов'язано здебільшого зі складом і використанням рідкісноземельних елементів у її технологіях.

З огляду на зростаючий інтерес до скорочення глобальних викидів вуглецю та труднощів із електрифікацією окремих секторів, водень дедалі частіше розглядається як перспективний енергетичний носій. Вироблений із застосуванням низьковуглецевих джерел енергії, таких як ядерна енергетика, водень має майже нульові викиди CO<sub>2</sub> як у процесі використання, так і під час виробництва. Це вигідно відрізняє його від водню, отриманого із застосуванням викопного палива, що супроводжується значними викидами вуглецю.

Зусилля з впровадження водню в промисловість, транспорт та енергетичний сектор мають потенціал сприяти створенню низьковуглецевого майбутнього. Як універсальний енергоносіє, водень може відіграти ключову роль у декарбонізації важкодоступних секторів, де пряма електрифікація є технологічно чи економічно складною.

Міжнародне енергетичне агентство (МЕА) визнало водень та водневі види палива одним із ключових елементів декарбонізації. Комісія з енергетичних переходів (ЕТС), глобальна коаліція лідерів енергетичної галузі, зазначає, що водень може відігравати важливу роль у скороченні викидів парникових газів. Він може використовуватися як у чистому вигляді, так і у формі похідного палива в секторах, де пряма електрифікація є технологічно складною або економічно недоцільною [22].

Nucleareurope (раніше FORATOM) наголошує на важливості використання всіх зрілих низьковуглецевих джерел енергії, включаючи ядерну енергетику, яка має потенціал для виробництва водню [23]. Завдяки можливості цілодобово забезпечувати як електроенергію, так і тепло, атомні електростанції можуть ефективно підтримувати виробництво водню за допомогою різних технологічних процесів. У сучасних умовах зростання частки змінної відновлюваної енергії ядерна енергетика стикається з викликом інтеграції в такі енергетичні системи. Водень може відігравати ключову роль у підвищенні гнучкості цих гібридних систем, виступаючи як засіб накопичення енергії. Крім того, водень, вироблений для зовнішнього продажу, може стати додатковим джерелом доходу для АЕС з надлишком генерації.

Атомні електростанції забезпечують високий коефіцієнт потужності, що дозволяє їм виробляти електроенергію цілодобово, незалежно від погодних умов чи ситуації на ринку. Це робить їх

оптимальним джерелом енергії для водневого виробництва через електроліз, забезпечуючи ефективне використання дорогих електролізерів протягом усього терміну їх експлуатації. Стабільне та надійне енергопостачання є ключовим фактором для масштабного виробництва водню.

Інвестиції у створення електролізних установок для виробництва низьковуглецевого водню є значними, тому для забезпечення їхньої рентабельності необхідно максимально збільшити тривалість їхньої роботи (мінімум 5000 годин на рік, оптимально – до 8000 годин). Проте переривчастість відновлюваних джерел енергії, таких як сонячна та вітрова енергетика, обмежує час використання електролізерів до 2000–4000 годин на рік. У цьому контексті ядерна енергетика та гідроелектроенергетика мають ключову перевагу завдяки своїй керованості та стабільності, що дозволяє забезпечити прогнозоване енергопостачання протягом усього року.

На основі аналізу вартості електричної енергії в Україні станом на 2024 рік, отриманої з відновлюваних джерел енергії (сонячна та вітрова енергетика, за умовами чинного "зеленого тарифу"), а також вартості виробництва електроенергії на працюючих блоках атомних електростанцій, було проведено порівняння технологічних, екологічних та економічних показників виробництва низьковуглецевого водню. Аналіз виконано для електролізної установки потужністю 1 ГВт. Результати дослідження наведено у таблиці 1.1

Таблиця 1.1 Порівняння технологічних, екологічних та економічних показників виробництва низьковуглецевого водню на електролізній установці електричною потужністю 1 ГВт [24].

Джерело електро-енергії	Вартість виробленої електричної енергії, євро/МВт.	Коефіцієнт відносної потужності	Виробництво H <sub>2</sub> рік, тис. кг /рік	Необхідна площа га	Вміст CO <sub>2</sub> При виробництві H <sub>2</sub> екв/кгH <sub>2</sub>	Вартість водню євро/кгH <sub>2</sub>
СЕС	40,50	13 – 16%	21466	12686	1,404	6,02
ВЕС	88,20	33 – 38%	52556	34495	0,572 <sup>6</sup>	6,85
АЕС	39,21	77 – 81% <sup>3</sup>	116955	337	0,624 <sup>6</sup>	3,12

Як показує аналіз, 3,38 кг CO<sub>2</sub> екв/кг H<sub>2</sub> (поточний поріг), щоб досягти 3 кг (зазначено в таксономії ЄС) до 2030 року, 2 кг до 2040 року та 1 кг до 2050 року.

Згідно з представленими даними, виробництво низьковуглецевого водню на базі електроенергії з діючих блоків АЕС демонструє найкращі результати за кількома ключовими параметрами. Зокрема:

Технологічні переваги: продуктивність електролізної установки при використанні енергії з АЕС вдвічі вища порівняно з енергією від ВЕС і в п'ять разів перевершує показники при використанні енергії з СЕС.

Екологічні переваги: виробництво водню з електроенергії АЕС супроводжується найменшим викидом парникових газів (ПГ) на 1 кг H<sub>2</sub> серед усіх розглянутих джерел енергії.

Економічна ефективність: використання електроенергії АЕС дозволяє досягти найнижчої усередненої вартості водню (LCOH), яка є важливим показником конкурентоспроможності. Чим нижча ціна

ЛСОН, тим вищий прибуток можна отримати від продажу водню на ринку.

Таким чином, електроенергія з АЕС є оптимальним вибором для виробництва низьковуглецевого водню завдяки поєднанню високої продуктивності, мінімального впливу на довкілля та економічної вигідності.

Отже, низьковуглецевий водень, вироблений за допомогою електроенергії з діючих блоків АЕС, має очевидні переваги над воднем, отриманим із використанням електроенергії від відновлюваних джерел – сонячної та вітрової енергії.

Проведений аналіз рентабельності роботи діючого блоку атомної електростанції потужністю 1000 МВт(е) дозволив порівняти питомі економічні показники дохідності при виробництві електричної енергії (за поточних умов) та при виробництві низьковуглецевого водню.

Аналіз даних за 8 років роботи чотирьох українських атомних електростанцій із загальною встановленою потужністю 13,8 ГВт (станом на 2020 р.) дозволив визначити економічні показники роботи типового енергоблоку з реактором потужністю 1000 МВт(е). Середньорічний обсяг виробленої електроенергії у грошовому еквіваленті для одного енергоблоку становить 155 млн доларів, а середній чистий дохід від реалізації електроенергії – 127 млн доларів [24].

У разі реалізації проекту будівництва електролізної установки потужністю 1 ГВт поблизу існуючого енергоблоку аналогічної потужності, середній обсяг виробництва низьковуглецевого водню у грошовому еквіваленті становитиме 655 млн доларів, а середній чистий дохід від його реалізації – 345 млн доларів.

### 1.5 Дослідження використання водню як палива

Водень розглядають як енергоносіє, здатний зберігати надлишок енергії, виробленої з відновлювальних джерел енергії (ВДЕ), і передавати її в періоди, коли в енергосистемі спостерігається дефіцит енергії. «Зелений» водень, отриманий за допомогою вітрової або сонячної енергії через електроліз води, в майбутньому відіграватиме важливу роль у світовій економіці. Він може стати альтернативою природному газу не тільки в енергетичному секторі, але й у промисловості та транспорті.

Однак для отримання енергонасиченого водню за допомогою електролізу води необхідна велика кількість електричної енергії, що наразі призводить до вищої вартості його виробництва порівняно з традиційними викопними джерелами палива. За даними Європейської комісії за 2020 рік, ціна "сірого" водню, виробленого з використанням викопного палива, складає близько 1,50 євро за кілограм; вартість "синього" водню, отриманого з природного газу з уловлюванням вуглецю, оцінюється в 2 євро за кілограм, тоді як "зелений" водень коштує від 2,50 до 5,50 євро за кілограм.

Зараз світ перебуває в ситуації, схожій на ту, що була у період поширення ВДЕ в 2000–2005 роках. За наступні десять-п'ятнадцять років, ймовірно, водень стане більш конкурентоспроможним енергетичним ресурсом. Прогнози вказують на те, що до 2050 року у більшості регіонів світу "зелений" водень, завдяки значному зниженню вартості виробництва електроенергії з ВДЕ, може коштувати від 0,8 до 1,6 долара США за кілограм. Транспортування водню трубопроводами

з Північної Африки до Німеччини може бути здійснене за ціною 0,5 долара США за кілограм.

Перспективним напрямком у енергетиці є використання водню як палива для газових турбін, здатних працювати на чистому водні як за постійного навантаження, так і в маневрових або пікових режимах, що необхідно для балансування енергетичних систем з високим рівнем використання відновлювальних джерел енергії. Газоподібний водень (при тиску 350 бар) також може бути застосований для важких транспортних засобів, таких як вантажівки, поїзди або будівельна техніка.

Основною технологією для виробництва сталі з залізорудної сировини стане процес прямого відновлення заліза за допомогою водню. До 2050 року структура споживаних енергоресурсів у металургії зазнає кардинальних змін: використання вугілля зменшиться на 40%, а потреба в електроенергії подвоїться. При цьому близько 30% цієї електроенергії (близько 700 ТВт·год) буде спрямовано на виробництво водню через електроліз, що вимагатиме близько 165 ГВт потужності для електролізерів.

Норвезька компанія Nel Hydrogen розпочала будівництво найбільшого у світі повністю автоматизованого заводу з виробництва електролізерів потужністю 360 МВт на рік, який постачатиме ефективні та доступні за ціною електролізери. Одним із перспективних напрямів для масштабованого сезонного підземного зберігання водню є його накопичення у геологічних структурах.

Згідно з прогнозами, до 2050 року водень забезпечить 24% глобальних енергетичних потреб, що дозволить знизити викиди від викопного палива на одну третину. Крім того, до 2030 року попит на «зелений» водень зросте до 8,7 мільйона тонн на рік.

Європейська воднева стратегія передбачає три основні етапи розвитку. Перший етап, до 2024 року, полягає у створенні електролізерів для виробництва «зеленого» водню, який буде використовуватися в таких галузях, як сталеливарна, хімічна та нафтопереробна промисловість. Наступним кроком до 2030 року стане розвиток локальних виробництв водню, які з'єднаються в єдину європейську водневу інфраструктуру. З 2030 по 2050 рік очікується широке впровадження водневих технологій у важкій промисловості. Європейський Союз планує до 2024 року встановити 6 ГВт потужностей електролізерів для виробництва «зеленого» водню, що дозволить виробляти до 1 млн тонн водню, а до 2030 року – 40 ГВт, що забезпечить виробництво 10 млн тонн водню, а також необхідну кількість вітрових і сонячних електростанцій (120 ГВт). Загальний обсяг інвестицій у «зелений» водень в ЄС до 2030 року планується на рівні 40 млрд. євро, а до 2050 року він може досягти 180-470 млрд євро.

Водень, як потенційна альтернатива викопним енергоресурсам, набуває все більшої актуальності в енергетичних обговореннях і має потенціал стати одним із головних факторів енергетичної трансформації, орієнтуючись на сталий розвиток через широке використання відновлювальних джерел енергії (ВДЕ). Ключовими технологіями, що підтримують цю трансформацію, є накопичувачі енергії та водень. Вони можуть забезпечити необхідне зберігання енергії, виробленої від таких змінних ВДЕ, як сонячна та вітрова енергія. Ці технології можуть доповнювати одна одну у різних сферах. Якщо водень виявиться економічно вигіднішим варіантом для таких галузей, як накопичення енергії, високотемпературні промислові процеси, важковаговий транспорт, морські перевезення та авіація, він може стати основним рішенням. Водночас водень отримує важливий



політичний пріоритет на міжнародній арені: більше 30 країн вже розробили власні стратегії розвитку водневих технологій.

Перспектива економічно вигідного виробництва «зеленого» водню з нульовими викидами стає реальністю завдяки широкому впровадженню відновлювальних джерел енергії. Найбільші економіки світу активно формують «зелені» інвестиції для стимулювання розвитку цієї технології. Міжнародне енергетичне агентство (МЕА) зазначило, що технологія «зеленого» водню готова до масштабного впровадження і закликала уряди країн направити інвестиції на розвиток водневої економіки.

Провідні компанії активно працюють над впровадженням водню як палива для електрогенерації. Найбільші виробники газових турбін, серед яких Mitsubishi Hitachi Power Systems, GE Power, Siemens Energy та Ansaldo Energia, розробляють моделі, здатні ефективно працювати на чистому водні в режимах постійного, маневреного та пікового навантаження.

Siemens Energy, наприклад, модернізує газову турбіну SGT-400 для використання чистого водню, яку планується встановити на ТЕЦ у Франції та Німеччині. У Японії в 2020 році розпочала роботу газотурбінна електростанція «Мідзуе» потужністю 80 МВт, що працює на водневому паливі (компанія Taо Oil). Асоціація технологічного розвитку водневої енергетики Японії (AHEAD) до 2030 року планує щорічно постачати 350 тис. тонн водню для живлення гігаватної електростанції.

Крім того, Mitsubishi Hitachi Power Systems отримала замовлення на водневі турбіни для трьох газових проєктів у США загальною потужністю 3300 МВт. На початковому етапі (після 2022–2023 років) газові турбіни працюватимуть на суміші, що містить 30% водню та 70% природного газу. Один із проєктів, потужністю 840 МВт,

передбачає переобладнання вугільної електростанції із застосуванням турбін Mitsubishi Hitachi Power Systems, які поступово перейдуть на використання 100% екологічно чистого водню. Для виробництва водню в цих проєктах використовуватиметься надлишкова електроенергія, отримана з відновлювальних джерел енергії (ВДЕ) [25, 26].

У сфері автомобільного транспорту прогнозується поступова заміна автобусів із дизельними двигунами на водневі. Газоподібний водень (при тиску 350 бар) може також використовуватися для важковантажних транспортних засобів, таких як вантажівки, локомотиви та будівельна техніка. Компанії Daimler і Volvo вже оголосили плани щодо впровадження протягом наступного десятиріччя важковантажних автомобілів, що працюють на водневих паливних елементах. Порівняно з електромобілями, водневі автомобілі відзначаються значно вищою енергетичною щільністю та швидкістю заправки, яка займає лише кілька хвилин, що робить їх більш ефективними та екологічно вигідними.

Виробництво водню. У сучасних умовах 99,6% водню виробляється з викопного палива через парову конверсію метану або газифікацію вугілля, що супроводжується значними викидами CO<sub>2</sub>. Такий водень поділяється на «сірий» (без уловлювання вуглецю) та «синій» (з уловлюванням CO<sub>2</sub>). Альтернативним підходом є отримання «зеленого» водню шляхом електролізу води з використанням електроенергії з відновлюваних джерел. Цей метод є енергоємним, але безвуглецевим і відповідає амбітним цілям ЄС щодо досягнення кліматичної нейтральності до 2050 року.

Наразі «сірий» і «синій» водень залишаються дешевшими за «зелений», проте очікується, що технічні інновації та зростання попиту сприятимуть зниженню вартості виробництва «зеленого» водню.

Ключовими факторами зменшення витрат є постійне здешевлення електроенергії з ВДЕ та підвищення ефективності використання електролізерів, яке йде в ногу зі зростанням попиту на екологічно чистий водень.

Зниження вартості виробництва водню за допомогою електролізерів значною мірою обумовлено розробкою альтернатив платиновим каталізаторам. Хоча платина є найефективнішим матеріалом, її неможливо застосовувати для електролізу морської води. У відповідь на це були створені економічні каталізatori на основі міді з додаванням нікелю та хрому. Ці нові матеріали дозволяють ефективно генерувати водневе паливо, використовуючи морську воду без необхідності попереднього опріснення, що суттєво знижує витрати.

За даними компанії Wood Mackenzie, в Європейському Союзі наразі функціонує близько 135 МВт потужності електролізерів, але в рамках запланованих проєктів ця цифра може зрости до 5,2 ГВт. У 2019 році в світі експлуатувалося понад 500 електролізерів. Найбільший електролізер у світі на сьогодні — це багатомодульна установка потужністю 10 МВт, що отримує електроенергію від сонячної станції потужністю 20 МВт, розташована поблизу японського міста Фукусіма.

Європа та Австралія займають провідні позиції серед проєктів, що передбачають електролізери потужністю 1 ГВт і більше. У Китаї наразі будується завод, де сонячні та морські вітрові електростанції забезпечуватимуть виробництво 400-500 тис. тонн водню на рік. Норвезька компанія Nel Hydrogen розпочала будівництво найбільшого у світі повністю автоматизованого заводу з виготовлення електролізерів, який матиме річну потужність 360 МВт, що в кілька разів більше за поточний світовий рівень виробництва електролізерів.

У Канаді була проведена оцінка потенціалу великомасштабного сезонного підземного зберігання водню (UHS) в геологічних формаціях країни. Порівняно з традиційними надземними сховищами, UHS має низку переваг, зокрема здатність до зберігання водню при високому тиску, менші вимоги до площі, вищі стандарти безпеки, менший вплив на навколишнє середовище, довший термін служби та знижені витрати на інвестиції. Найбільш перспективними для UHS є соляні печери, глибокі водоносні горизонти, виснажені нафтові і газові родовища, а також кам'яні печери. Соляні печери виділяються завдяки низьким інвестиційним витратам і високій герметичності [27].

У 2021 році компанія EWE в Німеччині планує створити печерне сховище для водню. Для випробувань буде побудовано сховище об'ємом 500 м<sup>3</sup>, яке працюватиме на 100% водні, на глибині 1000 м. Це дозволить зберігати одночасно від 5 до 6 тонн водню [28].

### **1.6 Досвід спалювання суміші коксового газу з 50-60% воднем**

Коксовий газ, що має теплотворну здатність 14–18 МДж/м<sup>3</sup> і складається на 50–60% з водню, є цінним паливом. Використання коксового газу в суміші з природним та доменним газами, де частка водню не перевищує 20–25%, є досить розповсюдженим у металургійних нагрівальних установках [29]. Проте дослідження та застосування водню або водневих сумішей, що містять більше ніж 50% водню, в промислових печах залишаються обмеженими.

