

Національна академія наук України
Інститут технічної теплофізики

Кваліфікаційна наукова
праця на правах рукопису

Ніжник Наталія Андріївна

УДК 536.46

ДИСЕРТАЦІЯ

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

144- Теплоенергетика

Подається на здобуття науково ступеня доктора філософії в галузі знань
14 електрична інженерія

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



Н.А. Ніжник

Науковий керівник – Сігал Олександр Ісакович, кандидат технічних
наук.

АНОТАЦІЯ

Ніжник Н.А. ЗНИЖЕННЯ УТВОРЕННЯ ОКСИДІВ АЗОТУ ПРИ СПАЛЮВАННІ МЕТАНУ З ДОДАВАННЯМ ВОДНЕВИХ РОЗЧИНІВ. – Кваліфікаційна наукова праця на правах рукопису. Дисертація на здобуття наукового ступеня доктора філософії в галузі знань 14 електрична інженерія за 144 – Теплоенергетика. – Інститут технічної теплофізики НАН України, Київ, 2023.

Дисертаційна робота присвячена теоретичному й експериментальному дослідженню теплоенергетичних та екологічних характеристик процесу спалювання метано-водневих сумішей, а також розробленню способу спалювання таких сумішей з дотриманням нормативних вимог щодо утворення оксидів азоту, в тому числі на існуючому обладнанні. Спосіб заснований на виробництві синтетичного метану з водню, що може бути отриманий з надлишків електроенергії, яка виробляється з відновлюваних джерел енергії (ВДЕ) (у межах т.з. «водневого ХАБу» - місця, де наявні всі інгредієнти для виробництва, зберігання та використання водню; до його складу можуть входити наприклад установки отримання електроенергії з відновлюваних джерел, електролізер, метанізатор, абсорбер та котельна установка). Спосіб може бути застосований на об'єктах паливно-енергетичного комплексу України, з використанням діючих котельних агрегатів без зміни їх конструктивних елементів і перемаркування, дозволить використовувати надлишкову електричну енергію в добових графіках електрогенерації та уможливить подальше використання отриманого синтетичного метану, в тому числі і такого, що містить у своєму складі водень, на наявному котельному обладнанні.

Енергетичний перехід України на шляху до євроінтеграції, спрямований на декарбонізацію економіки шляхом підвищення енергоефективності та енергозбереження, стимулює в нашій державі стрімкий розвиток відновлюваних джерел енергії.

Наявна інформація за останні роки свідчить про стрімкий розвиток сонячної та вітрової енергетики, як одних із найперспективніших і таких, що динамічно розвиваються, відновлюваних джерел енергії. Щороку приріст потужності електрогенерації, яка вводиться в експлуатацію, становить приблизно 90-250% від значень попереднього року (за виключенням 2022 року, коли в Україні було введено воєнний стан). Згідно даних за не дуже показовий (через COVID-19) останній довоєнний 2021 рік, фактичний обсяг виробництва електричної енергії за 2021 рік електростанціями України у цілому склав 156 601 млн кВт-год, з яких на ВДЕ припадає 8% або 12 527 млн кВт-год (що складає приріст у 15,3% в порівнянні з 2020 роком). З цих 8 % половину забезпечила біомаса, решту – сонце і вітер разом 4%. Тенденція збільшення частки ВДЕ спостерігається вже майже десятиліття.

При цьому вже зараз для України існує брак резервів балансових потужностей енергосистеми для підтримки її сталості. Одна з причин — великі (з точки зору потреб балансування) об'єми виробництва нерегульованої електроенергії від сонячної та вітрової генерації – профіцит у час незатребуваної потужності і відсутність достатньої кількості маневрових потужностей. Для сталого функціонування енергетичної системи співвідношення пікових до базових потужностей має становити 1:1. У 2021 році (прийнятий за базовий) в Україні це співвідношення становило 0,64:1. Тобто джерела, що генерують близько 38 млн кВт-год, потребують потужностей для регулювання. Тому широке впровадження ВДЕ для забезпечення стабільного енергопостачання потребує будівництва регулюючих (балансуючих) потужностей на основі традиційних енергосистем.

Галузь водневої енергетики також вже давно вважають перспективною з позицій використання відновлюваних джерел енергії, вона почала динамічно розвиватися ще в середині попереднього століття. Країни ЄС, США, Канада, Японія, Китай також вже понад 40 років цікавляться можливостями, які дає

водень (H_2). За даними Міжнародного енергетичного агентства (МЕА), на цей час існує вже багато напрямів використання водню. Основними галузями промисловості, що потребують значних об'ємів H_2 , є нафтопереробна, виробництво аміаку, метанолу. Також вже зараз пропонуються різні способи використання водню в енергетиці – світова практика показує позитивні результати при додаванні 5-25% водню до природного газу при його транспортуванні та спалюванні, водневі технології застосовуються для акумуляції та передачі «зеленої» енергії, тощо.

Реалізація стратегічного напрямку європейської ініціативи «Green Deal», безвуглецевого ринку та «зеленого водню» стимулює швидкий розвиток водневої енергетики у всьому світі, передбачає широке використання водню в першу чергу в якості інструменту проміжного накопичування на енергетичному ринку, і має на меті зменшення викидів вуглекислого газу енергетикою, промисловими об'єктами, транспортом.

Разом з цим існує ряд невирішених технічних задач, які пов'язані з процесом спалювання водню.

Проблематика використання водню в енергетичних цілях у спалювальних установках пов'язана з характеристиками його як палива, зокрема з необхідністю створення належних режимів його спалювання і необхідністю зміни конструктивних елементів традиційних пальників та топок.

Одним з найбільших проблемних питань є досягнення можливості використання водню у процесах спалювання на наявному котельному обладнанні. Вона обмежена наступними факторами:

- Висока адіабатна температура горіння водню – на 260° вища, ніж адіабатна температура горіння природного газу, що зумовлює підвищені вимоги до котельних матеріалів, а також інтенсифікацію утворення оксидів азоту в процесі горіння;

- Низька теплотворна здатність H_2 на одиницю об'єму – 2750 ккал/м³, що становить лише близько 30% від значень для природного газу;

- Не вирішені проблеми стабілізації факелу в змішувальних пальниках котлів (відрив полум'я воднево-повітряної суміші від пальника).
- Підвищене утворення оксидів азоту при спалюванні водневих сумішей в атмосферному повітрі в топках котлоагрегатів;
- Швидке зношення матеріалу пальника через властивість водню підвищувати крихкість металу;
- Необхідність організації відводу води з димової труби (захист від корозії).
- Відсутність водню як палива в Нормативному розрахунку котельних агрегатів, а отже неможливість легітимно застосовувати його як джерело енергії при спалюванні в традиційних котлоагрегатах.

В результаті проведеного аналізу літературних джерел зроблено висновок про необхідність вирішення задачі на оптимум: пошуку способів використання водневмісного палива на наявному котельному обладнанні при неперевищенні нормативів викидів оксидів азоту; це зумовлює потребу у вивченні можливостей та процесів запобігання збільшенню утворення оксидів азоту при спалюванні палива, що містить водень.

Згадана вище потреба балансування «зеленої» електроенергії в паливно-енергетичному комплексі України зумовлює потребу розроблення нових методів балансування, зокрема на вже існуючому обладнанні, одним з напрямків якого може бути використання водневої технології. Наявність та поширення доступних таких методів дозволить адаптувати енергетичну систему України до європейських енергетичних та екологічних стандартів, та вирішити локальні задачі підвищення енергоефективності та зниження карбонового сліду.

Зважаючи на це, актуальними слід вважати дослідження, спрямовані на вдосконалення і розвиток способів використання водню та водневих сумішей у спалювальних установках, і в першу чергу в опалювальних котлах.

В дисертаційній роботі запропонований спосіб використання водню, що отримується з електроенергії, згенерованої з використанням ВДЕ, яка є надлишковою в ОЕС. Цей спосіб може бути застосований на об'єктах паливно-енергетичного комплексу України, що дозволить:

- здійснювати балансування надлишкової електрогенерації;
- використовувати воденьвмісне паливо на наявному котельному обладнанні.

Запропонований спосіб використання водню шляхом утворення синтетичного метану сприятиме декарбонізації енергетики і може бути актуальним не лише для України, але з іншого боку, спалювання суміші синтетичного метану та водню (вміст першого може становити до 85%, а решта 15% - це вміст інших компонентів, що не прореагували, з яких вміст водню може бути близько 10-11%) не повинно приводити до перевищення допустимих рівнів викидів оксидів азоту. Тому вивчення закономірностей утворення оксидів азоту при спалюванні метану з добавками водню близько 10...11% потребує цілеспрямованих досліджень.

Вказане вище зумовлює високу актуальність дисертаційної роботи.

В дисертаційній роботі для вирішення задач, пов'язаних з дослідженням процесів спалювання сумішей з добавками водню до метану, визначенням їх теплоти згоряння, дослідженням утворення оксидів азоту був допрацьований експериментальний стенд, а також розроблена відповідна методика проведення експериментів.

Процес горіння в роботі розглядався як трикомпонентна реакція за участю водяної пари, що міститься в атмосферному повітрі, розпад води на складові запускає основні процеси ланцюгових реакцій, які притаманні горінню палива. Теоретичне вивчення процесів горіння включало кількісний аналіз енергії, яка витрачається на нагрів та випаровування води, що міститься в атмосферному повітрі, та оцінки її частки по відношенню до корисної енергії палива, яка залежить від вмісту водню в паливі та

коефіцієнту надлишку повітря. Визначено, що при вмісті вологи у повітрі $20\text{г}/\text{м}^3$ і коефіцієнті надлишку повітря 1,15, значення цієї частки енергії знаходиться в межах від 1,98% (природний газ) до 6,01 % (водень).

З метою виявлення впливу домішок водню, який подавався у вигляді водного розчину перекису водню, на процес утворення оксидів азоту і доокислення NO до NO_2 у процесах горіння, були проведені експериментальні дослідження. Розчин перекису водню різної концентрації (від 4% до 30%, що відповідало вмісту водню у водному розчині від 10,8% до 9,44%) вносився у вигляді краплі рідини у фронт полум'я ламінарного факелу метану.

Встановлено, що характер отриманих залежностей є аналогічним розподілу концентрації монооксиду азоту при введенні у фронт полум'я краплі дистильованої води. Інтенсивне зростання концентрації оксидів азоту спостерігається вже у початкових перерізах фронту полум'я з моменту початку розігрівання суміші ще до досягнення максимальної температури. При чому чим вища концентрація розчину H_2O_2 , що вноситься у фронт полум'я, тим інтенсивніше відбувається зростання вмісту оксидів азоту. При внесенні у фронт полум'я 30% розчину H_2O_2 (що відповідає вмісту H_2 в розчині 9,44 %) рівень концентрації NO практично досягає початкового, тобто одержаного без внесення краплинної вологи ($90\text{-}95\text{ мг}/\text{м}^3$), тоді як внесення у фронт полум'я H_2O (що відповідає вмісту H_2 в розчині 11,1 %) приводить до зниження концентрації NO до $65\text{ мг}/\text{м}^3$, тобто на 35-40 %. Це можливо пояснити тим, що H_2O_2 інтенсивніше ніж H_2O утворює радикал OH , що бере активну участь у окисленні вуглеводнів.

Таким чином, збільшення концентрації H_2O_2 до 30% у розчині (відповідно концентрації H_2 в розчині до мінімальної в експериментах - 9,44%) призводило до збільшення сумарного виходу монооксиду азоту на 35-45% для умов експерименту за рахунок інтенсивнішого утворення радикалів OH , HO_2^- і збільшення рівня температур за рахунок догорання CO .

Відокремлені вимірювання NO і NO_2 показали, що залежність частки NO_2 від вмісту H_2 у розчині, що вводиться у фронт полум'я, є неоднозначною і істотно залежить від місця відбору проби в перерізі фронту полум'я. Температура понад $800^\circ C$ істотно впливає на швидкості реакції і змінює кінетику процесів, що відбуваються за участі перекису водню, причому у різних перерізах фронту ці зміни різні за характером, що можна пояснити зменшенням часу існування H_2O_2 у полум'ї (20 мс і менше).

Найсприятливішими умовами доокислення NO в NO_2 є введення у факел розчину, в якому вміст водню становить 10,0 - 10,5 %, у температурному інтервалі $800 - 1000^\circ C$. Цим умовам відповідає не фронт полум'я, а заповум'яна область. Тому при збільшенні концентрації водню у метановодневій паливній суміші у топці котла буде відповідно зростати концентрація NO , частка NO_2 буде зменшуватися.