За даними різних досліджень, при зміні вмісту водню в суміші з метаном від 0 до 60% об'ємних часток спостерігається значне збільшення швидкості розповсюдження полум'я — з 37–40 см/с до 75–82 см/с, при коефіцієнті надлишку повітря  $\alpha = 0,87\text{--}0,9$  [30]. Це вимагає

особливої уваги до конструкції пальників, зокрема до забезпечення гомогенної суміші газу і повітря перед його виходом з пальника, а також вирішення питань безпечного спалювання коксового газу.

Автори створили та виготовили експериментальний двосопловий пальник, у якому сопла розташовані під різними кутами щодо зрізу. Така конструкція дає змогу спрямовувати факели окремо до льотки та жолоба, що мають різний кут нахилу, забезпечуючи рівномірний прогрів цих поверхонь через прямий теплообмін. Використання двох окремих сопел вимагає подачі підготовленої суміші коксового газу з повітрям до кожного з них. Крім того, в конструкції передбачені стабілізатори горіння для кожного сопла (рис. 1.2).

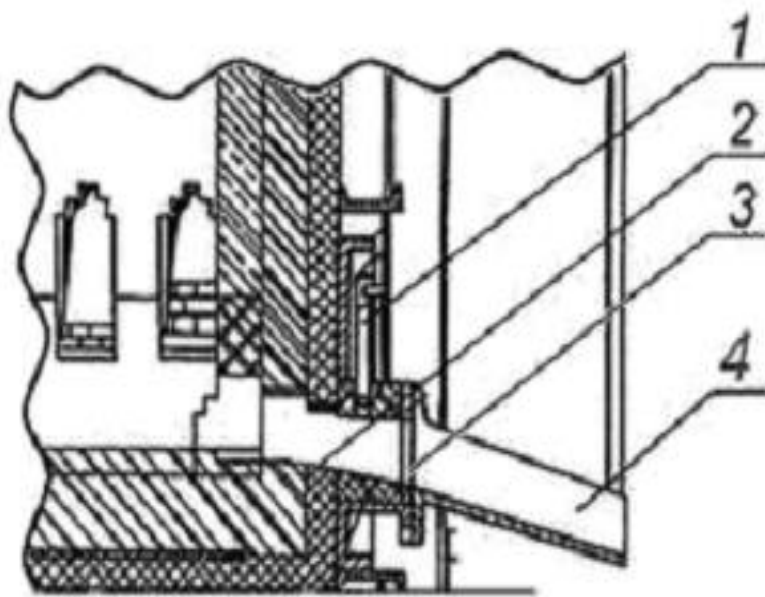


Рисунок 1.2 – Встановлення льотки з жолобом зі сторони нагрівального колодязя. 1 – пальник; 2 – льотка; 3 – монтажна плита; 4 – жолоб [22].

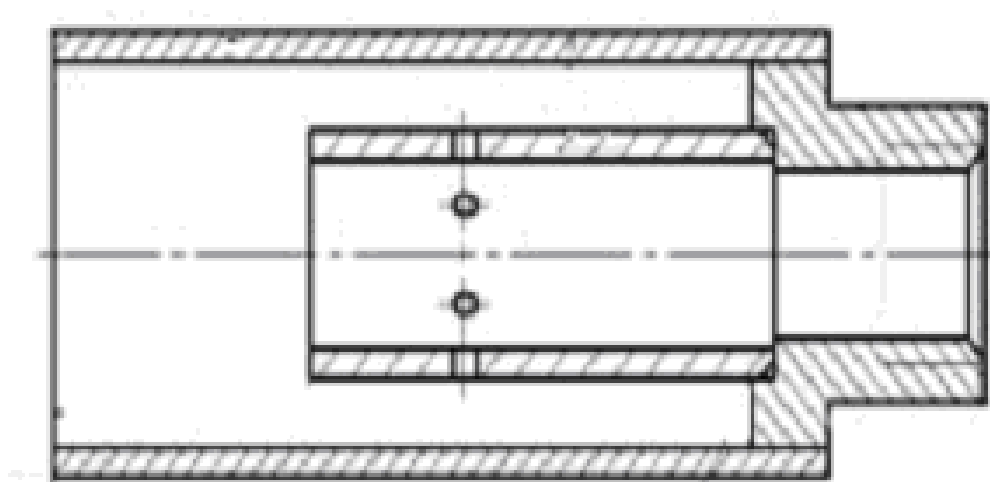


Рисунок 1.3 – Ескіз сопла зі стабілізатором горіння [31].

Ступінь прогріву льотки та жолоба оцінювався за температурою, виміряною оптичним пірометром та тепловізором Flir T660. Порівняльний аналіз результатів випробувань за допомогою штатного та експериментального пальників показав, що температура шлаку при роботі з експериментальним пальником, після його налаштування та регулювання робочих параметрів, забезпечує оптимальну рідину шлаку для нормального спуску. Полум'я в такому випадку було більш розтягнутим, а пікові температури нагріву конструкцій були нижчими порівняно з нагрівом штатним пальником (рис. 1.4). Це дозволяло зменшити споживання палива, уникнути перегріву окремих частин вузла спуску шлаку та покращити термін служби обладнання.

З термограми розподілу температур по льотці та жолобу можна побачити дві області з підвищеними температурами, де середні значення температур коливаються в межах 1260–1400 °С. Стабільне полум'я спостерігалось на всьому діапазоні теплової потужності пальника, за умови правильного налаштування його робочих характеристик. Полум'я, яке виходило з сопел, мало спрямовану

форму, що дозволяло досягти рівномірного прогріву внутрішніх поверхонь льотки та жолоба з оптимальною настільністю.

Наявність двох факелів, спрямованих на поверхні, через які рухається шлак, дозволила знизити температуру нагріву монтажної плити майже на 100 °С, що позитивно вплинуло на її термін служби. Однак після понад трьох діб роботи пальника було помічено, що висока швидкість витікання газів (близько 90 см/с) спричиняє розбризкування рідкого шлаку, краплі якого потрапляють у сопла. Це призводить до перегріву сопел і поступового виходу з ладу стабілізаторів полум'я (рис.1.5).

Рисунок 1.4 – Вимірювання температури шлаку при використанні штатного (а) та (б) дослідного пальника [31].

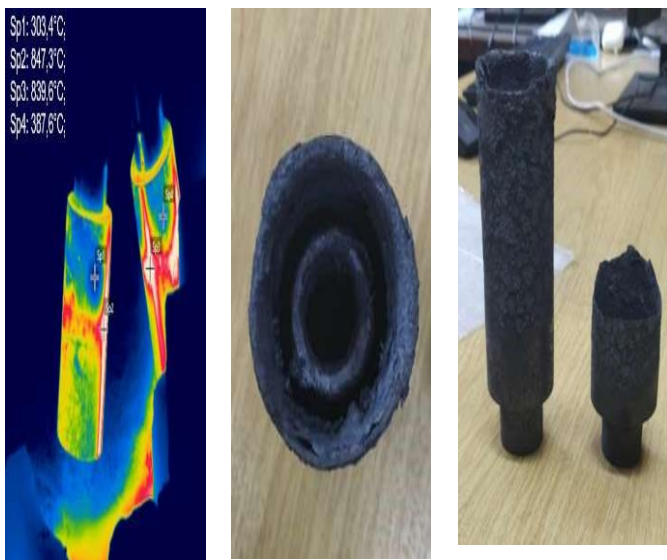


Рисунок 1.5 – Фото перегріву та засмічення сопел [31].

Після заміни сопел на нові, які зменшили швидкість витоку газів до 75 см/с, були проведені повторні випробування. Виявилось, що для забезпечення надійної роботи пальника необхідно звужити діапазон його регулювання (рис. 1.6)

Горіння залишалося стабільним у всьому діапазоні теплової потужності пальника, при цьому дотримувалася його регульовальна характеристика. Факели, що виходили з сопел, мали направлену форму, створюючи рівномірне нагрівання внутрішніх поверхонь льотки та жолоба.





Рисунок 1.6 – Регульовальна характеристика дослідного пальника [31].

Було зазначено, що при роботі дослідного пальника за умов, коли його робочі параметри значно відхилялися від регульованих значень, спостерігалось періодичне нагрівання сопел через горіння газоповітряної суміші в стабілізаторі. Зокрема, при зниженні тиску коксового газу перед пальником з 1,0 кПа до 0,3–0,4 кПа за постійного тиску повітря об'єм суміші коксового газу з повітрям зменшувався. У результаті швидкість витікання газів через сопла знижувалася до 57–66 см/с, що з одного боку відповідало турбулентному руху, а з іншого – була меншою за швидкість горіння коксового газу.

#### Висновки

Промислові випробування пальника для спалювання суміші коксового газу з повітрям підтвердили доцільність використання коксового газу як палива для опалювальних установок та продемонстрували такі результати:

- при дотриманні регулювальних характеристик роботи пальника, його ефективність була задовільною в усіх діапазонах теплової потужності;

- для забезпечення належної роботи пальника при спалюванні суміші коксового газу з повітрям необхідно підтримувати швидкість витоку газу через пальник у межах 75–82 см/с.

### **1.7 Експериментальні дослідження екологічності спалювання паливної суміші метан-водень.**

Під час аналізу літературних джерел було виявлено, що, попри значний обсяг інформації про перспективи використання водню як палива, майже відсутні дані щодо заміни природного газу воднем з урахуванням енергетичних та технологічних характеристик роботи процесів і обладнання. Окрім того, спостерігаються деякі протиріччя.

Дослідження, що стосуються використання метано-водневих сумішей у побутових газових приладах (плитах, котлах), показують, що додавання водню до природного газу призводить до зменшення викидів оксидів азоту (NO<sub>x</sub>), але автори не пояснюють причини цього явища. Водночас відомо, що при підвищенні температури горіння завдяки додаванню водню, емісія NO<sub>x</sub> зазвичай зростає. Крім того, робота А. Huber [2] представляє результати спільного спалювання метано-водневих сумішей у промислових пальниках Marathon, де виявлено зворотний ефект: викиди NO<sub>x</sub> збільшуються, а викиди CO зменшуються, що суперечить висновкам досліджень.

У цьому контексті постала необхідність у самостійному з'ясуванні наукових аспектів спалювання метано-водневих сумішей у газових пальниках і утворення шкідливих речовин. Зокрема, у

дослідженні А. Huber [2] було вивчено спільне спалювання метано-водневих сумішей у промислових пальниках Marathon, і результати цього дослідження суперечать висновкам роботи, виявляючи, що викиди NOx збільшуються, а CO зменшуються.

Крім того, в результаті власних експериментальних досліджень автори [7] виявили, що при спалюванні метано-водневих сумішей у промислових газових пальниках викиди оксидів азоту (NOx) збільшуються в 1,5–2 рази при використанні чистого водню, тоді як утворення CO зменшується приблизно в 20 разів.

Оскільки вищезазначені публікації засновані на експериментальних дослідженнях, важливим і доцільним етапом для оптимізації подальших робіт щодо використання метано-водневих сумішей є проведення попереднього теоретичного аналізу процесів заміщення метану воднем.

## 1.8 Висновки по розділу 1

На підставі проведеного огляду сформулюємо мету на завдання роботи.

**Мета роботи** – визначення енергетичних та екологічних характеристик процесів горіння газового палива при заміщенні природного газу на водень. Отримані результати мають стати теоретичним та практичним підґрунтям для широкого використання водню в енергетиці, промисловості та комунально-побутовому секторі при частковому (а в перспективі і повному) заміщенні природного газу.

Для досягнення поставленої мети потрібно виконати 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  $\text{CO}_2$ ;
- підготовка вимірювальної установки для проведення експериментальних досліджень;
- визначення енергоекологічних характеристик спалювання метано-водневих сумішей в промисловому газовому пальнику з визначенням емісії  $\text{NO}_x$ ,  $\text{CO}$  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 ( $\text{NO}_x$ ), при використанні в штатних осьових пальниках водогрійного котла типу ДКВР-10-13.

## РОЗДІЛ 2. РОЗРАХУНКОВО ТЕОРЕТИЧНИЙ АНАЛІЗ ОСОБЛИВОСТЕЙ ВИКОРИСТАННЯ ВОДЕНЬМІСТКИХ СУМІШЕЙ ПРИ ЗАМІЩЕННІ ПРИРОДНОГО ГАЗУ

### 2.1 Аналіз характеристики суміші природного газу з воднем.

На сучасному етапі розвитку енергетики все більшого розповсюдження отримують водневі технології, так зокрема, водень вже достатньо широко використовують як автомобільне паливо [35], ведуться роботи по його використанню в енергетиці та комунально-побутовому секторі при заміщенні природного газу шляхом домішування водню в газові мережі [34,35].

Відомо, що для водню, як палива, характерна більш низька теплотворна здатність ( $Q_{np} = 10,79$  МДж/м<sup>3</sup>) та густина ( $\rho = 0,09$  кг/м<sup>3</sup>) порівняно з природним газом ( $Q_{np} = 35,88$  МДж/м<sup>3</sup>,  $\rho = 0,72$  кг/м<sup>3</sup>), то при заміщенні останнього воднем знижується теплота згорання сумішевого палива (віднесена до 1 м<sup>3</sup> суміші) порівняно з природним газом. Для умови підтримки введеної в топку кількості теплоти збільшується витрата палива і змінюються режими роботи пальників.

Таким чином при заміщенні природного газу на відповідні його суміші з воднем потрібно враховувати не тільки зміну теплотехнічних характеристик суміші, і зміну вогнетехнічних характеристик згорання палива, утворення шкідливих речовин, зміни процесів теплообміну внаслідок зміни складу продуктів згорання і т.д.

## 2.2 Теоретичні аспекти використання воденьмістких палив.

На сьогодні відомо чимало експериментальних робіт щодо спалювання метано-водневих сумішей. Так, наприклад, у роботі [7], яка присвячена використанню метано-водневих сумішей у побутових газових приладах (плитах, обігрівальних котлах), зазначено, що додавання водню до природного газу сприяє зниженню викидів оксидів азоту ( $\text{NO}_x$ ), хоча автори не пояснюють причин цього явища. Водночас, у дослідженні А. Huber [2], проведено дослідження спільного спалювання метано-водневих сумішей у промислових пальниках Marathon. Результати цього дослідження суперечать висновкам статті [7], демонструючи, що викиди  $\text{NO}_x$  зростають, а викиди CO зменшуються.

Крім того, у власних експериментальних дослідженнях авторів [8] було встановлено, що під час спалювання метано-водневих сумішей у промисловому газовому пальнику емісія оксидів азоту ( $\text{NO}_x$ ) збільшується приблизно в 1,5...2 рази при спалюванні чистого водню, але при цьому спостерігається значне зниження утворення CO (приблизно в 20 разів).

Оскільки вказані публікації [2,7, 36] мають експериментальний характер досліджень, то важливим і доцільним для оптимізації і раціоналізації подальших робіт з визначення можливостей використання метано-водневих сумішей є проведення попереднього теоретичного аналізу процесів заміщення метану – воднем.

Для відокремлення невирішених раніше частин загальної проблеми необхідно відзначити, що представлені вище результати досліджень [3, 8, 36] мають експериментальний характер, крім того відомі результати стосуються переважно питань зміни вогнетехнічних

характеристик складу суміші, та не враховують зміну вогнетехнічних характеристик процесу горіння та утворення шкідливих речовин.

В якості міри горючих та реакційних (детонаційних) властивостей паливо-окислювальних сумішей розглядають одну з основних вогнетехнічних характеристик горючих газів – швидкість ламінарного горіння.

В якості якісного критерію утворення шкідливих речовин можна вважати рівноважні концентрації оксидів азоту  $\text{NO}_x$ , які утворюються при максимальній (адіабатичній температурі горіння).

Визначенню вказаних основних вогнетехнічних та екологічних характеристик процесів спалювання метано-водневих сумішей власне і присвячена дана робота. Для повного розгляду вказаної проблеми авторами передбачено також розглянути зміну вогнетехнічних (теплоти згоряння, теоретичні температури горіння) характеристик метано-водневих палив та екологічні характеристики: утворення оксидів азоту ( $\text{NO}$ ,  $\text{NO}_x$ ) і вуглекислоти  $\text{CO}_2$ .

### **2.3 Визначення вогнетехнічних характеристик спалювання метано-водневих сумішей.**

В якості міри горючих та реакційних властивостей паливо-окислювальних сумішей використовують фундаментальну характеристику горючих газів – швидкість ламінарного горіння, яка ще поширена під назвою «швидкість нормального розповсюдження полум'я».

В роботі авторів Pío G., Salzano E. [37] запропоновано для визначення нормальної швидкості поширення полум'я при горінні сумішей газів з повітрям використовувати принцип адитивності:

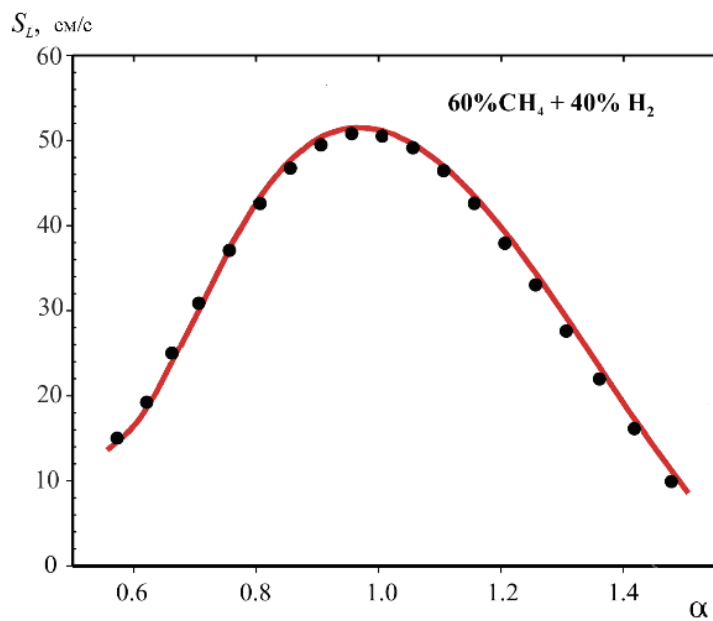
$$S_L = C_1 s_1 + C_2 s_2 + C_3 s_3 + \dots = \sum_{i=1}^n C_i s_i, \quad 1)$$

де  $s_i$  – швидкість горіння  $i$  компонента паливної суміші,  $C_i$  – концентрація  $i$  горючого компонента паливної суміші, об. (мол.) доля.