Інтенсивність доокислення NO в NO_2 має свій екстремум, який залежить від концентрації водню у розчині, що вводиться. Максимальне утворення NO_2 в наших експериментах спостерігалось для вмісту H_2 у розчині близько 9,4%.

Збільшення концентрації розчину H_2O_2 від нуля до 30% (і відповідно зменшення вмісту водню у розчині від 10,8% до 9,44 %) призводило до збільшення сумарного утворення оксидів азоту на 35-45% і збільшення рівня температур в тому числі за рахунок догорання CO .

Отримані результати дисертаційного дослідження можуть бути використані при створенні техніки та технологій, що входять до складу «Водневого ХАБу», та при розробленні котельного обладнання (топкових камер, пальників, екранів тощо), що працюватиме на новому виді палива, яке включає у свій склад водень.

Результати проведених експериментальних та розрахункових досліджень використано при розробленні нових схем теплопостачання міст Києва та Одеси на перспективу до 2030 року, для планування створення водневого ХАБу на Станції теплопостачання «СТ-1» в м. Києві та на РК

«Південна-1» у м. Одесі. Застосування заходів, запропонованих в роботі, а саме способу використання водню, отриманого від електролізу з використанням «зеленої» електроенергії, для формування синтетичної метано-водневої паливної суміші з подальшим її спалюванням в достатніх обсягах, дозволить зробити ці потужні теплогенератори вуглецево нейтральними.

За результатами роботи оформлено та подано заявку на патент на винахід а202106968 від 6.12.2021 р. (додаток А), що стосується способу утилізації надлишкової електричної енергії із застосуванням водневих технологій шляхом використання її для отримання водню, з подальшим утворенням синтетичного метану та спалюванням його в котлах.

Ключові слова: теплопостачання, енергоефективність, безкарбонова енергетика, котел, полум'я, паливо, водень, природний газ, відновлювальні джерела енергії, оксиди азоту, топкова камера, синтетичний метан.

СПИСОК ПУБЛІКАЦІЙ ЗДОБУВАЧА

Наукові праці, в яких опубліковано основні наукові результати дисертації:

1. I. Dubovkina, O. Sigal, V. Rikhte, N. Nizhnyk. (2022). Toxic substances formation in co-incineration process for food production. *Ukrainian Food Journal* Issue 4. P. 828-839. [DOI:10.24263/2304-974X-2021-10-4-15](https://doi.org/10.24263/2304-974X-2021-10-4-15) [іноземне видання; **ISI Web of Science Q1/Q2, Scopus**] (Особистий внесок здобувача: проведення огляду та аналізу літературних джерел, розробка та доповнення експериментального стенду, проведення експериментальних досліджень, обробка та аналіз експериментальних даних).

2. S. Pryiomov, V. Shybetskyi, S. Plashykhin, S. Kostyk, A. Safiants, K. Romanova, N. Nizhnyk. (2022). Increasing the energy efficiency of cyclone dust collectors. *International Journal of Energy for a Clean Environment*. Issue 1 (24). P. 81-96. [DOI: 10.1615/InterJEnerCleanEnv.2022043211](https://doi.org/10.1615/InterJEnerCleanEnv.2022043211). [іноземне видання; **ISI Scopus**] (Особистий внесок здобувача: проведення огляду та аналізу літературних джерел, обробка та аналіз експериментальних даних).

3. I. Tyshchenko, O. Sigal, N. Nizhnyk, A. Safiants. (2023). Prospects for the development of hydrogen energy. *AIP Conference Proceedings Journal*. V. 2684, Issue 1. P. 105-116. <https://doi.org/10.1063/5.0119924> [іноземне видання; **ISI Scopus**]. (Особистий внесок здобувача: проведення огляду та аналізу літературних джерел, узагальнення даних, оформлення висновків роботи).

4. Н.А. Ніжник, О.І. Сігал, С.В. Плашихін, А.С. Сафьянц. (2021). Проблематика використання водню в якості палива на підприємствах комунальної теплоенергетики України. *Monograph-USA-Technical research and development*. P. 474-480, Boston (USA) [DOI 10.46299/ISG.2021.MONO.TECH.I](https://doi.org/10.46299/ISG.2021.MONO.TECH.I), ISBN 978-1-63732-136-2, [іноземне

видання; **Колективна монографія США**] (Особистий внесок: участь у експериментальних дослідженнях, аналіз особливостей застосування водню в якості палива на наявних котельних агрегатах, надання рекомендацій щодо впровадження водневих технологій в ПЕК України).

5. О.І. Сігал, Н.А. Ніжник. (2020). Перспективи використання водню у промислових процесах спалювання. *Теплофізика та теплоенергетика*. – Т.42– №3. – С.68–75. (doi.org/10.31472/ttpe.3.2020.8) [Вітчизняне фахове видання; **Категорія В**]. (Особистий внесок: участь у експериментальних дослідженнях, впливу розчинів, що містять водень на процес утворення оксидів азоту і доокислення NO в NO₂ у процесах горіння, зроблений порівняльний аналіз отриманих результатів).

6. О.І. Сігал, Д.Ю. Падерно, Н.А. Ніжник, С.В. Плашихін. (2021). Основні концептуальні підходи та технічні рішення схеми теплопостачання м. Києва на період до 2030 року. *Теплофізика та теплоенергетика*. – Т.43– №3. – С.36–43. (doi.org/10.31472/ttpe.3.2021.5) [Вітчизняне фахове видання; **Категорія В**]. (Особистий внесок: аналіз системи ЦТ міста Києва та її основних експлуатаційних показників, надання концептуальних напрямків щодо розвитку системи ЦТ міста Києва в частині поліпшення екологічної ситуації в місті, в т. ч. з використанням водню, отриманого шляхом електролізу води з електроенергією від «зеленої» енергетики).

7. N. Nizhnyk, A. Sigal, S. Plashykhin, A. Safiants. (2022). Influence of hydrogen on the toxic substances formation process during co-incineration with natural gas / *International Science Journal of Engineering & Agriculture* – 1(4). – С.19–26 ([doi: 10.46299/j.isjea.20220104.05](https://doi.org/10.46299/j.isjea.20220104.05)). [фахове іноземне видання]. (Особистий внесок: участь у експериментальних дослідженнях)

8. [І.М. Карп], Є.Є. Нікітін, Б.І. Басок, С.В. Дубовський, Г.Г. Гелетуша, О.І. Сігал, О.В. Дутка, І.С. Комков, М.В. Тарновський, О.Е. Силакін, М.Є. Бабін, Т.А. Железна, А.В. Пастух, Д.Ю. Падерно, С.В. Плашихін, Н.А. Ніжник. (2022) Стан та шляхи розвитку систем централізованого

теплопостачання в Україні. Книга 2 - *Наукова думка*. 176 стор. [Колективна монографія]. (Особистий внесок: основні концептуальні підходи та технічні рішення схем теплопостачання)

9. О.І. Сігал, І.О. Дубовкіна, Н.А. Ніжник. Заявка на патент а202106968 від 6/12/2021.

Наукові праці, які засвідчують апробацію матеріалів дисертації:
2020 р.

10. О.І. Сігал, Д.Ю. Падерно, Н.А. Ніжник. (2020). Аналіз тенденцій оцінки існуючих та перспективних потреб споживачів міста Києва у тепловій енергії. *Проблемы экологии и эксплуатации объектов энергетики. Материалы XXIX международной конференции* (г. Черноморск Одесской области, 10–14 июня 2019 г.), що викладені в *Збірнику праць / Інститут промислової екології*. –К.: ИПЦ АЛКОН НАН України, 2020. С.40-43.

11. С.В. Плашихін, Є.Й. Бикоріз, Н.А. Ніжник. (2020). Експериментальні дослідження процесів теплообміну і утворення оксидів азоту в залежності від параметрів роботи соплової секції модернізованого пальника. *Проблемы экологии и эксплуатации объектов энергетики. Материалы XXIX международной конференции* (г. Черноморск Одесской области, 10–14 июня 2019 г.), що викладені в *Збірнику праць / Інститут промислової екології*. –К.: ИПЦ АЛКОН НАН України, С.72-76.

12. О. В. Канигін, Є.Й. Бикоріз, І. В. Пузанов, Н. А. Ніжник. (2020) Особливості модернізації багатосоплового подового пальника. *Проблемы экологии и эксплуатации объектов энергетики. Материалы XXIX международной конференции* (г. Черноморск Одесской области, 10–14 июня 2019 г.), що викладені в *Збірнику праць / Інститут промислової екології*. –К.: ИПЦ АЛКОН НАН України, С.79-83.

13. О. І. Сігал, С. В. Плашихін, Є. Й. Бикоріз, Н. А. Ніжник. (2020). Зниження рівня викидів забруднюючих речовин при спалюванні твердого палива та ТПВ. *Проблемы экологии и эксплуатации объектов энергетики*.

Материалы XXIX международной конференции (г. Черноморск Одесской области, 10–14 июня 2019 г.), що викладені в *Збірнику праць / Институт промышленной экологии*. –К.: ИПЦ АЛКОН НАН Украины, С.126-130.

14. О. І. Сігал, Н. А. Ніжник. (2020). Перспективи використання водню у промислових процесах спалювання. *Матеріали VI Міжнародної науково-практичної конференції, що викладені у Збірнику праць “About the problems of science and practice, tasks and ways to solve them”*, (Мілан, Італія). [DOI: 10.46299/ISG.2020.II.VI](https://doi.org/10.46299/ISG.2020.II.VI), С.536-539.

2021 р.

15. Є.Й. Бикоріз, І.В. Пузанов, Н.А. Ніжник, С.В. Плашихін. (2021). Котли комунальної теплоенергетики України та ефективність їх роботи. *Проблеми екології та експлуатації об'єктів енергетики. Матеріали XXX міжнародної конференції*, що викладені в *Збірнику праць / Институт промышленной экологии*. –К.: ИПЦ АЛКОН НАН Украины, 2021. С.67-72.

16. Є.Й. Бикоріз, Н.А. Ніжник, І.В. Пузанов. (2021). Загальні положення по зниженню утворення оксидів азоту в пальниках з ступінчатою подачею повітря. *Проблеми екології та експлуатації об'єктів енергетики. Матеріали XXX міжнародної конференції*, що викладені в *Збірнику праць / Институт промышленной экологии*. –К.: ИПЦ АЛКОН НАН Украины, 2021. С.73-75.

17. О.І. Сігал, Ю.М. Магєра, Є.Й. Бикоріз, Н.А. Ніжник, С.В. Плашихін. (2021). Екологічні аспекти спалювання ТПВ. *Проблеми екології та експлуатації об'єктів енергетики. Матеріали XXX міжнародної конференції*, що викладені в *Збірнику праць / Институт промышленной экологии*. –К.: ИПЦ АЛКОН НАН Украины, 2021. С.142-147.

18. О.І. Сігал, Ю.М. Магєра, Є.Й. Бикоріз, Н.А. Ніжник, С.В. Плашихін (2021). Використання твердих побутових відходів для виробництва теплової енергії. *Проблеми екології та експлуатації об'єктів енергетики. Матеріали XXX міжнародної конференції*, що викладені в *Збірнику*

праць / Інститут промислової екології. –К.: ИПЦ АЛКОН НАН України, 2021. С.161-163.

19. Н.А. Ніжник, О.І. Сігал. (2021). Сучасні реалії використання водню у котлах комунальної теплоенергетики України. *Проблеми екології та експлуатації об'єктів енергетики. Матеріали XXX міжнародної конференції*, що викладені в *Збірнику праць / Інститут промислової екології*. –К.: ИПЦ АЛКОН НАН України, 2021. С.203-207.

20. О.І. Сігал, Н.А. Ніжник Використання водневих сумішей у спалювальних установках. (2021). *Матеріали I Міжнародної науково-практичної конференції, що викладені у збірнику праць «Problems of modern science and practice»*, Бостон, США, С.466-469. [DOI: 10.46299/ISG.2021.II.I](https://doi.org/10.46299/ISG.2021.II.I), [ISBN-978-1-63972-061-3](https://www.isg.org.ua/ISBN-978-1-63972-061-3)

21. I. Tyshchenko, O. Sigal, N. Nizhnyk, A. Safiants. (2021). Prospects for the development of hydrogen energy. *Reliability and durability of railway transport engineering structures and buildings*. P.278-279. http://conf.kart.edu.ua/images/stories/konf-1/pdf/Theses_2021_10.12.pdf.