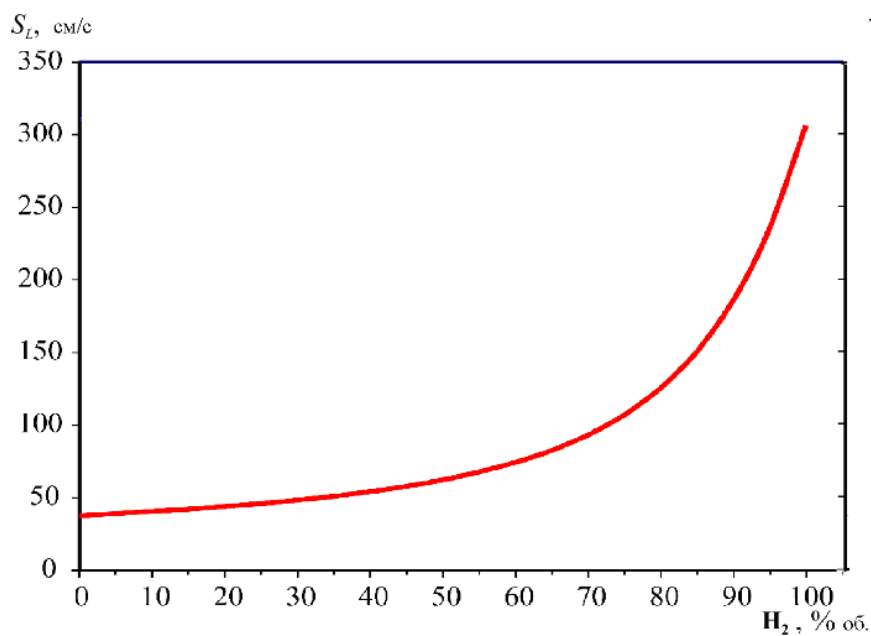
Використовуючи відомі літературні дані з щодо швидкості горіння окремих газових палив [39, 40] та рівняння (1) проведено розрахунки швидкості горіння метано-водневих сумішей від коефіцієнту надлишку повітря  $\alpha$  (рис. 2.1, а) та отримано залежність швидкості нормального розповсюдження полум'я сумішей від вмісту водню (рис. 2.1, б).

Як показує аналіз, хоча максимальна ламінарна швидкість горіння водневого полум'я і може перевищувати швидкість горіння метану в 20 разів (рис. 2.1, б), але при відносно-помірній долі заміщення метану воднем, наприклад для суміші  $[\text{CH}_4] / [\text{H}_2] = 60 / 40$ , % об., швидкість горіння буде складати  $S_L \sim 50$  см/с (рис. 2.1, а), що лише на  $\sim 25$  % більше ніж для природного газу. Різке збільшення швидкості горіння спостерігається на рівні  $[\text{H}_2] = 70 \dots 80$  %, об., але через низьку теплоту згоряння водню використання такої суміші промислово виникає сумнів.



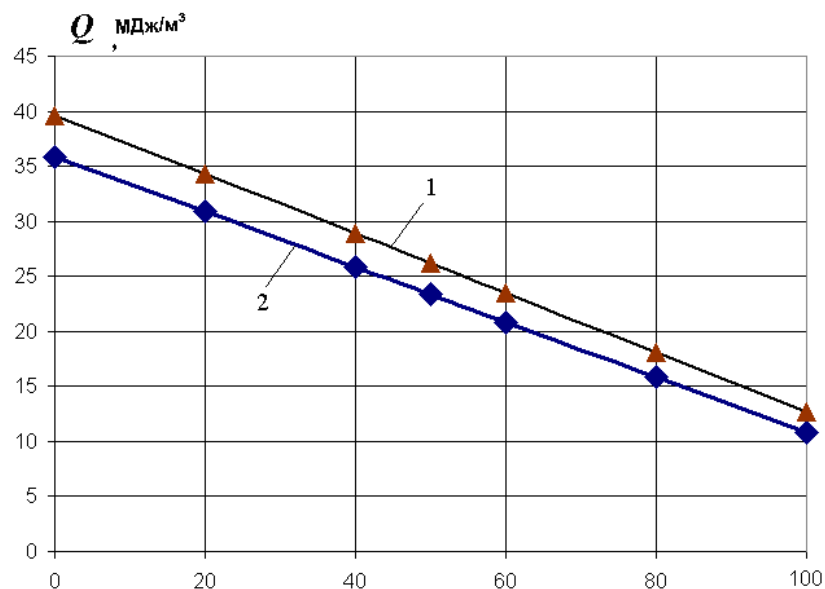


а)

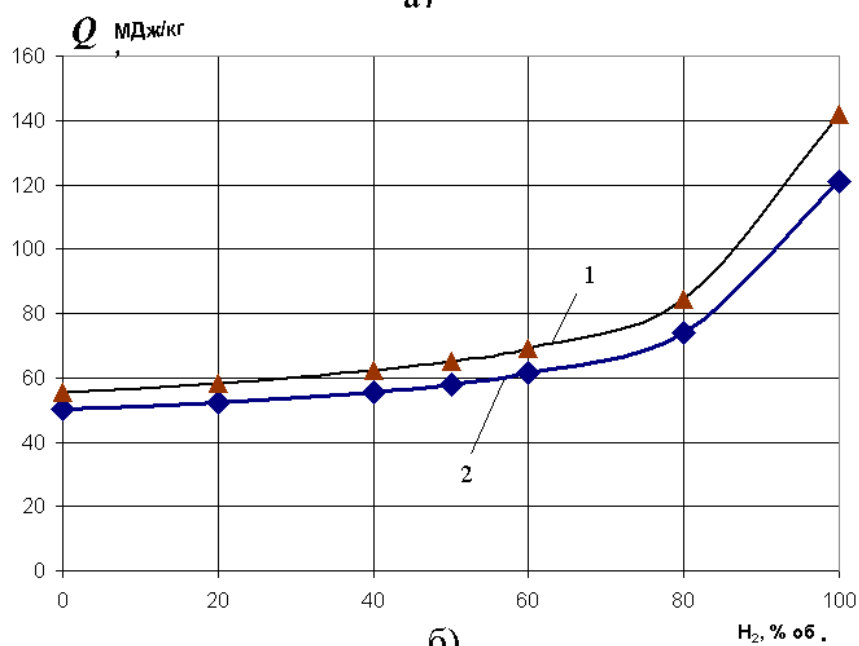


б)

Рисунок 2.1 – Залежність ламінарної швидкості горіння  $S_L$ , см/с, метано-водневих сумішей з атмосферним повітрям. а – залежність від коефіцієнту надлишку повітря  $\alpha$  при горінні суміші 60%  $\text{CH}_4$  + 40%  $\text{H}_2$ , • – експериментальні точки [39]; б – залежність від вмісту водню  $[\text{H}_2]$ , % об., при змінному коефіцієнті надлишку повітря  $\alpha = 1,0$ .



а)



б)

Рисунок 2.2 – Залежність теплоти згоряння, вищої  $Q_v^p$  (1) та нижчої  $Q_n^p$  (2), метано-водневої суміші з сухим повітрям від вмісту  $[\text{H}_2]$ , % об., в газовому паливі: а – масової,  $\text{МДж/кг}$ ; б – об'ємної,  $\text{МДж/нм}^3$ .

Вогнетехнічна група характеристик палива включає енергетичні показники: теплоти згоряння палив. На рис. 2.2 представлені теплоти згоряння  $Q_n^p$ ,  $Q_v^p$  на одиницю маси (1 кг) та

об'єму (1 нм<sup>3</sup>) для нормальних умов (0 °С). Числові значення  $Q_H^P$ ,  $Q_B^P$  (рис. 2.2), додатково наведені в табл. 2.1.

Таблиця 2.1 Енергетичні характеристики стехіометричних метано-водневих сумішей у залежності від частки водню в газовому паливі, % об. тиск  $p_0 = 0,101325$  МПа).

Н <sub>2</sub> , % об.	СН <sub>4</sub> , % об.	$Q_H^P$ , МДж/к	$Q_B^P$ , МДж/к	$Q_{HP}$ , МДж/м	$Q_{BP}$ , МДж/м
0	100	50,23	55,51	35,88	39,65
20	80	52,37	58,12	30,86	34,25
40	60	55,66	62,15	25,84	28,85
50	50	58,08	65,10	23,34	26,16
60	40	61,38	69,13	20,83	23,46
80	20	73,77	84,27	15,81	18,06
100	0	120,85	141,79	10,79	12,66

Розрахунки теоретичних температур горіння (рис. 2.3) метано-водневих сумішей та утворення рівноважних оксидів азоту NO та NO<sub>x</sub> (рис. 2.4) виконували у програмі для розрахунку хімічних рівноваг TERRA (автор Б.Г. Трусов), яка реалізована на основі відповідних обчислювальних механізмів [40].

Як показує розрахунковий аналіз – додавання водню незначно збільшує теоретичну температуру горіння суміші, при повному заміщенні метану на водень збільшення теоретичної температури горіння складає ~155 °С (див. рис. 2.3), і як наслідок – відбувається збільшення утворення оксидів азоту (рис. 2.4).

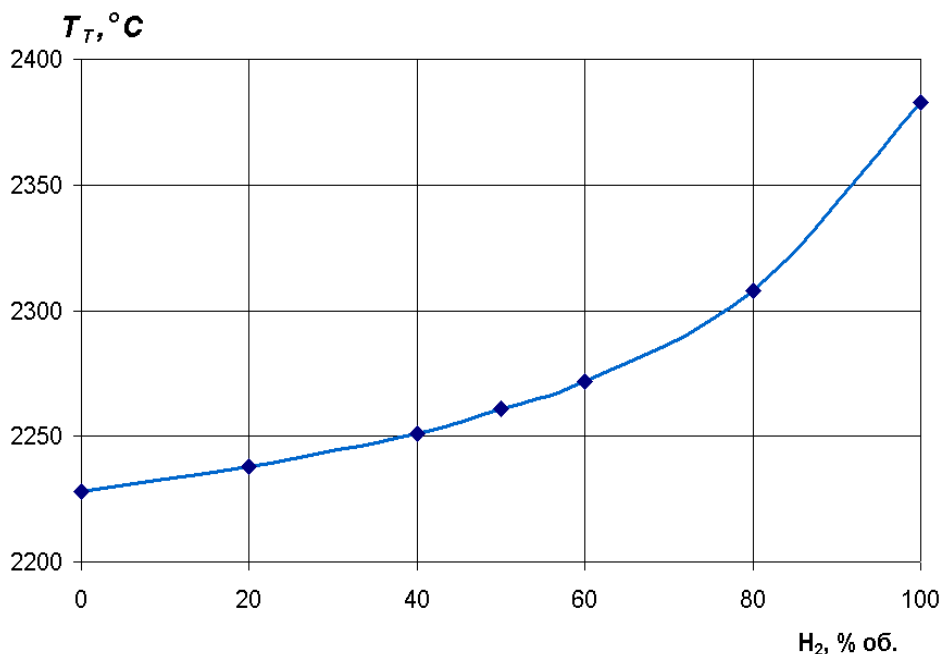


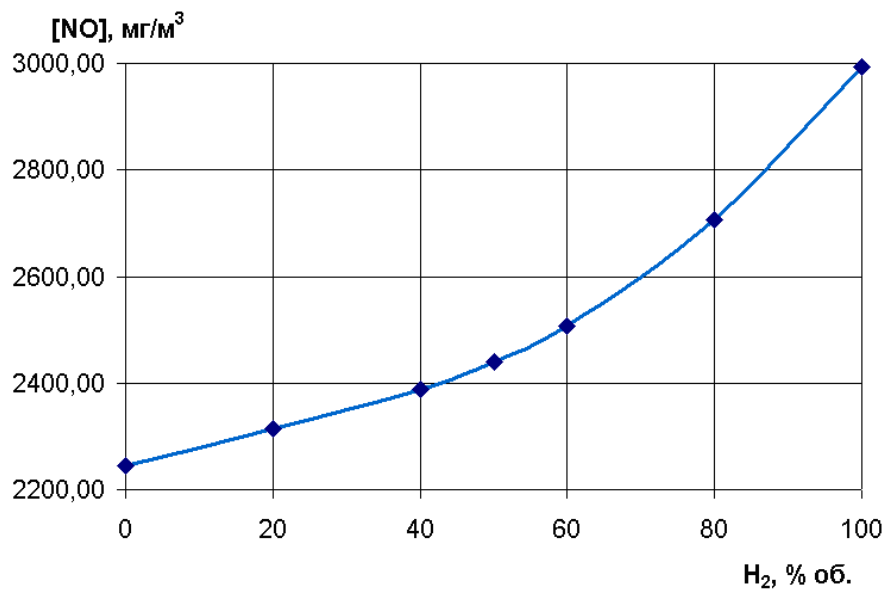
Рисунок 2.3. – Залежність теоретичної температури горіння  $T_T$  від долі  $H_2$  для стехіометричної ( $\alpha = 1,0$ ) метано-водневої суміші з повітрям.

#### 2.4 Визначення енергоекологічних характеристик спалювання метано-водневих сумішей.

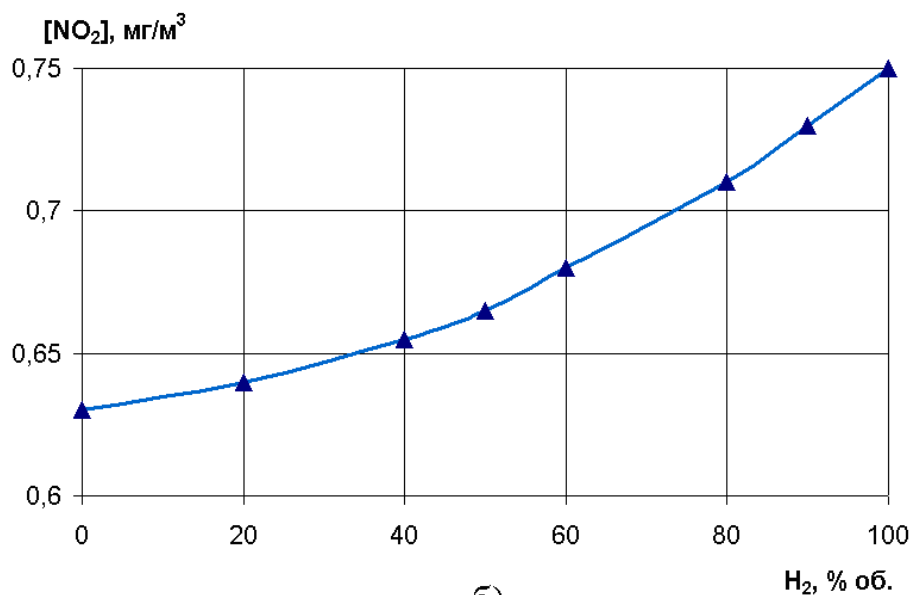
Відомо, що при горінні палива основним оксидом азоту, який утворюється безпосередньо у полум'ї є NO (оксид азоту), який потім до окислюється в атмосфері до діоксиду азоту  $NO_2$ . Власне діоксид азоту  $NO_2$  під час самої реакції горіння майже не утворюється, але він є набагато токсичнішим за NO. Як показує термодинамічний розрахунок, для стехіометричної паливо-окислювальної суміші при заміщенні метану

$[CH_4] = 100 \text{ \%}$ , об. на метано-водневу суміш  
 $[CH_4] / [H_2] = 50 / 50 \text{ \%}$ , об. збільшення утворення NO складає з  $2245 \text{ мг/м}^3$  до  $2440 \text{ мг/м}^3$ , тобто на  $8,6 \text{ \%}$ , а при спалюванні чистого водню  $[H_2] = 100 \text{ \%}$ , об утворення NO складе  $2995 \text{ мг/м}^3$ , тобто

збільшиться на 33,4% у порівнянні з чистим метаном. Стосовно утворення  $\text{NO}_2$  безпосередньо під час горіння палива, то термодинамічним розрахунком показано, що діоксид азоту майже не утворюється – збільшення складає з  $0,63 \text{ мг/м}^3$  для метану до  $0,75 \text{ мг/м}^3$  для чистого водню.



а)



б)

Рисунок 2.4 – Залежність утворення  $\text{NO}$  (а) та  $\text{NO}_2$  (б) від доли  $\text{H}_2$  в продуктах згорання стехіометричної ( $\alpha = 1,0$ ) метано-водневої суміші з повітрям.

При аналізі згоряння різних палив, зокрема метано-водневих, доцільно порівняти обсяги утворення  $\text{CO}_2$  на одиницю енергії, яка виділяється при згорянні палива.

Викиди  $\text{CO}_2$  доцільно порівнювати в кілограмах утворення парникового газу, що віднесено до теплоти згоряння палива. Для випадку спалювання метано-водневих сумішей зазначені питомі викиди  $\psi_{\text{CO}_2}$  складають відповідно:

$$\psi_{\text{CO}_2} = m_{\text{CO}_2} / Q_{\text{mix}} = \rho_{\text{CO}_2} \cdot V_{\text{CO}_2} / Q_{\text{mix}}, \quad 2$$

де,  $\rho_{\text{CO}_2} \cdot V_{\text{CO}_2}$  – відповідно нормальна густина двоокису вуглецю ( $1,96 \text{ нм}^3/\text{кг}$ ) та об'єм  $\text{CO}_2$ , що утворився при спалюванні метано-водневого палива;  $Q_{\text{mix}}$  – теплота згоряння  $1 \text{ нм}^3$  метано-водневого палива.

На рис. 2.5 показано рівень зменшення питомих викидів  $\text{CO}_2$  –  $\psi_{\text{CO}_2}$  на одиницю теплової енергії паливної суміші від долі метану.

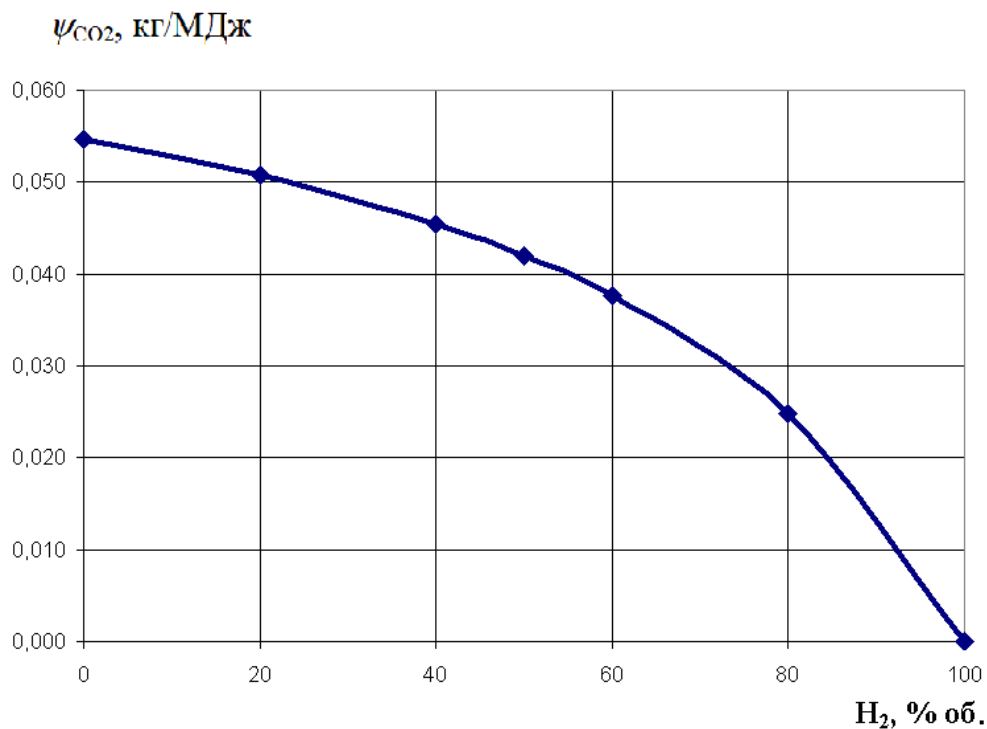


Рисунок 2.5 – Залежність питомих викидів  $\psi_{\text{CO}_2}$   $\text{CO}_2/\text{МДж}$  при спалюванні метано-водневих сумішей.

Так, використання сумішевого газу  $\text{CH}_4$  /  $[\text{H}_2] = 50 / 50 \%$ , об. забезпечує скорочення викидів  $\text{CO}_2$  лише на 23,34 % – з 0,055 кг/МДж до 0,042 кг/МДж – відповідно до наших розрахунків

## 2.5 Висновки до розділу 2.

В рамках розгляду перспективного напрямку використання палив – заміщення природного газу воднем, розглянуто дві групи характеристик метано-водневих палив: вогнетехнічні та екологічні. До першої групи віднесено швидкість ламінарного горіння та теплоти згоряння (вища  $Q_{\text{в}}^p$  та нижча  $Q_{\text{н}}^p$ , масова і об'ємна), а також теоретична (адіабатна) температура горіння ( $T_T$ ).

В якості екологічних характеристик розглядалось утворення оксидів азоту NO та  $\text{NO}_2$ , а також викиди  $\text{CO}_2$  віднесені до теплоти згоряння паливної суміші.

Проведений в роботі аналіз показав, що при відносно-помірній долі заміщення метану воднем, наприклад для суміші  $[\text{CH}_4] / [\text{H}_2] = 60 / 40, \%$  об., швидкість горіння буде складати  $S_l \sim 50$  см/с, що лише на  $\sim 25 \%$  більше ніж для природного газу. Більші значення заміщення  $\text{CH}_4$  на  $\text{H}_2$  економічно є сумнівними через низьку теплотворну здатність останнього.

Термодинамічні оцінки утворення шкідливих речовин показали, що для оксиду азоту NO, при заміщенні метану  $[\text{CH}_4] = 100 \%$ , об. на метано-водневу суміш  $[\text{CH}_4] / [\text{H}_2] = 50 / 50 \%$ , об. збільшення утворення NO складає з 2245 мг/м<sup>3</sup> до 2440 мг/м<sup>3</sup>, тобто на 8,6 %, а при спалюванні чистого водню  $[\text{H}_2] = 100 \%$ , об утворення NO складе 2995 мг/м<sup>3</sup>, тобто збільшиться на 33,4% у порівнянні з чистим метаном.. Розрахунками утворення викидів  $\text{CO}_2$  встановлено, що при

використанні сумішевого газу  $[\text{CH}_4] / [\text{H}_2] = 50 / 50 \%$ , об. скорочення викидів  $\text{CO}_2$  складатиме лише 23,34 % – з 0,055 кг/МДж до 0,042 кг/МДж.

Таким чином, при використанні водню як палива доцільно оцінювати можливий екологічний ефект, який зокрема пов'язаний з різким збільшенням емісії  $\text{NO}$  при досить помірному зменшенні утворення  $\text{CO}_2$ .



### **РОЗДІЛ 3. ЕКСПЕРЕМЕНТАЛЬНІ ДОСЛІДЖЕННЯ СПАЛЮВАННЯ МЕТАНО-ВОДНЕВИХ СУМІШЕЙ**

Однією з поширених тенденцій в останні роки є збільшення частки альтернативних видів палива, зокрема відновлюваних джерел енергії, у порівнянні з мінеральними (органічними) паливами. Формування ринків енергетичних ресурсів та вибір відповідних видів палива, як правило, викопного, а також постачання палива на інші ринки, є результатом політичних, економічних та екологічних ініціатив урядів та громадських організацій у різних країнах та регіонах світу. Сучасний європейський ринок палива систематично перетворюється під впливом тенденції декарбонізації навколишнього середовища.

Великий акцент робиться на розширенні виробництва "зеленого" водню, який отримується за допомогою відновлюваних джерел енергії, таких як сонце, вітер, низьковуглецеве паливо та окремі біопалива. Ця тенденція, в поєднанні з метою мінімізації використання органічного палива (викопного), має на меті збереження мінеральних палив для майбутніх поколінь.

На сьогоднішній день завдання заміни природного газу альтернативними видами палива реалізується за допомогою метано-водневих сумішей з інжектуванням водню в місцеві газопроводи [3].

#### **3.1 Заходи з промислового використання водню**

У зв'язку з декарбонізацією навколишнього середовища застосовуються сталі теплові технології, спрямовані на раціональне використання сировини, палива та енергії, а також на мінімізацію викидів CO<sub>2</sub> за рахунок використання відновлюваних джерел енергії та

переходу до електромобілів для зменшення шкідливих викидів [4]. Багато інженерних розробок для сталого розвитку паливної енергетики стосуються теплового обладнання в різних галузях промисловості. Формування ринків енергії та палива має свою специфіку, оскільки пріоритети змінюються відповідно до економічних, енергетичних, екологічних та кліматичних факторів.

Діяльність світових організацій та ЄС спрямована на декарбонізацію та запобігання глобальному потеплінню. Прикладами такої діяльності є резолюція про захист клімату була прийнята на саміті ООН у вересні 2015 року в Нью-Йорку [5]. Директива Європейського Союзу RED (Директива про відновлювані джерела енергії) 2009/28/ЕС встановила мінімальні кількісні показники для використання відновлюваних джерел енергії до 2020 року, зокрема, 10% на транспорті та 20% для загального споживання енергії.

Зміни в екологічній ситуації призвели до диверсифікації ринку газового палива в Європі. Особлива увага приділяється новим показникам, таким як вміст водню, оскільки його використання має важливий вплив на характеристики палива, особливо в контексті проблем "зеленої енергії" та "зеленого водню". Крім того, домішки водню розширюють діапазон характеристик горіння та теплотехнічних характеристик основного газового палива, що відіграє важливу роль в енергетичній та екологічній сфері.

У Німеччині, Федеральне міністерство економіки та енергетики (BMWi), наприклад, розробило плани на майбутнє (до 2030-2050 років), спрямовані на використання водню як палива для промисловості, транспорту та енергопостачання. Згідно з цими планами, національний та імпортований водень, зокрема з України, мав забезпечити німецьку економіку енергією без викидів CO<sub>2</sub>. Водень визначався як ключовий енергетичний компонент у майбутньому, і до

2050 року планувалося виключення викопного палива (вугілля, нафта, природний газ) зі списку використовуваного палива в Європі.

### 3.2 Експериментальні дослідження на установці.

У роботі проведено експериментальне дослідження спалювання метано-водневої суміші на експериментальній установці з пальником SUEMAX (рис. 3.1) тепловою потужністю 30 кВт.

Виходячи з завдання дослідження було розроблено та налагоджено лабораторний стенд (рис. 3.2) зі всією необхідною апаратурою. Під час експерименту фіксувались параметри температури повітря в ході у вимірювальну ділянку, витрата палива, температура продуктів згоряння по довжині факелу, концентрація оксидів вуглецю та азоту в продуктах згоряння палива. Концентрації шкідливих викидів вимірювались за допомогою газоаналізатора «ОКСИ-5М».



Рисунок 3.1 – Газовий пальник SUEMAX

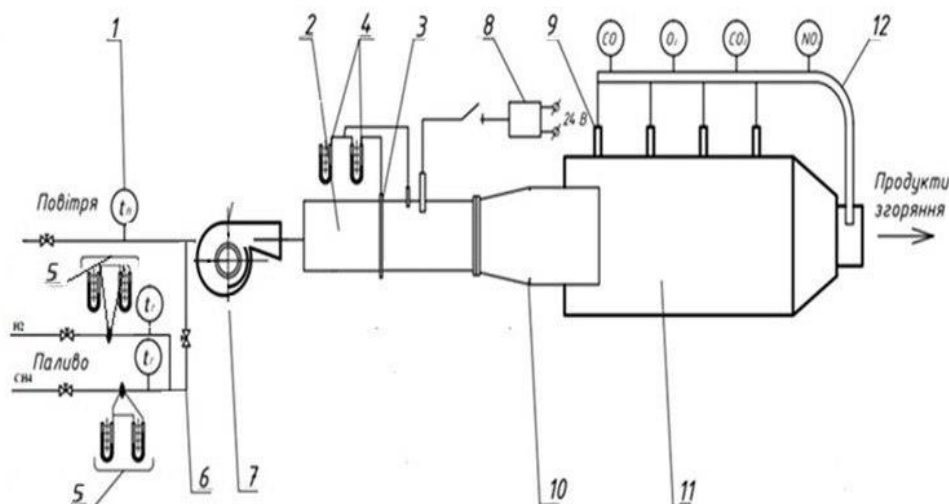


Рисунок 3.2. – Схема лабораторного вогневого стенду:

1 – термометр для вимірювання температури повітря; 2 – початкова ділянка; 3 – інтегральна трубка Піто; 4, 5 – блок манометрів; 6 – подача палива до основного колектора; 7 – пальник; 8 – свіча запалювання; 9 – штуцери для вимірювання температури газів по довжині факелу; 10 – дифузор; 11 – футерована вогнева ділянка; 12 – інтегральний пробовідбірник

Дослідження проводили для чотирьох паливних сумішей: чистого природного газу ( $[\text{CH}_4] = 100\%$  об.), чистого водню ( $[\text{H}_2] = 100\%$  об.), суміші природного газу з воднем в співвідношенні  $[\text{CH}_4] / [\text{H}_2] = 70 / 30\%$  об., та суміші природного газу з воднем в співвідношенні  $[\text{CH}_4] / [\text{H}_2] = 50 / 50\%$  об.; Для процесу горіння визначали емісію  $\text{NO}_x$  та утворення  $\text{CO}$ . При проведенні дослідів підтримували постійну теплову потужність пальника на рівні 10 кВт.

Представлені зображення факела свідчать про радикальні зміни в його структурі внаслідок додавання водню до реакційної суміші. Це пояснюється зростанням інтенсивності горіння при наявності водню у природному газі, що впливає на гідродинаміку потоку реагентів. Очевидні "трансформації" факела особливо помітні при збільшенні концентрації водню.

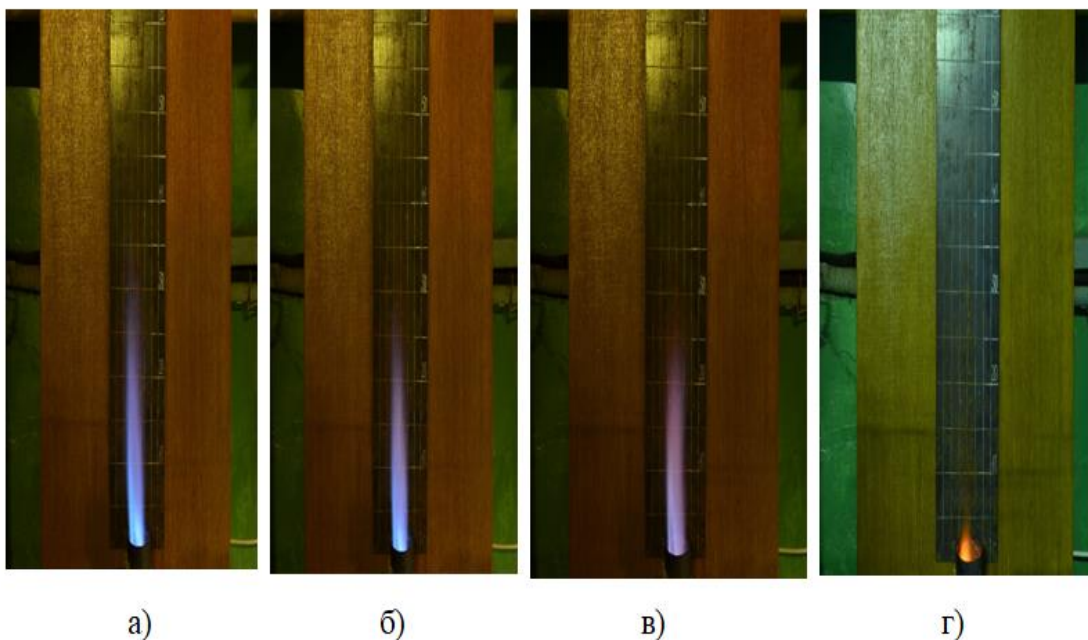


Рисунок 3.3. – Фото факелу при спалюванні: а) природного газу, ( $[\text{CH}_4] = 100\%$  об.), б) суміші природного газу і водню ( $[\text{CH}_4] / [\text{H}_2] = 70 / 30, \%$  об.); в) суміші природного газу і водню ( $[\text{CH}_4] / [\text{H}_2] = 50 / 50, \%$  об.); г) при спалюванні чистого водню ( $[\text{H}_2] = 100, \%$  об.)

Спостерігається зміна характеристик світимості факелу від «блакитного» кольору до «жовтого» при заміщенні метану на водень, це пояснюється зміною складу продуктів згоряння та відсутністю  $\text{CO}_2$  у продуктах згоряння, як одного з випромінюючо-поглинаючих газів продуктів згоряння.

Під час проведення досліджень були визначені енергоекологічні характеристики спалювання метано-водневих сумішей в промисловому газовому пальнику з визначенням емісії  $\text{NO}_x$ ,  $\text{CO}$  (рис. 3.4 та рис.3.5) та температурні характеристики факелу (рис. 3.6).

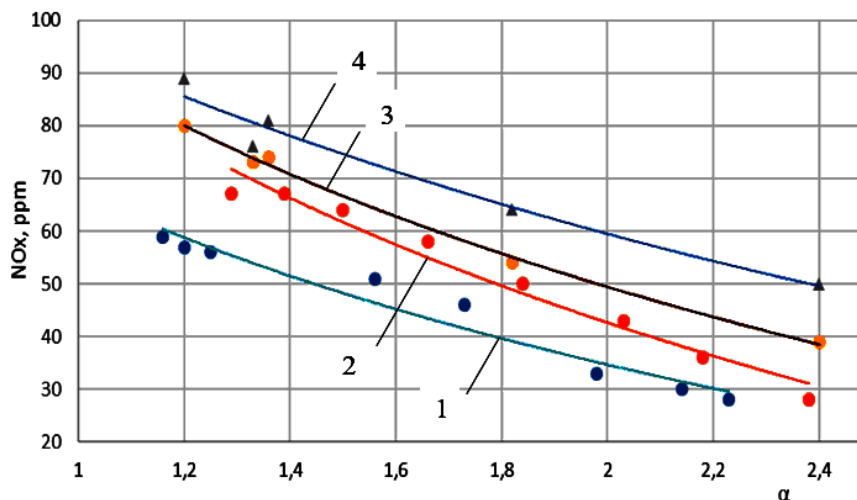


Рисунок 3.4 – Залежність емісії  $\text{NO}_x$  від коефіцієнту надлишку повітря  $\alpha$  : 1) природного газу, ( $[\text{CH}_4] = 100$  % об.) ;  
 2) суміші природного газу і водню ( $[\text{CH}_4] / [\text{H}_2] = 70 / 30$ , % об.);  
 3) суміші природного газу і водню ( $[\text{CH}_4] / [\text{H}_2] = 50 / 50$ , % об.);  
 4) при спалюванні чистого водню ( $[\text{H}_2] = 100$ , % об)

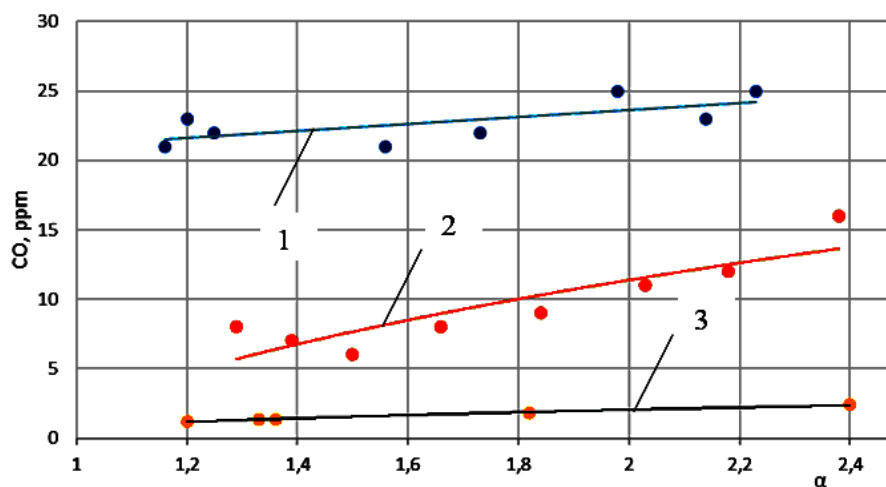


Рисунок 3.5. – Залежності утворення  $\text{CO}$  від коефіцієнту надлишку повітря  $\alpha$ : 1) природного газу, ( $[\text{CH}_4] = 100$  % об.) ;  
 2) суміші природного газу і водню ( $[\text{CH}_4] / [\text{H}_2] = 70 / 30$ , % об.);  
 3) суміші природного газу і водню ( $[\text{CH}_4] / [\text{H}_2] = 50 / 50$ , % об.)