2022 р.

22. О.І. Сігал, Н.А. Ніжник. (2022). Вплив водню на процес утворення токсичних речовин при сумісному спалюванні з природним газом. *Матеріали XXXI Міжнародної конференції «Проблеми екології та експлуатації об'єктів енергетики»*, що викладені у збірнику праць. / *Інститут промислової екології*. – К.: ІВЦ АЛКОН НАН України, 2022. С. 82 – 88.

23. О.І.Сігал, Є.Й. Бикоріз, С.В. Плашихін, Н.А. Ніжник, І.В. Пузанов (2022). Фактори впливу на утворення оксидів азоту при спалюванні органічних палив. *Матеріали XXXI Міжнародної конференції «Проблеми екології та експлуатації об'єктів енергетики»*, що викладені у збірнику

праць. / Інститут промислової екології. – К.: ІВЦ АЛКОН НАН України, 2022. С. 92 – 98.

24. О.І.Сігал, Є.Й. Бикоріз, С.В.Плашихін, І.В. Пузанов. (2022). Моделювання теплообміну в топці котла ТВГ-4Р. *Матеріали XXXI Міжнародної конференції «Проблеми екології та експлуатації об'єктів енергетики», що викладені у збірнику праць. / Інститут промислової екології. – К.: ІВЦ АЛКОН НАН України, 2022. С. 102 – 107.*

25. О.І. Сігал, Є.Й. Бикоріз, С.В. Плашихін, Н.А.Ніжник, І.В. Пузанов (2022). Застосування пальників з низькою емісією оксидів азоту при спалюванні природного газу та рідкого палива. *Матеріали XXXI Міжнародної конференції «Проблеми екології та експлуатації об'єктів енергетики», що викладені у збірнику праць. / Інститут промислової екології. – К.: ІВЦ АЛКОН НАН України, 2022С. 111 – 116.*

26. Є.Й.Бикоріз, С.В. Плашихін, Н.А. Ніжник, І.В. Пузанов (2022). Пальники із ступінчастим горінням. *Матеріали XXXI Міжнародної конференції «Проблеми екології та експлуатації об'єктів енергетики», що викладені у збірнику праць. / Інститут промислової екології. – К.: ІВЦ АЛКОН НАН України, 2022. С. 116 – 119.*

27. Є.Й.Бикоріз, С.В. Плашихін, Н.А. Ніжник, І.В. Пузанов Розрахунок характеристик пальникових сопел. *Матеріали XXXI Міжнародної конференції «Проблеми екології та експлуатації об'єктів енергетики», що викладені у збірнику праць. / Інститут промислової екології. – К.: ІВЦ АЛКОН НАН України, 2022. С. 119 – 124.*

28. О.І. Сігал, Є.Й. Бикоріз, С.В. Плашихін, Н.А. Ніжник, І.В. Пузанов Низькоемісійний пальник – «ПІРОКОР» для оснащення газових блокових пальників. *Матеріали XXXI Міжнародної конференції «Проблеми екології та експлуатації об'єктів енергетики», що викладені у збірнику праць. / Інститут промислової екології. – К.: ІВЦ АЛКОН НАН України, 2022С. 124 – 126.*

29.O. Sigal, D. Paderno. N. Nizhnyk. (2022) Possibilities for the production and use of hydrogen as a fuel in existing boilers . *Journal of New Technologies in Environmental Science submitted for publication*, N2,V.6 P.65-66. (Poland).

Апробація результатів дисертації:

Основні положення роботи у якості доповідача викладено та обговорено на робочих зустрічах та конференціях різного рівня:

1. Н.А. Ніжник, О.І. Сігал. (2019). «Шляхи підвищення ефективності використання ПЕР». *XI Міжнародна конференція «Проблеми теплофізики та теплоенергетики»*, м. Київ, 21-22 травня 2019 р.

2. Н.А. Ніжник, О.І. Сігал. (2020). «Перспективи використання водню у промислових процесах спалювання». *XXX міжнародна конференція "Проблеми екології та експлуатації об'єктів енергетики*, Київ, 19-20 листопада 2020 р.

3. Н.А. Ніжник, О.І. Сігал. (2020). «Можливості для водневих технологій при переході до використання альтернативних джерел енергії» *Семінар лабораторії ТПСТ відділу ТПСТ «Шляхи вирішення проблем енергозбереження та екологічної безпеки при спалюванні органічних палив», теплофізична школа ІТТФ НАНУ*. с. Соколівка, Чернігівської обл, 27 липня - 03 серпня 2020 р.

4. Засідання комісії в Мінрегіоні (Обговорення Схеми теплопостачання м. Києва), 28 травня 2021 р.

5. Н.А. Ніжник, О.І. Сігал. (2021). «Можливі шляхи розвитку водневих технологій в комунальній теплоенергетиці України». *XXXI міжнародна конференція "Проблеми екології та експлуатації об'єктів енергетики*, Київ, 17-18 червня 2021 р.

6. Н.А. Ніжник, О.І. Сігал. (2021). «Найближчі перспективи розвитку водневих технологій в комунальній теплоенергетиці України» *Семінар лабораторії ТПСТ відділу ТПСТ «Теплопостачання. Комбінована генерація теплової та електричної енергії. Екологічні аспекти», теплофізична школа ІТТФ НАНУ*. с. Соколівка, Чернігівської обл., 19 липня -21 липня 2021 р.

7. O.Sigal, D.Paderno. N. Nizhnyk. (2022). Possibilities for the production and use of hydrogen as a fuel in existing boilers. *VI International Scientific-Technical Conference ACTUAL PROBLEMS OF RENEWABLE ENERGY, CONSTRUCTION AND ENVIRONMENTAL ENGINEERING*, 24 – 27 November 2022, Kielce, (Poland).

8. Н.А. Ніжник, О.І. Сігал, С.В.Плашихін, А.С. Сафьянц Утворення токсичних речовин при спалюванні водню. *XXI International Scientific and Practical Conference «Actual priorities of modern science, education and practice»*. Paris, France, 2022.