Аналіз експериментальних даних на рис. 3.4 та рис. 3.5 свідчить, що у випадку збільшення вмісту водню в суміші з природним газом емісія  $\text{NO}_x$  збільшується, що пояснюється більшою

температурою горіння водню в порівнянні з метаном (природним газом), а викиди CO в свою чергу зменшуються, що відповідає відомим процесам утворення шкідливих речовин, коли зі зростанням емісії  $\text{NO}_x$  спостерігається зниження утворення CO. Також, експериментально показано, що температура на виході з камери спалювання збільшується при збільшенні вмісту водню в суміші порівняно з чистим природним газом (рис. 6). Встановлено, що емісія оксидів азоту  $\text{NO}_x$  зростає в  $\sim 1,5 \dots 2,0$  рази та складає  $[\text{NO}_x] = 89 - 50 \text{ ppm}$  для спалювання чистого водню. В той же час відмічається суттєве зниження утворення CO,  $\sim 20$  разів при спалюванні суміші  $[\text{CH}_4] / [\text{H}_2] = 50 / 50, \% \text{ об.}$ , рівень утворення CO складає  $[\text{CO}] = 1 - 2 \text{ ppm}$ . Зрозуміло, що при спалюванні чистого водню  $[\text{H}_2] = 100, \% \text{ об.}$ , CO не утворюється.

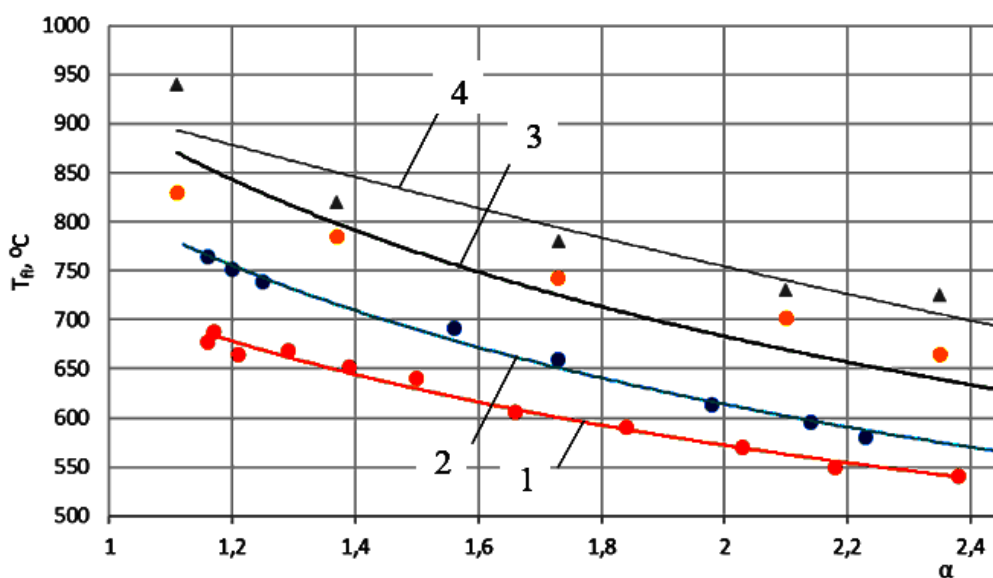


Рисунок 3.6. – Залежність температури на виході з камери згоряння  $T_v$  від коефіцієнту надлишку повітря  $\alpha$ : 1) природного газу

( $[\text{CH}_4] = 100 \% \text{ об.}$ );

2) суміші природного газу і водню ( $[\text{CH}_4] / [\text{H}_2] = 70 / 30, \% \text{ об.}$ );

3) суміші природного газу і водню ( $[\text{CH}_4] / [\text{H}_2] = 50 / 50, \% \text{ об.}$ );

4) при спалюванні чистого водню ( $[\text{H}_2] = 100, \% \text{ об.}$ )

Аналіз даних щодо залежності температури продуктів згоряння від долі водню в суміші з природним газом показують, що температура факелу збільшується при збільшенні долі водню, температура на виході з камери згоряння зростає від 670 °C при спалюванні метану ( $[\text{CH}_4] = 100\%$  об.) до 945 °C при спалюванні чистого водню ( $[\text{H}_2] = 100\%$  об.), що і пояснює відповідне збільшення емісії оксидів азоту  $\text{NO}_x$ .

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.

На основі аналізу результатів експериментів визначено, що при спалюванні метано-водневої суміші зменшуються викиди  $\text{CO}$  та збільшуються температури викидних газів і емісія  $\text{NO}_x$ .

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

Результати дослідження в подальшому можуть бути використані для підвищення ефективності процесу горіння при спалюванні метано-водневих сумішей та модернізації паливоспалюючих систем котлів малої потужності комунальної та промислової теплоенергетики, індивідуально-побутового сектора та ін.



### 3.3 Порівняння енергоекологічних характеристик при спалюванні метано-водневих сумішей у пальниках різних конструкцій.

На сучасному етапі розвитку енергетики водневі технології набувають все більшого поширення. Зокрема, водень уже активно використовують як паливо для автомобілів, а також ведуться дослідження щодо його застосування в енергетиці та житлово-комунальному секторі шляхом додавання до природного газу в газових мережах. Окрім цього, українські науковці провели дослідження щодо характеристик спалювання водню в пальникових пристроях, призначених для побутового та промислового використання.

У продовження проведених досліджень варто зазначити, що дедалі більшого поширення набувають пальники, які реалізують дифузійно-кінетичне горіння палива. Одним із технічних втілень цього принципу є прямоточні пальники стабілізаторного типу, робочий процес яких визначається струменево-нішовою системою (СНС) (рис. 3.7). У зв'язку з цим актуальним є порівняння характеристик спалювання метано-водневих сумішей у таких СНС-пальниках із класичними промисловими одно- або двостадійними газовими пальниками. Для лабораторного порівняння було обрано промисловий одностадійний пальник SUEMAX (рис. 3.1) з номінальною потужністю 30 кВт.

З метою виконання завдання дослідження було розроблено та налаштовано лабораторний стенд (рис. 3.2), оснащений усією необхідною апаратурою. Під час експерименту фіксувалися параметри температури повітря та паливних газів, витрати палива і повітря, температура продуктів згоряння вздовж факелу, а також концентрація

оксидів вуглецю та азоту у продуктах згоряння. Вимірювання концентрацій шкідливих викидів здійснювалося за допомогою газоаналізаторів «ОКСИ 5М» та Testo 330l.

Результати експериментальних вимірювань наведені для сталої теплової потужності досліджуваних пальникових систем на рівні 20 кВт. Дані газового аналізу продуктів згоряння природного газу та його суміші з воднем у пальниках двох досліджуваних конструкцій представлені на рис. 4–7. Подальший аналіз ґрунтується на припущенні, що наведені характеристики відповідають робочому діапазону досліджуваних пальникових конструкцій.

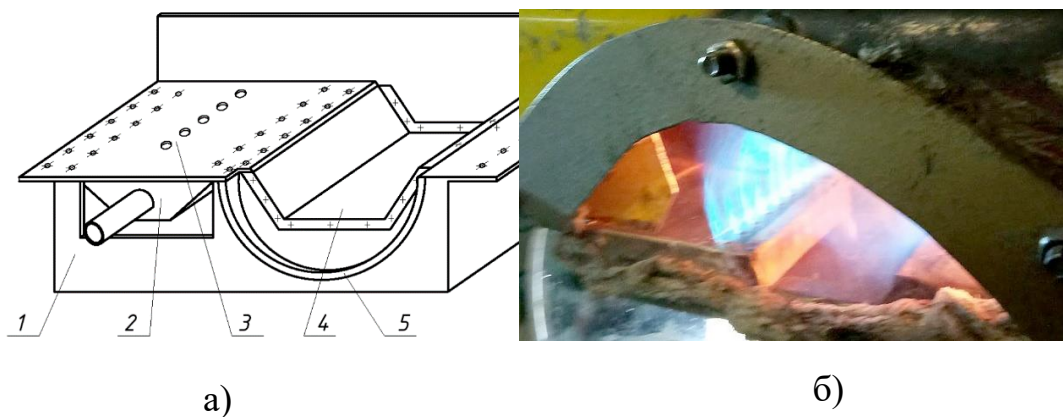
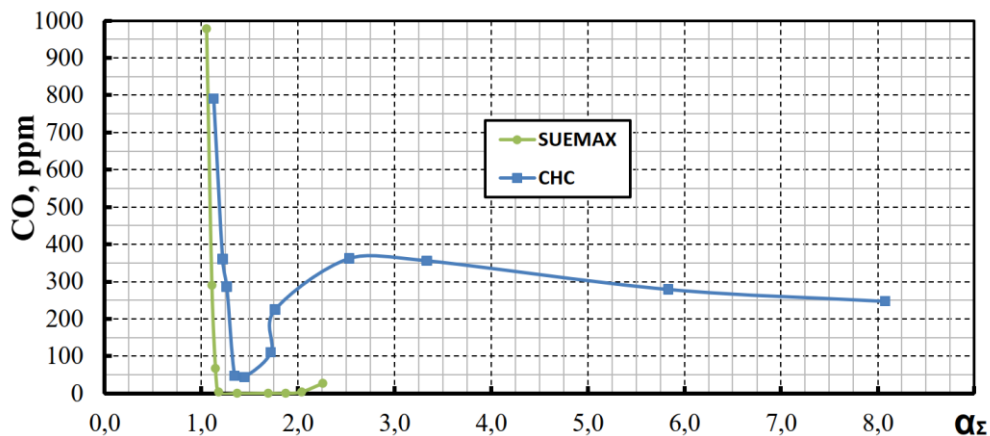


Рисунок. 3.7 – Пальник струменево-нішової системи спалювання: а – блок установки елементів струменево-нішевого стабілізатору: 1 – корпус блоку; 2 – розбірний газовий колектор; 3 – система круглихотворів для паливоподачі; 4 – нішева порожнина; 5 – напівфланець оглядового скла; б – горіння метано-водневої суміші в СНС.

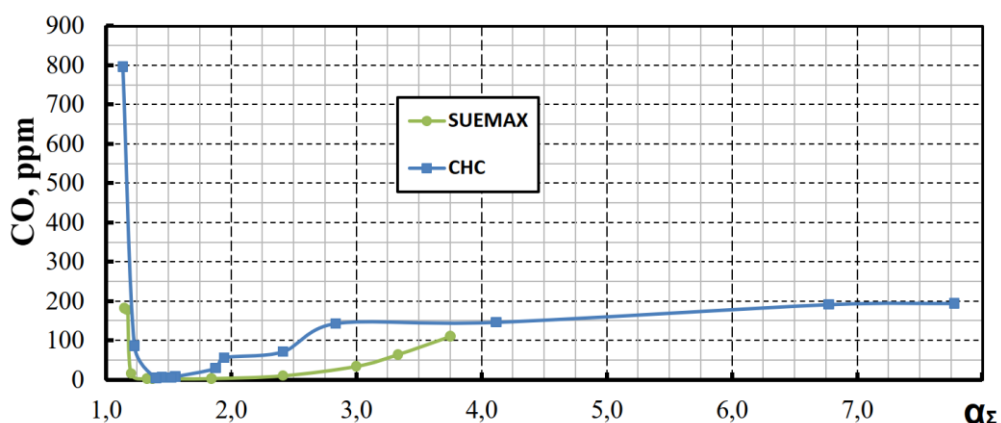
Промисловий пальниковий пристрій SUEMAX демонструє високу ефективність робочого процесу, що підтверджується мінімальним хімічним недопалом у вигляді монооксиду вуглецю (рис. 3.8). Дослідження засвідчили, що пальник працює в діапазоні коефіцієнта надлишку повітря  $\alpha = 1,1 \dots 2,0$ , тоді як робота в зоні збіднених паливних сумішей при  $\alpha > 2,0$  неможлива, що підтверджується отриманими залежностями.

З іншого боку, струменево-нішова система (СНС) забезпечує надійну стабілізацію полум'я у значно ширшому діапазоні  $\alpha = 1,05 \dots 8,0$ . Водночас найбільш сприятливі умови для ефективного горіння спостерігаються у дещо вузьких межах порівняно з SUEMAX і відповідають діапазону  $\alpha = 1,3 \dots 1,8$ . Для СНС також простежується мінімум характеристики, який відповідає критичному надлишку повітря  $\alpha_{кр} \approx 1,4$ . Водночас для пальника SUEMAX практично весь робочий діапазон забезпечує мінімальні значення концентрацій СО та високу інтенсивність горіння в межах робочих навантажень.

Домішка водню до  $[H_2] / [CH_4] = 50 \% / 50 \%$  об. Це суттєво інтенсифікує процес горіння, водночас розширюючи діапазон сталої роботи пальника в зоні збідненого горіння майже вдвічі – до  $\alpha = 3,8$ . Для СНС у цій зоні також спостерігається зниження недопалу вуглецю у 3–4 рази. Крім того, межа бідного зриву полум'я в СНС зміщується в бік розширення діапазону сталоного горіння, що залежить від вмісту водню в паливній суміші.



а)

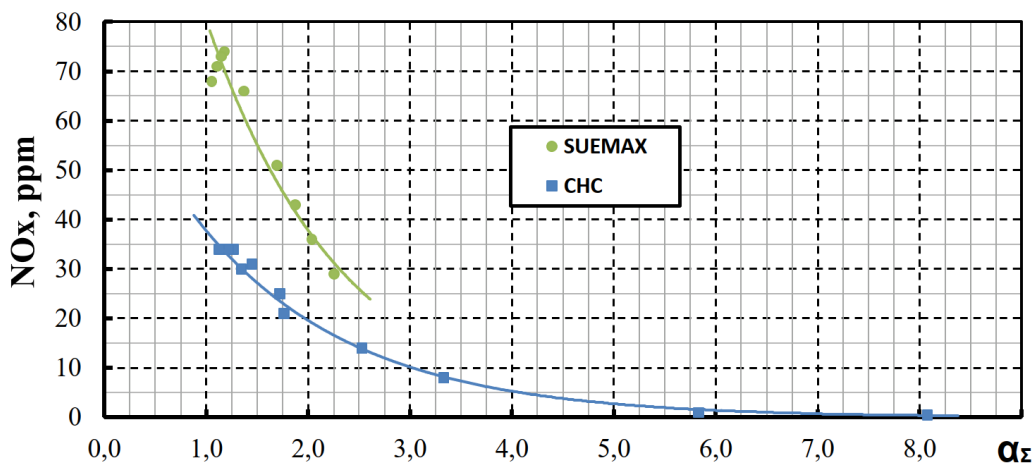


б)

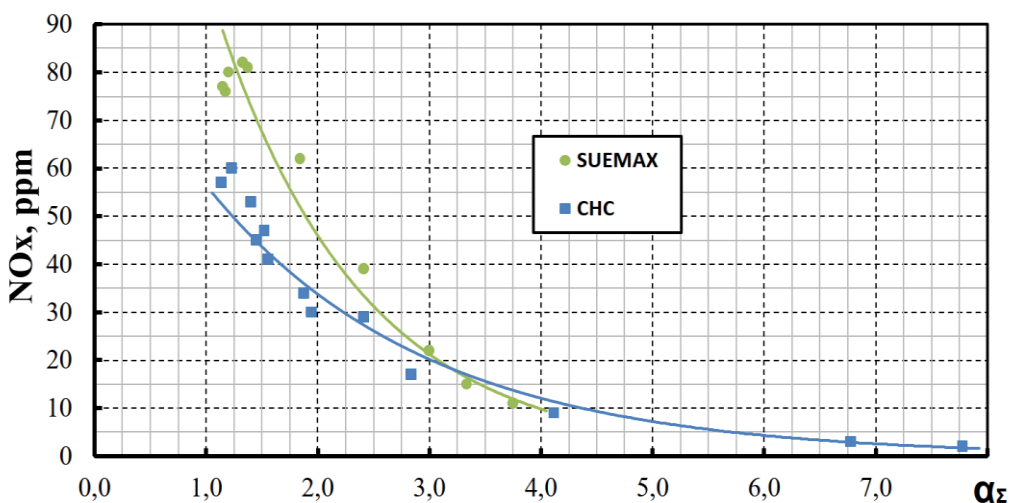
Рисунок 3.8 – Залежність концентрації CO від коефіцієнту надлишку повітря  $\alpha$ : а – при горінні природного газу ( $[\text{CH}_4] = 100\%$  об.); б – для метано-водневої суміші ( $[\text{H}_2] / [\text{CH}_4] = 50\% / 50\%$ ).

Теплова потужність 20 кВт.

Експериментально отримані залежності концентрації оксидів азоту для досліджуваних паликових конструкцій представлені на рис. 5. У випадку спалювання природного газу ( $[\text{CH}_4] = 100\%$  об.) концентрація шкідливих оксидів у продуктах згоряння для палика SUEMAX виявилася удвічі вищою порівняно з відповідними показниками для СНС в усьому діапазоні досліджень (рис. 3.9, а).



а)



б)

Рисунок 3.9 – Залежність концентрації  $\text{NO}_x$  від коефіцієнту надлишку повітря  $\alpha$ : а – при горінні природного газу ( $[\text{CH}_4] = 100\%$  об.); б – для метано-водневої суміші ( $[\text{H}_2] / [\text{CH}_4] = 50\% / 50\%$ ).

Теплова потужність 20 кВт.

Додавання водню ( $[\text{H}_2] / [\text{CH}_4] = 50\% / 50\%$ ) призводить до зростання емісії оксидів азоту: для пального SUEMAX – орієнтовно на 10 %, а для CHC – більш ніж у півтора рази (у робочій області надлишку повітря  $\alpha \rightarrow 1,0$ ). При горінні збідненої суміші природного газу з воднем різниця між конструкціями стабілізаторів фактично зникає у зоні  $\alpha > 3,0$  (рис. 3.9, б).

Результати вимірювання температури вздовж осі вогнетривкої ділянки для досліджуваних пристроїв наведені на рис. 6. Отримані характеристики демонструють суттєвий вплив конструкції стабілізатора: зокрема, довжина факела у пальнику SUEMAX в обраному робочому режимі виявилася на 20 % коротшою порівняно з СНС.