9. Н.А. Ніжник, О.І. Сігал. (2023) «Декарбонізація комунальної теплоенергетики на основі переходу до спалення водню». *XXIV Міжнародна науково-практична он-лайн конференція Відновлювана енергетика та енергоефективність у XXI столітті*, 18–19 травня 2023, Київ.

Актуальность дисертаційного дослідження, підтверджується наступними результатами виступів отримано нагороди:

1. Стипендія молодих вчених НАНУ за період 2018 -2020 рр.
2. Почесна грамота за доповідь в номінації « Relevance of the topic» (Актуальність теми), представлену на XXXI міжнародній конференції "Проблеми екології та експлуатації об'єктів енергетики», Київ, 17-18 червня 2021 року.
3. Почесна грамота за доповідь в номінації «Best Scientific Research Presentationat» («Краща науково-дослідницька презентація»), представлену на XXXII міжнародній конференції "Проблеми екології та експлуатації об'єктів енергетики», Київ, 20-21 вересня 2022року.
4. Стипендія Президента України для молодих вчених НАНУ за період з 2022 р –по теп.час

5. За період оформлення матеріалів дисертаційного дослідження пройдено 2 навчання з підвищення рівня кваліфікації з отриманням відповідних сертифікатів.

ANNOTATION

Nizhnyk N.A. REDUCTION OF THE FORMATION OF NITROGEN OXIDES DURING THE COMBUSTION OF METHANE WITH THE ADDITION OF HYDROGEN SOLUTIONS.

Qualifying scientific work on the rights of the manuscript. The dissertation on competition of a scientific degree of the doctor of philosophy in the field of knowledge 14 electric engineering for 144 - Heat power. - Institute of Technical Thermophysics of the National Academy of Sciences of Ukraine, Kyiv, 2023.

The dissertation is devoted to the theoretical and experimental study of thermal energy and environmental characteristics of the process of burning methane-hydrogen mixtures, as well as the development of a method of burning such mixtures in compliance with regulatory requirements regarding the formation of nitrogen oxides, including on existing equipment. The method is based on the production of synthetic methane from hydrogen, which can be obtained from excess electricity produced from renewable energy sources (RES) (within the so-called "Hydrogen HAB" - a place where all the ingredients for production, storage and use are available hydrogen; it may include, for example, installations for obtaining electricity from renewable sources, an electrolyzer, a methanizer, an absorber, and a boiler installation). The method can be applied at the facilities of the fuel and energy complex of Ukraine, using existing boiler units without changing their structural elements and relabeling, will allow the use of excess electrical energy in daily power generation schedules and will enable further use of the obtained synthetic methane, including such, containing hydrogen, on existing boiler equipment.

Ukraine's energy transition on the way to European integration, aimed at decarbonizing the economy by increasing energy efficiency and energy saving, stimulates the rapid development of renewable energy sources in our country.

The available information in recent years shows the rapid development of solar and wind energy, as one of the most promising and dynamically developing renewable energy sources. Every year, the increase in power generation capacity, which is put into operation, is approximately 90-250% of the values of the previous year (with the exception of 2022, when martial law was introduced in Ukraine). According to the data for the not very indicative (due to COVID-19) last pre-war year 2021, the actual volume of electricity production for 2021 by the power plants of Ukraine as a whole amounted to 156,601 million kWh, of which RES accounted for 8% or 12,527 million kWh (which is an increase of 15.3% compared to 2020). Of this 8%, half was provided by biomass, the rest – sun and wind together 4%. The trend of increasing the share of RES has been observed for almost a decade.

At the same time, there is already a lack of balance capacity reserves of the energy system for Ukraine to maintain its sustainability. One of the reasons is the large (from the point of view of balancing needs) volumes of unregulated electricity production from solar and wind generation - a surplus at the time of undemanded power and the lack of a sufficient number of maneuvering capacities. For the sustainable functioning of the energy system, the ratio of peak to base capacities should be 1:1. In 2021 (taken as the baseline) in Ukraine, this ratio was 0.64:1. That is, the sources generating about 38 million kWh need capacities for regulation. Therefore, the wide implementation of RES to ensure a stable energy supply requires the construction of regulating (balancing) capacities based on traditional energy systems.

The field of hydrogen energy has also long been considered promising in terms of the use of renewable energy sources, it began to develop dynamically in the middle of the previous century. The countries of the EU, the USA, Canada, Japan, and China have also been interested in the possibilities offered by hydrogen (H_2) for more than 40 years. According to the International Energy Agency (IEA), at this time there are already many ways of using hydrogen. The main branches of

industry that require significant volumes of H₂ are oil refining, production of ammonia, methanol. Also, various ways of using hydrogen in energy are already proposed - world practice shows positive results when adding 5-25% of hydrogen to natural gas during its transportation and burning, hydrogen technologies are used for accumulation and transmission of "green" energy, etc.

The implementation of the strategic direction of the European initiative "Green Deal", the carbon-free market and "green hydrogen" stimulates the rapid development of hydrogen energy throughout the world, provides for the wide use of hydrogen primarily as a tool for intermediate storage in the energy market, and aims to reduce carbon dioxide emissions energy, industrial facilities, transport.

At the same time, there are a number of unsolved technical problems associated with the hydrogen combustion process.

The problem of using hydrogen for energy purposes in combustion plants is related to its characteristics as a fuel, in particular, the need to create proper modes of its combustion and the need to change the structural elements of traditional burners and furnaces.

One of the biggest problematic issues is achieving the possibility of using hydrogen in combustion processes on the existing boiler equipment. It is limited by the following factors:

- High adiabatic temperature of hydrogen combustion - 260° higher than the adiabatic temperature of natural gas combustion, which leads to increased requirements for boiler materials, as well as intensification of the formation of nitrogen oxides in the combustion process;

- Low calorific value of H₂ per unit volume – 2750 kcal/m³, which is only about 30% of the values for natural gas;

- The problems of flame stabilization in the mixing burners of boilers (detachment of the flame of the hydrogen-air mixture from the burner) have not been solved.

- Increased formation of nitrogen oxides during the combustion of hydrogen mixtures in atmospheric air in furnaces of boiler units;
- Rapid wear of the burner material due to the property of hydrogen to increase the brittleness of the metal;
- Necessity of organization of drainage of water from the chimney (protection against corrosion).
- The absence of hydrogen as a fuel in the Normative calculation of boiler units, and therefore the impossibility of legitimately using it as a source of energy during combustion in traditional boiler units.

As a result of the analysis of literary sources, a conclusion was made about the need to solve the problem optimally: finding ways to use hydrogen-containing fuel on the existing boiler equipment while not exceeding the standards for nitrogen oxide emissions; this leads to the need to study the possibilities and processes of preventing the increase in the formation of nitrogen oxides when burning fuel containing hydrogen.

The above-mentioned need to balance «green» electricity in the fuel and energy complex of Ukraine necessitates the development of new balancing methods, in particular on existing equipment, one of the directions of which may be the use of hydrogen technology. The availability and spread of available such methods will allow to adapt the energy system of Ukraine to European energy and environmental standards, and to solve the local problems of increasing energy efficiency and reducing the carbon footprint.

Considering this, research aimed at improving and developing methods of using hydrogen and hydrogen mixtures in combustion plants, and first of all in heating boilers, should be considered relevant.

The dissertation proposed a method of using hydrogen obtained from electricity generated using RES, which is surplus in the UES. This method can be applied at the facilities of the fuel and energy complex of Ukraine, which will allow:

- carry out balancing of excess electricity generation;
- use hydrogen-containing fuel on existing boiler equipment.

The proposed method of using hydrogen through the formation of synthetic methane will contribute to the decarbonization of the energy industry and may be relevant not only for Ukraine, but on the other hand, burning a mixture of synthetic methane and hydrogen (the content of the first can be up to 85%, and the remaining 15% is the content of other components, that have not reacted, of which the hydrogen content can be about 10-11%) should not lead to exceeding the permissible levels of emissions of nitrogen oxides. Therefore, the study of the patterns of formation of nitrogen oxides during the combustion of methane with hydrogen additives of about 10...11% requires targeted research.

The above determines the high relevance of the dissertation work.

In the dissertation, an experimental laboratory stand was developed to solve the problems related to the study of combustion processes of mixtures with hydrogen added to methane, the determination of their heat of combustion, the study of the formation of nitrogen oxides, and the appropriate method of conducting experiments was also developed.

The combustion process in the work was considered as a three-component reaction involving water vapor contained in the atmospheric air, the breakdown of water into components triggers the main processes of chain reactions that are inherent in fuel combustion. The theoretical study of combustion processes included a quantitative analysis of the energy spent on heating and evaporation of water contained in the atmospheric air, and estimates of its share in relation to the useful energy of the fuel, which depends on the hydrogen content in the fuel and the coefficient of excess air. It was determined that with a moisture content in the air of 20g/m^3 and an excess air ratio of 1.15, the value of this share of energy ranges from 1.98% (natural gas) to 6.01% (hydrogen).

In order to identify the effect of hydrogen impurities, which was supplied in the form of an aqueous solution of hydrogen peroxide, on the process of formation of nitrogen oxides and post-oxidation of NO to NO_2 in combustion processes, experimental studies were conducted. The hydrogen peroxide solution of different concentrations (from 4% to 30%, which corresponded to the hydrogen content in the aqueous solution from 10.8% to 9.44%) was introduced as a drop of liquid into the flame front of the laminar methane torch.

It was established that the nature of the obtained dependences is similar to the distribution of nitrogen monoxide concentration when a drop of distilled water is introduced into the flame front. An intense increase in the concentration of nitrogen oxides is already observed in the initial cross-sections of the flame front from the moment the mixture begins to heat up, even before the maximum temperature is reached. Moreover, the higher the concentration of the H_2O_2 solution introduced into the flame front, the more intensively the nitrogen oxide content increases. When a 30% H_2O_2 solution (which corresponds to a 9.44% H_2 content in the solution) is introduced into the flame front, the level of NO concentration almost reaches the initial level, i.e. obtained without the introduction of droplet moisture (90-95 mg/m³), while introduction into the front the H_2O flame (corresponding to the H_2 content in the solution of 11.1%) leads to a decrease in the concentration of NO to 65 mg/m³, i.e. by 35-40%. This can be explained by the fact that H_2O_2 forms the OH radical more intensively than H_2O , which takes an active part in the oxidation of hydrocarbons.

Thus, an increase in the concentration of H_2O_2 to 30% in the solution (corresponding to the concentration of H_2 in the solution to the minimum in the experiments - 9.44%) led to an increase in the total yield of nitrogen monoxide by 35-45% under the conditions of the experiment due to the more intensive formation of OH radicals, HO_2 and an increase in the temperature level due to the afterburning of CO .

Separate measurements of NO and NO_2 showed that the dependence of the fraction of NO_2 on the content of H_2 in the solution introduced into the flame front is ambiguous and significantly depends on the place of sampling in the cross section of the flame front. A temperature above 800 °C significantly affects the reaction rate and changes the kinetics of the processes taking place with the participation of hydrogen peroxide, and these changes are of a different nature in different sections of the front, which can be explained by a decrease in the time of existence of H_2O_2 in the flame (20 ms or less).

The most favorable conditions for the reoxidation of NO to NO_2 are the introduction into the torch of a solution with a hydrogen content of 10.0 - 10.5%, in the temperature range of 800 - 1000° C. These conditions are not met by the flame front, but by the flaming area. Therefore, with an increase in the concentration of hydrogen in the methane-hydrogen fuel mixture in the boiler furnace, the concentration of NO will increase accordingly, and the proportion of NO_2 will decrease.

The intensity of the post-oxidation of NO to NO_2 has its extreme, which depends on the concentration of hydrogen in the injected solution. The maximum formation of NO_2 in our experiments was observed for the H_2 content in the solution of about 9.4%.

An increase in the concentration of the H_2O_2 solution from zero to 30% (and, accordingly, a decrease in the hydrogen content in the solution from 10.8% to 9.44%) led to an increase in the total formation of nitrogen oxides by 35-45% and an increase in the temperature level, including due to afterburning CO .

The obtained results of the dissertation research can be used in the creation of equipment and technologies that are part of the "Hydrogen HUB" and in the development of boiler equipment (burner chambers, burners, screens, etc.) that will work on a new type of fuel that includes hydrogen in its composition.