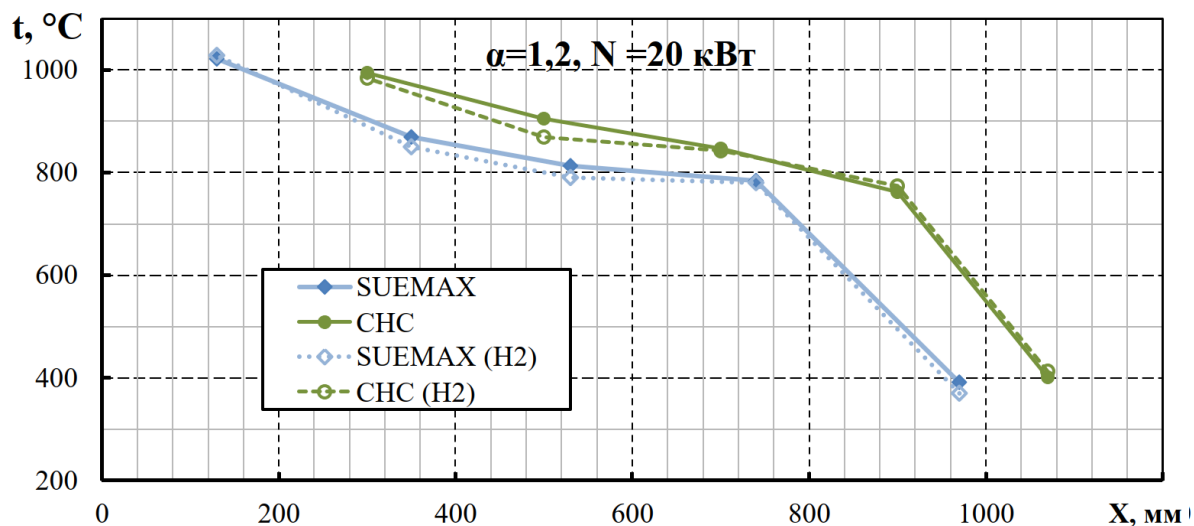


Рисунок 3.10 – Температура по осі факела в залежності від конструкції стабілізатору та типу палива для режиму  $\alpha=1,2$  при тепловій потужності 20 кВт

Додавання водню не чинить значного впливу на ці характеристики. Інтенсифікація робочого процесу переважно проявляється на початковій ділянці факела, де в цьому дослідженні температурні вимірювання не проводилися через конструктивні особливості футерованої робочої зони. Окремі експерименти з відкритим факелом засвідчили підвищення температури на початковій ділянці, що пов'язано з трансформацією процесу горіння за наявності водню в паливній суміші. Зокрема, для газу з 50% домішкою водню зафіксовано підвищення температури на 100...120  $^{\circ}\text{C}$ .

### 3.4 Порівняння температурних характеристик роботи пальникових пристроїв при спалюванні метано-водневих сумішей і природного газу

На рисунку 3.11 показано зміну температурних характеристик факелу пальника SUEMAX. Експериментальними дослідженнями встановлено, що при спалюванні метановодневої суміші  $[\text{CH}_4] / [\text{H}_2] = 50 / 50$ , % об. температура на осі факела знаходиться в діапазоні  $1000 \dots 1150$  °C, та на  $\sim 100$  °C перевищує температуру на осі факела у випадку спалювання природного газу. Температура на периферії факелу становить  $\sim 970$  °C  $\dots 1030$  °C для метановодневої суміші  $[\text{CH}_4] / [\text{H}_2] = 50 / 50$ , % об та відповідно  $870$  °C  $\dots 920$  °C для природного газу. Дослідження проводилися при сталій тепловій потужності пальника  $\sim 10$  кВт та коефіцієнті надлишку повітря  $\alpha = 1,05$ .

Загальний вид факелу пальника SUEMAX при спалюванні метановодневої суміші  $[\text{CH}_4] / [\text{H}_2] = 50 / 50$ , % об. та метану показано на рисунку 3.12.

Аналіз отриманих результатів з визначення температурних характеристик полум'я узгоджується з отриманими теоретичними результатами про збільшення температури горіння метановодневих сумішей зі збільшенням долі водню у паливі.

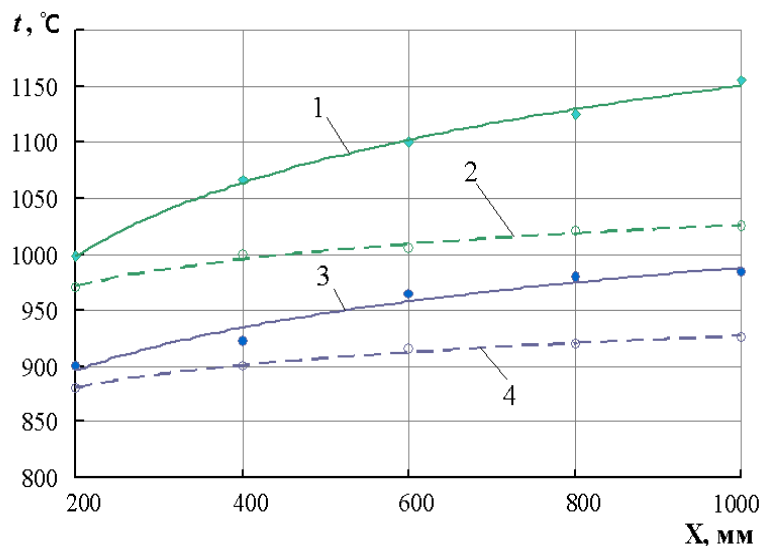


Рисунок 3.11 – Зміна температури вздовж осі факела пальника SUEMAX на осі факела (криві 1, 3) та на периферії (криві 2, 4) :  
 криві 1, 2 – для метановодневої суміші  $[\text{CH}_4] / [\text{H}_2] = 50 / 50$ , % об.;  
 криві 3, 4 – для природного газу.



а)



б)

Рисунок 3.12 – Загальний вигляд газового факела пальника SUEMAX: а – для природного газу;  
 б – для метановодневої суміші  $[\text{CH}_4] / [\text{H}_2] = 50 / 50$ , % об.



### 3.5 Висновки до розділу 3

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.

На основі аналізу результатів експериментів визначено, що при спалюванні метано-водневої суміші зменшуються викиди CO та збільшуються температури викидних газів і емісія  $\text{NO}_x$ .

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

Визначені температури продуктів згоряння на осі та периферії факелу. Показано збільшення температури факелу  $\sim 100^\circ\text{C}$  для метановодневих сумішей в порівнянні з випадком спалювання природного газу.

Експериментальні результати досліджень демонструють суттєвий вплив не тільки наявності високореакційної домішки водню в складі паливного газу на енергоекологічні показники роботи паливоспалюючого обладнання, але і значний вплив конструктивних особливостей пальникових пристроїв.

## РОЗДІЛ 4. CFD МОДЕЛЮВАННЯ СПАЛЮВАННЯ МЕТАНО-ВОДНЕВИХ СУМІШЕЙ У КОТЕЛЬНИХ УСТАНОВКАХ

### 4.1 Розробка розрахункової чисельної моделі котельної установки

Основною метою даного дослідження є визначення впливу процентного вмісту водню в паливній суміші з метаном на утворення оксидів азоту ( $\text{NO}_x$ ) в пальниках водогрійного котла типу ДКВР-10-13 та порівняння отриманих результатів з експериментальними даними.

Також в роботі ставилась задача визначити середні характеристики теплообміну в топковій камері згаданого котельного агрегату за допомогою відомого пакету програм CFD-моделювання ANSYS-Fluent, що дозволяє після попередньої верифікації з експериментальними даними взятими з робіт інших авторів, розширити діапазони режимних параметрів, що можуть впливати на роботу котельного агрегату в цілому.

Дослідження виконувалось шляхом моделювання конвективного та радіаційного теплообміну для багатокомпонентних сумішей у середовищі програмного комплексу ANSYS-Fluent. Першим кроком створення CFD-моделі є розробка геометричної моделі. Геометрична модель водогрійного котла типу ДКВР-10-13, побудована згідно креслеників, опублікованих на сайті [7] без урахування топкових екранів представлена на рис. 4.1.

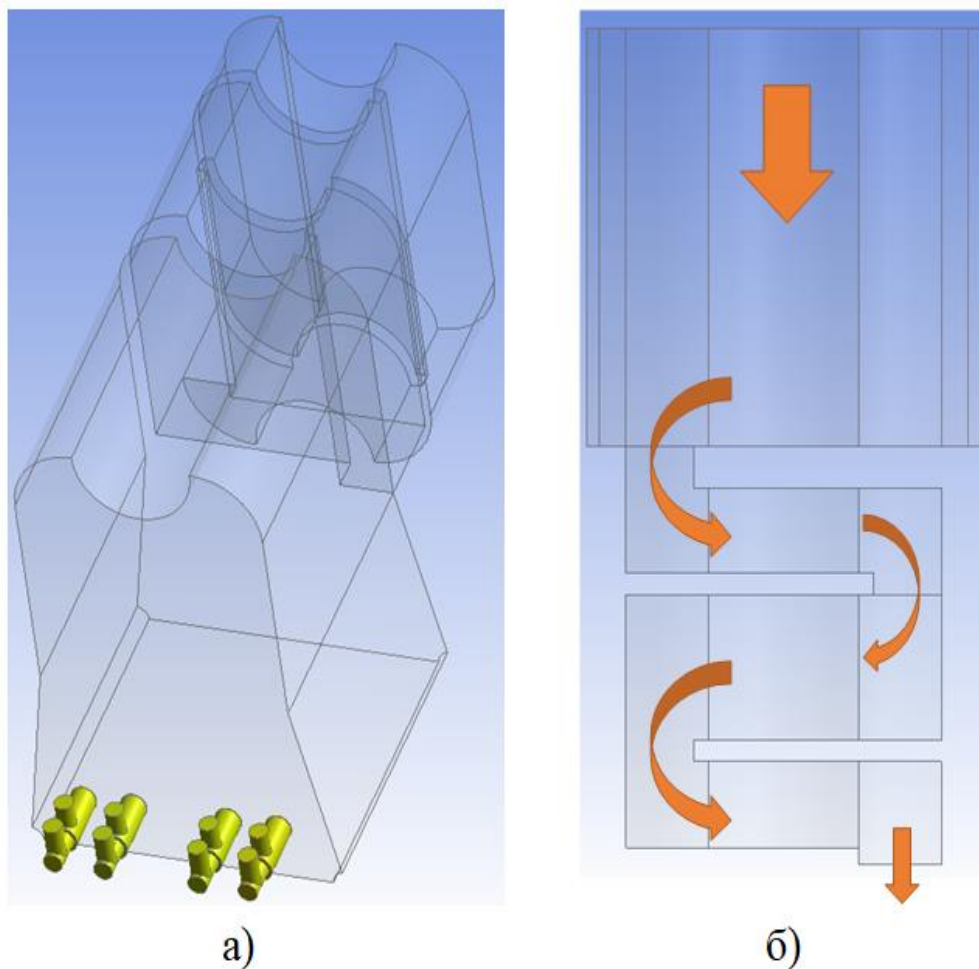


Рисунок 4.1 – Вид розрахункової області в ізометрії (а) та вид в плані (б) де показано напрям руху димових газів

Модель містить чотири штатних осьових пальника, для побудови геометричної моделі яких використані дані з відкритих джерел [39]. Згідно прийнятої геометричної моделі, подача первинного повітря в пальник здійснюється крізь бічний патрубок ДУ 159 мм (рис. 4.1, а), яке в пальнику реагує з паливною сумішшю, яка також подається в пальник через бічний патрубок того ж діаметру. Газорозподіл паливної суміші організовано круглими струменями, що подаються у потік окислювача перпендикулярною системою струменів (рис. 4.1, б).

Для моделювання виконана дискретизація досліджуваної геометрії за допомогою розрахункових сіток, що побудована з



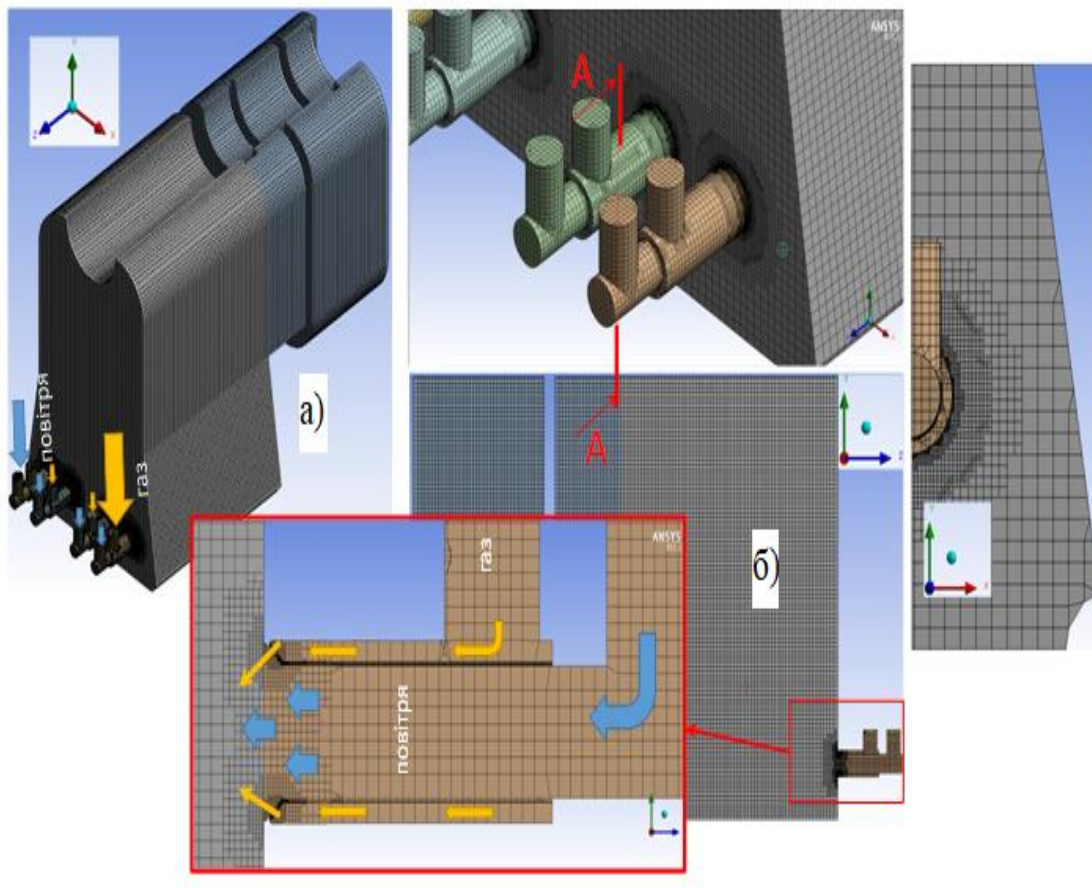


Рисунок 4.3 – Вид загальний скінченно-елементної сітки (а) та деталізація зображення «згущення» скінчених елементів поблизу моделі пальника (б)

CFD-модель базується на чисельному рішенні усереднених по Рейнольдсу рівнянь Нав'є-Стокса, замкнутих за допомогою моделі турбулентності на основі концепції вихорової в'язкості типу  $k-\epsilon$  realizable [40]. це найкраща модель, з RANS-моделей, яка може розрахувати взаємодію між потоками. Ця модель отримана з рівняння переносу середньої завихорюваності, що в забезпечує більш обґрунтоване з гідродинамічної точки зору формулювання рівняння переносу швидкості дисипації, чим пояснюється використання в роботі цієї моделі. Крім того до переваг використання цієї моделі слід віднести той факт, що при використанні цієї моделі неможливо отримати негативні значення  $\overline{u_j'^2}$  при значних деформаціях поля

середньої швидкості. Автори [41] рекомендують використання даної моделі для течій з великою кривизною ліній току і закручуванням течії. Закручування потоку в даній задачі може відбуватись внаслідок гідродинамічної взаємодії між «факелом» полум'я з пальника і висхідним нагрітим потоком, що рухається в об'ємі топки котла.

Керуючі рівняння математичної моделі турбулентної течії, що має місце в цій задачі, і рівняння стандартної моделі турбулентності приведені в [42] і в інших підручниках з чисельних методів в гідродинаміці.

В налаштуванні гідродинамічної частини задачі окрім зазначеного, використано Enhance Wall Treatment для того, щоб врахувати пристінні функції і відповідно опції Viscous Heating, Correction і Full Buoyancy Effect (так звані ефекти плавучості).

Для моделювання багатокомпонентних сумішей використано модель Species Transport. Завдання різного процентного вмісту водню в паливній суміші з метаном  $[H_2] = 0...50 \%$  (до об'єму паливо-повітряної суміші) здійснено за допомогою відповідних налаштувань Mixture Species (рис. 4.3), де використовувались стехіометричні коефіцієнти з рівнянь взаємодії окислювач-паливо.

Reactions  $\text{CH}_4 + 2\text{O}_2 \rightarrow \text{CO}_2 + 2\text{H}_2\text{O}$

Mixture: methane-air Total Number of Reactions: 1

Reaction Name: reaction-1 ID: 1 Reaction Type: ☒ Volumetric ☐ Wall Surface ☐ Particle Surface ☐ Electrochemical

Number of Reactants: 2 Number of Products: 2

Species	Stoich. Coefficient	Rate Exponent
ch4	1	1
o2	2	1

Species	Stoich. Coefficient	Rate Exponent
co2	1	0
h2o	2	0

а)

Reactions  $0.9\text{CH}_4 + 0.1\text{H}_2 + 1.85\text{O}_2 \rightarrow 0.9\text{CO}_2 + 1.9\text{H}_2\text{O}$

Mixture: mixture-template Total Number of Reactions: 1

Reaction Name: reaction-1 ID: 1 Reaction Type: ☒ Volumetric ☐ Wall Surface ☐ Particle Surface ☐ Electrochemical

Number of Reactants: 3 Number of Products: 2

Species	Stoich. Coefficient	Rate Exponent
ch4	0.9	1
h2	0.1	1
o2	1.85	1

Species	Stoich. Coefficient	Rate Exponent
co2	0.9	0
h2o	1.9	0

б)

Рисунок 4.3 – Стехіометричні коефіцієнти у випадку спалювання метану (а) і спалювання метану з 10%-ю добавкою водню (б)

Теплофізичні властивості матеріалів в меню Create/Edit Material вибирались з врахуванням Kinetic Theory, тобто відповідно до молекулярно-кінетичної теорії.

В якості граничних умов на вході в пальник задавались у вигляді масової витрати і температури (Mass flow inlet). причому у вкладці Species записувались фракції, що відповідають стехіометричним коефіцієнтам реакції. При формуванні граничних умов врахована незмінність кількості теплоти, що вноситься в топку сумішшю.

Що ж до граничної умови на виході з котла (outlet) згідно методики розрахунку багатокомпонентних сумішей засобами ANSYS-Fluent слід використовувати лише умову outflow. Ця умова показує яка частка витрат виходить через дану межу. Інші види доступних в ANSYS-Fluent граничних умов, наприклад, Pressure outlet, мають графу Species у якій потрібно записати масові або мольні долі реагуючих компонентів. А саме їх потрібно визначити за допомогою моделі, тому доступний один вибір – гранична умова outflow.

В якості гідродинамічних граничних умов на зовнішніх поверхнях котельного агрегату задавалося умова «прилипання» молекули газу до непроникної стінки (тобто рівності нулю всіх компонентів вектору швидкості). А в якості теплових – граничні умови третього роду, коли зовнішня поверхня котельного агрегату взаємодіє з навколишнім середовищем.

Оскільки моделюється задача взаємодії багатокомпонентних сумішей то в налаштуваннях метода рішення ANSYS-Fluent так зване поєднання тиску зі швидкістю визначено за допомогою процедури Couple. При цьому з врахуванням досить великої кількості завихрень необхідно використовувати умову Pseudo Transient, що забезпечить сталу збіжність нев'язок.

При моделюванні використовувалась стандартна методика прогнозування утворення  $\text{NO}_x$  засобами цього програмного комплексу. Засобами ANSYS-Fluent, розраховане утворення як теплових, так і швидких  $\text{NO}_x$ . Модель враховує турбулентному-хімічну взаємодію дозволяє обчислювати освіту  $\text{NO}_x$  з урахуванням впливу турбулентних пульсацій на осереднені за часом швидкості реакції. Для прогнозування концентрації радикала O, необхідної для прогнозування теплового  $\text{NO}_x$  використовується модель часткової рівноваги.



## 4.2 Аналіз результатів чисельного моделювання

Аналіз розподілів температур, що приведені на рис. 4.4 свідчить, що максимальні значення температури які сягають  $1500\text{ }^{\circ}\text{C}$  спостерігається саме в місці взаємодії струменів газороздачі і основного повітряного потоку. Це твердження справедливе також для всіх випадків вибраного для розрахунків процентного співвідношення вмісту водню до об'єму паливо-повітряної суміші. Проте слід зазначити, що при заміщенні метану воднем спостерігається збільшення температури в області, що межує з пальниками (рис. 4.5).

Аналіз отриманих результатів свідчить про те, що розподіл температур димових газів в середині котельного агрегату і траєкторії руху потоку в області розташування пальника для всіх досліджених випадків процентного співвідношення вмісту водню до об'єму паливо-повітряної суміші є схожим. Приклад отриманих при розрахунках полів температур та швидкостей в топковій камері котла для випадку заміщення  $[\text{H}_2] = 10\text{ }\%$  (до об'єму паливо-повітряної суміші) представлено на рис. 4.4.

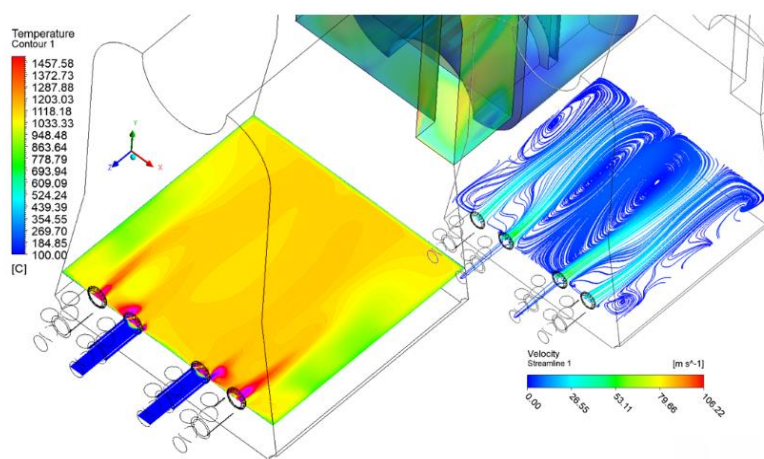


Рисунок 4.4 – Розподіл температур і швидкостей потоків продуктів згоряння в топковій камері котла ДКВР-10-13 у випадку спалювання метану  $[\text{CH}_4] = 100\text{ }\%$  об.

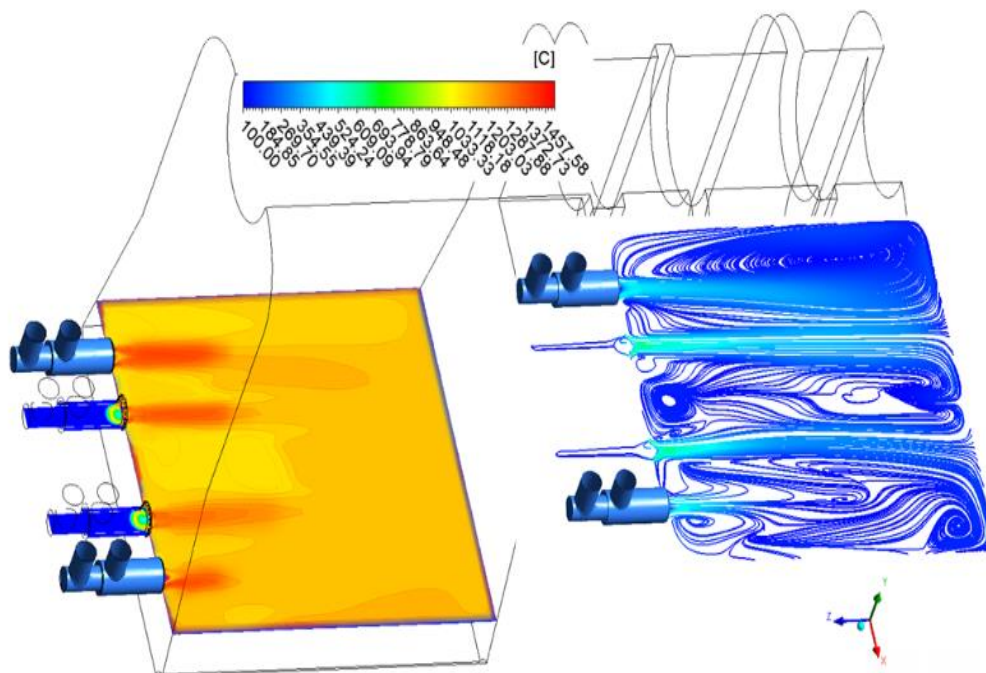


Рисунок 4.5 – Розподіл температур і швидкостей потоків продуктів згоряння в топковій камері котла ДКВР-10-13 у випадку спалювання метановодневої суміші  $[\text{CH}_4] / [\text{H}_2] = 50 / 50$ , % об.

На рис. 4.6 приведено залежність середньоінтегральної температури в топці водогрійного котла від вмісту  $\text{H}_2$  в паливно-повітряній суміші. Ця залежність свідчить, що значення середньоінтегральної температури димових газів в об'ємі топки котла поступово збільшується від  $1000\text{ }^\circ\text{C}$  у випадку використання метану, до  $1500\text{ }^\circ\text{C}$  у випадку заміщення  $[\text{H}_2] = 50\%$ . Отримані результати добре верифікуються з результатами експериментальних досліджень.

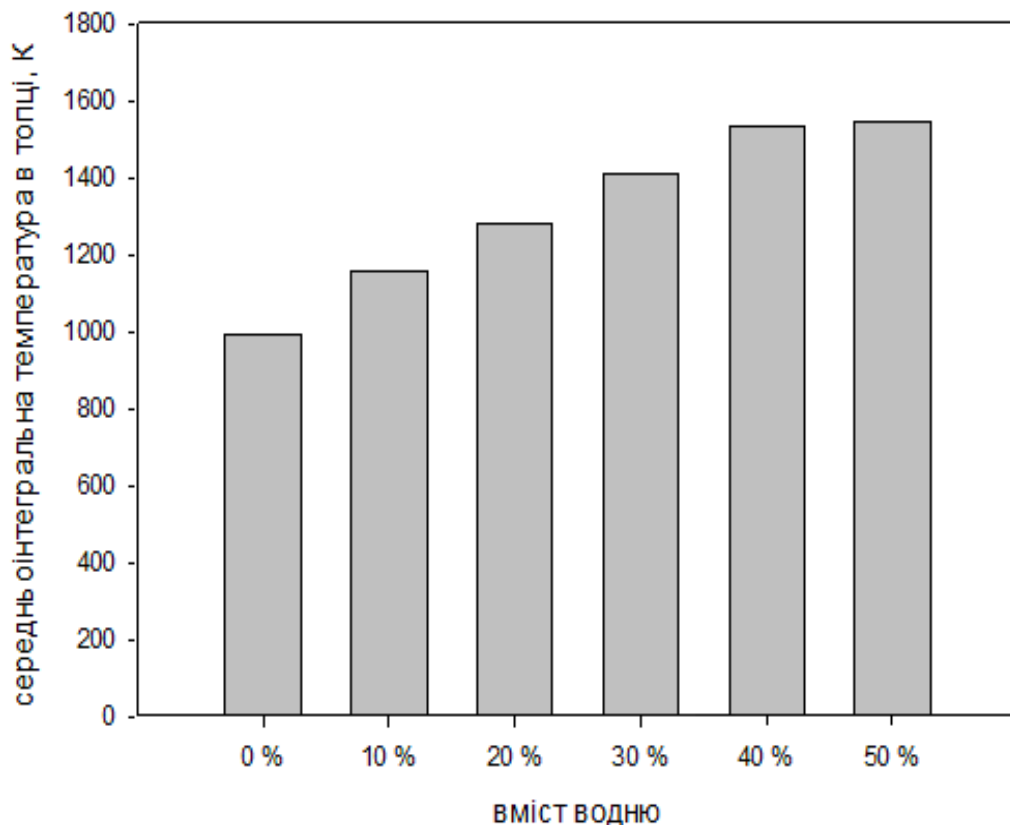


Рисунок 4.6 – Залежність середньоінтегральної температури в топці водогрійного котла від вмісту  $H_2$  в паливно-повітряній суміші.

З метою порівняння результатів моделювання з відомими даними викидів оксидів азоту була проведена відповідна валідація CFD-моделі з даними режимної карти котла типу ДКВЕР-10-13. За даними режимної карти котла ДКВР 10-13 при роботі на номінальній потужності рівень утворення  $NO_x$  складає  $\sim 190 \dots 200 \text{ мг/м}^3$  (дані надано співробітником Інституту газу НАН України Горбуновим О.В.), що відповідає  $\sim 95 \dots 100 \text{ ppm}$ . Даний рівень оксидів азоту добре співвідноситься з результатами CFD-моделювання, який для чистого метану склав 105 ppm.

Приклад результатів моделювання утворення  $NO_x$  в топці котельного агрегату представлено в вигляді кількості частин на мільйон (промиле) –  $NO_x \text{ [ppm]}$  для випадку заміщення  $[H_2] = 10 \%$  (до об'єму паливо-повітряної суміші) представлено на рис. 4.7.

Аналіз даних рис. 4.7 свідчить про те, що окиси азоту, які утворені в об'ємі топкової камери котельного агрегату під дією струменя нагрітих газів рухаються крізь конвективні поверхні нагрівання котла типу ДКВР і нікуди не зникають. Якісно, картина утворення оксидів азоту для всіх досліджених за допомогою CFD-моделювання випадків заміщення метану воднем не змінна, але у кількісному значенні, збільшення значення заміщення  $[H_2]$  до об'єму паливо-повітряної суміші призводить до збільшення емісії окислів азоту.

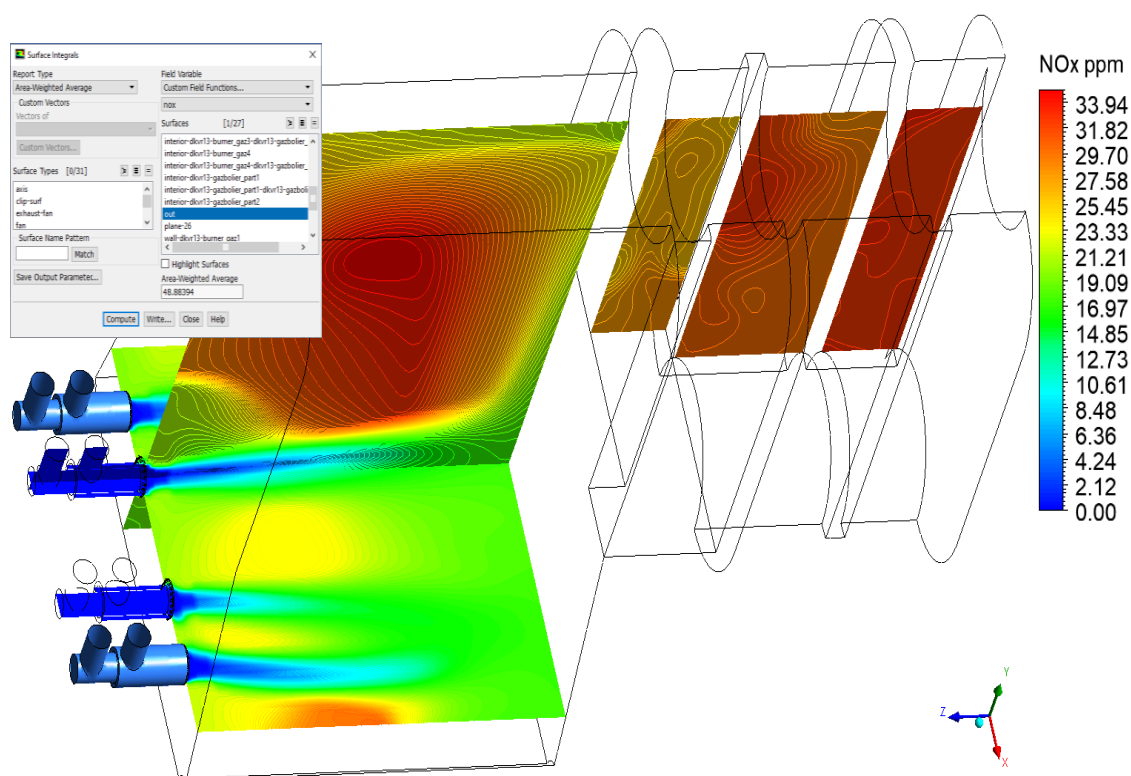


Рисунок 4.7 – Розподіл утворення оксидів азоту в топковій камері котла ДКВР-10-13 у випадку спалювання метану з 10% добавкою  $H_2$ .

Так, на рис. 4.8 приведені дані щодо утворення  $NO_x$  при різному процентному вмісту водню в паливній суміші з метаном  $[H_2] = 0...50\%$  (до об'єму паливо-повітряної суміші).

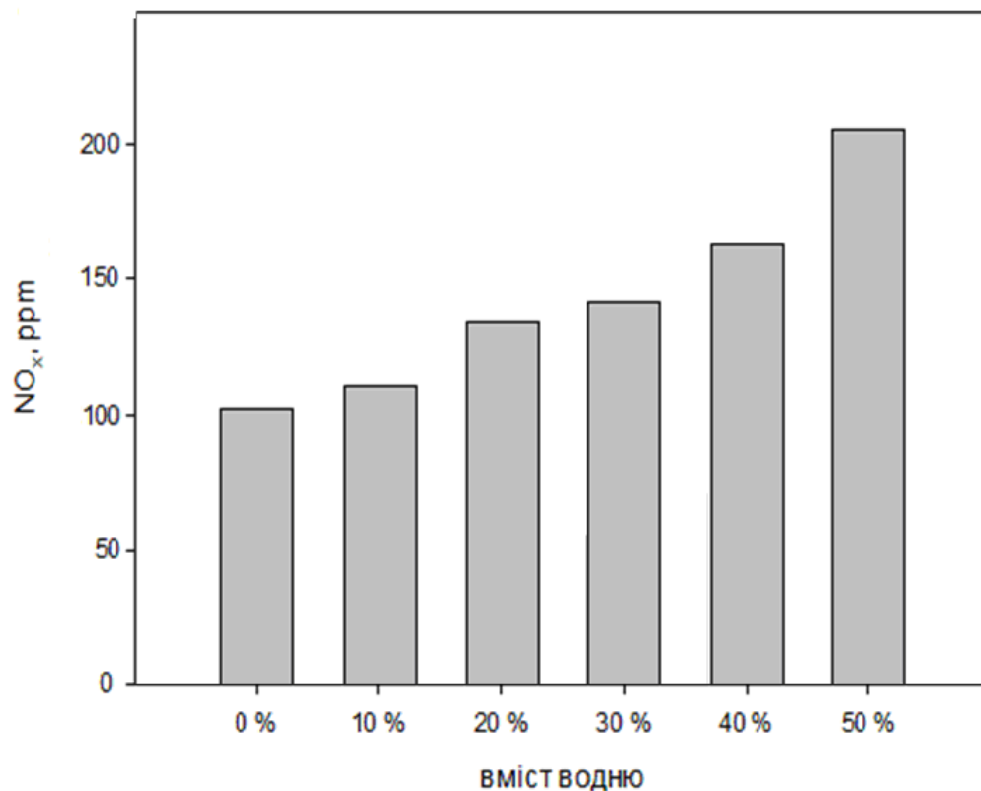


Рисунок 4.8 – Емісія оксидів азоту ( $\text{NO}_x$ , ppm) на виході з топкової камери водогрійного котла типу ДКВЕР-10-13 в залежності від процентного вмісту водню в паливній суміші з метаном.

Аналіз приведених даних свідчить, що при заміщенні метану воднем до  $[\text{H}_2] = 50\%$  рівень утворення  $\text{NO}_x$  зростає в 2 рази до  $\sim 200$  ppm. Отриманий характер зменшення емісії оксидів азоту при заміщенні воднем метану у паливі відповідає характеру результатів авторських експериментальних досліджень.

### 4.3 Висновки розділу 4

На основі аналізу результатів CFD-моделювання процесів спалювання газоподібного палива в топці парового водотрубного котла ДКВР 10-13 за допомогою математичної моделі з використанням пакета прикладних програм ANSYS-Fluent визначено, що:

- використання відповідних розрахункових процедур є набагато простішим та дешевшим заходом порівняно з прямими фізичними експериментами та вимірюваннями;
- значення середньоінтегральної температури димових газів в об'ємі топки котла поступово знижуються від 1000 °C, у випадку використання метану, до 1500 °C, у випадку заміщення  $[H_2] = 50 \%$ .
- заміщення  $[H_2] = 0...50 \%$  (до об'єму паливо-повітряної суміші) дозволяє майже в 4 рази зменшити генерацію окислів азоту в димових газах на виході з котельного агрегату.
- за даними режимної карти котла ДКВР 10-13 при роботі на номінальній потужності рівень утворення  $NO_x$  складає  $\sim 190...200$  мг/м<sup>3</sup>, що відповідає  $\sim 95...100$  ppm. Даний рівень оксидів азоту добре співвідноситься з результатами CFD-моделювання, який для чистого метану склав 105 ppm, у випадку заміщення  $[H_2] = 50 \%$  рівень утворення  $NO_x$  зростає в 2 рази до  $\sim 200$  ppm..

Таким чином комп'ютерне моделювання дозволяє проводити попередню, досить точну оцінку емісійних характеристик спалювання газоподібних палив різного складу. Отримані дані численних розрахунків можуть бути використані при проектуванні енергетичного обладнання.

## ЗАГАЛЬНІ ВИСНОВКИ

1. Проведені в роботі дослідження є науковим підґрунтям використання водню, як перспективного газового палива при заміщенні природного газу в енергетиці та промисловості.

2. Проведені 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.

3. Вперше досліджені характеристики факелу при спалюванні метано-водневих сумішей в порівнянні з випадком спалювання природного газу. Визначені температури продуктів згоряння на осі та периферії її факелу. Показано збільшення температури факелу  $\sim 100$  °C для метановодневих сумішей в порівнянні з випадком спалювання природного газу.

4. На основі аналізу результатів експериментів визначено, що при спалюванні метано-водневої суміші зменшуються викиди CO та збільшуються температури викидних газів і емісія  $\text{NO}_x$ .

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

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

6. Показана адекватність верифікації розрахункових моделей до результатів власних експериментальних досліджень щодо емісійних та

вогнетехнічних характеристик роботи паливовикористовуючого обладнання.

7. Показано, що при заміщенні природного газу воднем очікуваний рівень емісії  $\text{CO}_2$  не відповідає внесеній долі водню в паливі, так для палива  $[\text{CH}_4] / [\text{H}_2] = 50 / 50 \%$ , об. відмічається скорочення викидів  $\text{CO}_2$  лише на 23,34 %, що не є суттєвим.



## СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Заходи зі зниження негативного екологічного впливу при проектуванні та експлуатації транспортного комплексу [Електронний ресурс] — Режим доступу: [https://pidru4niki.com/92979/ekologiya/sposobi\\_pidvischennya\\_ekologichn\\_oyi\\_bezpeki\\_transporti](https://pidru4niki.com/92979/ekologiya/sposobi_pidvischennya_ekologichn_oyi_bezpeki_transporti). 05.09.2022 р.
2. Huber, A. (2020). Impact of hydrogen and mixtures of hydrogen and natural gas on forced draught burners for gaseous fuels. Walter Dreizler GmbH, A 1434 EN, 11 p. URL: <https://www.dreizler.com/wp-content/uploads/2021/02/A-1434-EN-1.20-Impact-of-hydrogen-on-burners.pdf>.
3. Hiller, G., Bertoni, P., Jost, M., Irretier, O. (2021). Modular heat treatment using nitriding and low-pressure carburizing (part 3). Heat Processing, no. 1, pp. 33–38.
4. Wunning, J.G. (2021). Future heating of industrial furnaces. Heat Processing, no. 1, pp. 23–25; Heat Processing, no. 4, pp. 27–29.
5. Europe Turns to LNG to Avert Energy Crisis — October, 2022. pp. 16–18. Retrieved from: <https://www.powermag.com>
6. Muron, M., Pawelec, G., Fraile, D. (2024). *Clean Hydrogen Production Pathways: Report 2024*. Hydrogen Europe. [https://hydrogeneurope.eu/wp-content/uploads/2024/06/2024\\_H2E\\_CleanH2ProductionPathwaysReport.pdf](https://hydrogeneurope.eu/wp-content/uploads/2024/06/2024_H2E_CleanH2ProductionPathwaysReport.pdf)
7. Soroka B., Pyanykh K., & Zgurskyi V. (2022). Mixed Fuel for Household Gas-Powered Appliances as an Option to Replace Natural Gas with Hydrogen. Science and Innovation, 18(3), 10–22. <https://doi.org/10.15407/scine18.03.010>.

8. Сірий О., Кобилянська О. CFD-моделювання процесу спалювання суміші метан-водень в струменево-нішевому стабілізаторі полум'я // Вчені записки ТНУ імені В.І. Вернадського. Серія: Технічні науки. 2021. № 4. Том 33 (72). С.172–180 DOI <https://doi.org/10.32838/2663-5941/2022.4/26>
  
9. Yang H, Han YJ, Yu J, Kim S, Lee S, Kim G, Lee C. Exploring Future Promising Technologies in Hydrogen Fuel Cell Transportation. Sustainability. 2022; 14(2):917. <https://doi.org/10.3390/su14020917>.
  
10. Шльончак І. А., Павлов О. М.; Компанієць І. В. Аналіз ефективності використання водневмісного газу у двигунах внутрішнього згоряння / А.І. Міщенко, А.В. Білогуб, В.Д. Савицький. та ін. // Матеріали VI-ї міжнародної науково-практичної інтернет-конференції «Проблеми і перспективи розвитку автомобільного транспорту», 12-13 квітня 2018 року: збірник наукових праць / Міністерство освіти і науки України, Вінницький національний технічний університет [та інш.]. Вінниця: ВНТУ. 2018. 225 с.
  
11. Birner M. Gas Mixtures in Internal Combustion Engines – Usage, Problems and Solutions / Birner M., Wachtmeister G. // 8th International Symposium on High Temperature Air Combustion and Gasification. Poznan, Poland, July 5–7, 2010. – P. 113–120.
  
12. Green hydrogen: Energizing the path to net zero. Deloitte's 2023 global green hydrogen outlook. URL: <https://www2.deloitte.com/content/dam/Deloitte/at/Documents/presse/at-deloitte-wasserstoffstudie-2023.pdf>

13. Electricity consumption. International Energy Agency. URL: <https://www.iea.org/reports/electricity-information-overview/electricity-consumption>

14. China's first 20,000 ton green hydrogen plant inaugurated in Xinjiang. URL: <https://globalhydrogenhub.com/chinas-first-20000-ton-green-hydrogen-plant-inaugrated-in-xinjiang.html>

15. LHYFE розпочав будівництво заводу зеленого водню в Німеччині. Інститут відновлюваної енергетики НАН України. URL: <https://www.ive.org.ua/?p=5683&lang=uk>

16. The overseas expansion of China's electrolyser manufacturers. URL: <https://globalhydrogenhub.com/the-oversea-expansion-of-chinas-electrolyser-manufacturers.html>

17. Policy Database—Data & Statistics. International Energy Agency. URL: <https://www.iea.org/policies> (accessed 02 September, 2023).

18. Українська воднева стратегія. Асоціації «Українська Воднева Рада». URL: [https://rea.org.ua/wp-content/uploads/2020/11/ukrainian-hydrogen-strategy\\_ua\\_rieplin\\_181120.pdf](https://rea.org.ua/wp-content/uploads/2020/11/ukrainian-hydrogen-strategy_ua_rieplin_181120.pdf) (дата звернення: 5.09.23).

19. Gas package: Council and Parliament reach deal on future hydrogen and gas market. URL: <https://globalhydrogenhub.com/gas-package-council-and-parliament-reach-deal-on-future-hydrogen-and-gas-market.html>

20. Commission launches first European Hydrogen Bank auction with €800 million of subsidies for renewable hydrogen production. Press release. URL: [https://ec.europa.eu/commission/presscorner/detail/en/ip\\_23\\_5982](https://ec.europa.eu/commission/presscorner/detail/en/ip_23_5982)

21. International energy agency, Nuclear Power and Secure Energy Transitions, International Energy Agency, Paris (2022). <https://doi.org/10.1787/aca1d7ee-en>

22. International energy agency, World Power Energy Outlook 2023, International Energy Agency, Paris (2023). <https://doi.org/10.1787/827374a6-en>

23. Energy Transition Commission (2021). Making the Hydrogen Economy Possible: Accelerating Clean Hydrogen in an Electrified Economy. London: Energy Transition Commission

24. Nucleareurope. (2021). Nuclear hydrogen production a key low-carbon technology for a decarbonized Europe. Brussels: nucleareurope.

25. Аналітичний звіт Вплив ядерної галузі на розвиток України за 2020 рік. – ГО «Українське ядерне товариство», м. Київ. 2020 р. С. 57  
[https://ukrns.org/images/activity/2021/2021\\_10\\_29/Book\\_ZVIT\\_UYAT\\_29\\_10\\_2021.pdf](https://ukrns.org/images/activity/2021/2021_10_29/Book_ZVIT_UYAT_29_10_2021.pdf)

26. Водородная Энергетика. URL: <https://energy.hse.ru/hydrenergy> (дата звернення 01.09.2021)

27. Hering G. Mitsubishi wins orders for hydrogen-compatible turbines at three planned U.S. gas-fired projects. URL: [https://ieefa.org/mitsubishi-wins-orders-for-hydrogen-compatible-turbines-at-three-planned-u-s-gas-fired-projects/?utm\\_source=rss&utm\\_medium=rss&utm\\_campaign=mitsubishi-wins-orders-forhydrogen-compatible-turbines-at-three-planned-u-s-gas-fired-projects&utm\\_source=Weekly+IEEFA+Newsletter&utm\\_campaign=f3e6b8e2e5-IEEFA\\_WeeklyDigest&utm\\_medium=email&utm\\_term=0\\_30c2b8506bf3e6b8e2e5-128745689](https://ieefa.org/mitsubishi-wins-orders-for-hydrogen-compatible-turbines-at-three-planned-u-s-gas-fired-projects/?utm_source=rss&utm_medium=rss&utm_campaign=mitsubishi-wins-orders-forhydrogen-compatible-turbines-at-three-planned-u-s-gas-fired-projects&utm_source=Weekly+IEEFA+Newsletter&utm_campaign=f3e6b8e2e5-IEEFA_WeeklyDigest&utm_medium=email&utm_term=0_30c2b8506bf3e6b8e2e5-128745689) (дата звернення 03.09.2021)

28. Bellini E. Underground hydrogen storage in Canada. URL: <https://www.pv-magazine.com/2020/11/05/underground-hydrogen-storage-in-canada/> (дата звернення 08.09.2021).

29. Dierman R. EWE baut Kavernenspeicher für Wasserstoff. URL: <https://www.pv-magazine.de/2020/12/18/ewe-baut-kavernenspeicher-fuer-wasserstoff/> (дата звернення 05.09.2021).

30. Пилипенко Р. А., Сміян Б. С., Пікашов В. С., Цвєтков С. В., Мельников Р. В., Логвиненко Д. М. Взаємозаміщення природного газу та сумішей технологічних газів. Енерготехнології та ресурсозбереження. 2022. № 1. С. 24–32. <https://etars-journal.org/index.php/journal/article/view/305/247>

31. Mitu M., Razus D., Schroeder V. Laminar Burning Velocities of Hydrogen-Blended Methane–Air and Natural Gas–Air Mixtures, Calculated from the Early Stage of p(t) Records in a Spherical Vessel [mdpi-res.com](https://www.mdpi-res.com). <https://www.mdpi-res.com/energies-14-07556>; <https://www.mdpi.com/1996-1073/14/22/7556>

32. Троценко Л.М., Пікашов В.С. Досвід спалювання кокосового газу з 50-60% водню в складі у пальнику з підготовленою сумішшю газу з повітрям. Матеріали XVIII Міжнародної науково-практичної конференції «Теплова енергетика: шляхи реновації та розвитку», жовтень 2022 р. – 51 с.

33. Hassan, Q.; Azzawi, I.D.J.; Sameen, A.Z.; Salman, H.M. (2023). Hydrogen Fuel Cell Vehicles: Opportunities and Challenges. Sustainability, 15 (15), 11501. <https://doi.org/10.3390/su151511501>

34. Zhang, B., Xu N., Zhang, H., Qiu, R., Wei, X., Wang, Z., Liang, Y. (2024). Influence of hydrogen blending on the operation of natural gas pipeline network considering the compressor power optimization.

Applied Energy, Vol. 358, 122594.  
<https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2023.122594>.

35. Deymi-Dashtebayaz, M.; Ebrahimi-Moghadam, A.; Pishbin, S.I.; Pourramezan, M. (2019). Investigating the effect of hydrogen injection on natural gas thermo-physical properties with various compositions. *Energy*, 167, 235–245. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2018.10.186>

36. Рябцун, Р.С., Воробйов, М.В. (2024). Дослідження енерготехнологічних характеристик спалювання метано-водневих сумішей у промисловому газовому пальнику / *Збірник наукових праць Національного університету кораблебудування імені адмірала Макарова* № 3 (496), С. 59–63. DOI [https://doi.org/10.15589/znp2024.3\(496\).8](https://doi.org/10.15589/znp2024.3(496).8)

37. Pio G., Salzano E. (2018). Laminar Burning Velocity of Multi-Component Gaseous Mixtures. *Chemical engineering transactions*, vol. 67. P. 1–6. <https://doi.org/10.3303/CET1867001>

38. Gu, X.J., Haq, M.Z., Lawes, M., Woolley, R. (2000). Laminar burning velocity and Markstein lengths of methane-air mixtures. *Combustion and Flame*, Vol. 121, Issues 1–2. P. 41–58. [https://doi.org/10.1016/S0010-2180\(99\)00142-X](https://doi.org/10.1016/S0010-2180(99)00142-X)

39. Ilbas, M., Crayford, A. P., Yilmaz, I., Bowen, P. J., Syred, N. (2006). Laminar-burning velocities of hydrogen–air and hydrogen–methane–air mixtures: An experimental study. *International Journal of Hydrogen Energy*, Vol. 31, Issue 12. P. 1768–1779. <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2005.12.007>

40. Allan M.M. Leal, William R. Smith. (2022). Inverse chemical equilibrium problems: General formulation and algorithm. *Chemical Engineering Science*, Volume 252, 117162, <https://doi.org/10.1016/j.ces.2021.117162>.

41. Тимошевський, М.Р. Ткач, Д.О. Шалапко Вплив на робочі характеристики ДВЗ домішок водню на основі рідкого палива / Тези доповідей: Міжнародна науково-технічна конференція. Суднова енергетика: стан та проблеми. 2011. С. 75 – 79.

42. Shih T.-H., Liou W. W., Shabbir A., Yang Z., Zhu J. A New  $k-\epsilon$  EddyViscosity Model for High Reynolds Number Turbulent Flows – Model Development and Validation. Computers and Fluids. 1995. Vol. 24, No 3. P. 227–238.

## ДОДАТОК А

### Список публікацій здобувача за темою дисертації

#### Статті з представленими науковими результатами дисертації:

1. Воробйов М.В., Баранюк О.В. Рябцун Р.С. Визначення енергетичних та екологічних характеристик роботи котла ДКВР-10-13 при додаванні водню до природного газу методом математичного моделювання. Вчені записки Таврійського національного університету імені В. І. Вернадського. Серія: Технічні науки. 2022. Том 33 (72), № 5, С. 183-192. DOI <https://doi.org/10.32782/2663-5941/2022.5/27>

2. Воробйов М.В., Баранюк О.В. Рябцун Р.С. Моделювання екологічних характеристик роботи котла ДКВР-10-13 при використанні метано-водневої суміші як паливного газу. Вчені записки Таврійського національного університету імені В. І. Вернадського. Серія: Технічні науки. 2023. Том 34 (73), № 1. С. 155-161. DOI <https://doi.org/10.32782/2663-5941/2023.1/23>

3. Рябцун Р.С., Воробйов М.В. Дослідження енерготехнологічних характеристик спалювання метано-водневих сумішей у промисловому газовому пальнику / Збірника наукових праць Національного університету кораблебудування імені адмірала Макарова № 3 (496) 2024, С. 59 – 63. DOI [https://doi.org/10.15589/znp2024.3\(496\).8](https://doi.org/10.15589/znp2024.3(496).8)

4. Рябцун Р.С., Воробйов М.В. Оцінка основних вогнетехнічних та екологічних властивостей спалювання метано-водневих сумішей / Збірника наукових праць Національного університету кораблебудування імені адмірала Макарова № 4 2024, С. 39–43. DOI [https://doi.org/10.15589/znp2024.4\(497\).6](https://doi.org/10.15589/znp2024.4(497).6)



**Праці з представленими матеріалами апробації дисертації:**

5. Рябцун Р.С., Воробйов М.В. Можливості використання спалювання суміші природного газу і водню в енергетиці України XVIII міжнародна науково-практична конференція молодих вчених та студентів «Сучасні проблеми наукового забезпечення енергетики», Київ, 23 – 26 квітня 2020 р. – с.

6. Рябцун Р.С., Воробйов М.В. Енерготехнологічні особливості використання водневих технологій в промисловості і комунально-побутовому секторі. XIX міжнародна науково-практична конференція молодих вчених та студентів «Сучасні проблеми наукового забезпечення енергетики», Київ, 20-23 квітня 2021 р. – с. 166-168.

7. Рябцун Р.С., Воробйов М.В. CFD-моделювання екологічних характеристик роботи котла ДКВР-10-13 при додаванні водню до природного газу. Матеріали XVIII Міжнародної науково-практичної конференції «Теплова енергетика: шляхи реновації та розвитку», жовтень 2022 р. – с. 38-43.

8. Воробйов М.В., Сірий О.А., Рябцун Р.С. Експериментальне спалювання метановодневої суміші у промисловому пальнику. Матеріали XVIII Міжнародної науково-практичної конференції «Теплова енергетика: шляхи реновації та розвитку», жовтень 2023 р. – с. 104-107.