The results of the conducted experimental and calculation studies were used in the development of new heat supply schemes for the cities of Kyiv and Odesa for the perspective of 2030, for planning the creation of «Hydrogen HAB» at the «ST-1» Heat Supply Station in Kyiv and at the «Pivdenna-1» in Odessa. The application of the measures proposed in the work, namely the method of using hydrogen obtained from electrolysis with the use of «green» electricity, to form a synthetic methane-hydrogen fuel mixture with its subsequent combustion in sufficient volumes, will make these powerful heat sources carbon neutral.

Based on the results of the work, an application for a patent for the invention a202106968 dated 12/6/2021 (Appendix A) was drawn up and submitted, which relates to a method of utilizing excess electrical energy using hydrogen technologies by using it to obtain hydrogen, with the subsequent formation of synthetic methane and burning it in boilers.

Key words: heat supply, energy efficiency, carbon-free energy, boiler, flame, fuel, hydrogen, natural gas, renewable energy sources, nitrogen oxides, combustion chamber, synthetic methane.

ЗМІСТ

АНОТАЦІЯ.....	2
СПИСОК ПУБЛІКАЦІЙ ЗДОБУВАЧА.....	10
ANNOTATION	20
ЗМІСТ	28
ПЕРЕЛІК СКОРОЧЕНЬ, СИМВОЛІВ, УМОВНИХ ПОЗНАЧЕНЬ І ТЕРМІНІВ.....	31
ВСТУП.....	33
РОЗДІЛ 1. ОГЛЯД ТА ПЕРСПЕКТИВИ РОЗВИТКУ ВОДНЕВИХ ТЕХНОЛОГІЙ У ПАЛИВНО-ЕНЕРГЕТИЧНОМУ КОМПЛЕКСІ УКРАЇНИ	40
1.1. Відновлювані джерела енергії як рішення в проблемі потепління клімату	40
1.2. Європейські наративи водневих технологій. Огляд способів отримання водню	43
1.3. Тенденція щодо зміни структури енергетичних балансів України на шляху до покращення екологічної та безпекової ситуації регіону	48
1.4. Можливості та перспективи водню для України. Огляд української водневої стратегії	56
1.5. Використання твердих побутових відходів як енергоресурсу і роль водню в процесах їх спалювання	62
1.6. Водень як альтернативний енергоресурс. Дослідження процесів спалювання водню	66
1.7. Механізми утворення оксидів азоту в енергетичному обладнанні і основні способи їх зниження	77
1.8. Спосіб використання водню в якості акумулятора енергії в комунальній теплоенергетиці.....	82
1.9. Висновки до розділу 1. Мета та завдання дослідження	86
РОЗДІЛ 2. ТЕОРЕТИЧНІ ОСНОВИ ВПЛИВУ ВОДНЮ НА ПРОЦЕС СПАЛЮВАННЯ ВУГЛЕЦЕВОГО ПАЛИВА	90
2.1. Процеси та параметри, які впливають на ефективність спалювання вуглецевого палива	90
2.2. Вплив вологи на утворення токсичних речовин при горінні палив	94

2.3. Оцінка енергії дисоціації води, що міститься в атмосферному повітрі, при спалюванні палива	100
2.4. Висновки до розділу 2.....	104
РОЗДІЛ 3. ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНЕ ДОСЛІДЖЕННЯ ВПЛИВУ ВОДНЮ НА ПРОЦЕС ГОРІННЯ ПРИРОДНОГО ГАЗУ	106
3.1. Блок-схема експериментального стенду	106
3.2 . Методика визначення впливу крапельної вологи на процес горіння та утворення оксидів азоту.....	109
3.2.1. Визначення концентрації складових продуктів спалювання та температури полум'я	112
3.2.2 Визначення температури полум'я	115
3.3. Оцінка похибки вимірювань.....	117
3.4. Висновки до розділу 3	122
РОЗДІЛ 4. ДОСЛІДЖЕННЯ ВПЛИВУ ВОДНЮ У СКЛАДІ ГАЗОПОДІБНОГО ПАЛИВА НА ПРОЦЕС УТВОРЕННЯ ОКСИДІВ АЗОТУ	124
4.1. Вплив крапельної вологи на процес горіння і утворення оксидів азоту	124
4.2. Обговорення результатів дослідження впливу введення перекису водню на процес утворення оксидів азоту	129
4.3. Висновки до розділу 4.....	131
РОЗДІЛ 5. РОЗРОБЛЕННЯ РЕКОМЕНДАЦІЙ ЩОДО ВПРОВАДЖЕННЯ ВОДНЕВИХ ТЕХНОЛОГІЙ В СИСТЕМАХ ЦЕНТРАЛІЗОВАНОГО ТЕПЛОПОСТАЧАННЯ	133
5.1. Пропозиції використання водневих технологій при розробленні Схеми теплопостачання м. Києва на період до 2030 року.....	134
5.2. Використання водневих технологій при розробленні Схеми теплопостачання м. Одеси на період до 2030 року	137
5.4. Висновки до розділу 5.....	139
ЗАГАЛЬНІ ВИСНОВКИ ДО РОБОТИ.....	141
ПЕРЕЛІК ПОСИЛАНЬ	143
ДОДАТКИ	156
Додаток А	156
Додаток Б.....	162
Додаток В.....	163
Додаток Г	170

Додаток З	175
Додаток Ж.....	178

ПЕРЕЛІК СКОРОЧЕНЬ, СИМВОЛІВ, УМОВНИХ ПОЗНАЧЕНЬ І ТЕРМІНІВ

Скорочення:

ЄС – Європейський союз

ПЕК – паливно-енергетичний комплекс;

ВДЕ – відновлювані джерела енергії;

МЕА – міжнародне енергетичне агенство;

ЕСУ – енергетична стратегія України;

АЕС – атомна електрична станція;

ТЕС – теплова електрична станція;

ТЕЦ – теплова електрична централь;

ГЕС – гідроелектрична станція;

ГАЕС – гідроаккумулятивна електрична станція;

ГДК – гранично допустимі концентрації;

НПСВ – національний план скорочення викидів;

ВСУ – великі спалювальні установки;

ККД – коефіцієнт корисної дії;

ОЕС – об'єднана енергетична система;

RDF – паливо з відходів;

H₂ – водень;

H₂O – вода;

CO₂ – діоксид вуглецю, вуглекислий газ;

CH_4 – метан;

SO_2 – діоксид сірки;

NO_x – оксиди азоту (сумарне значення);

PM_{10} – тверді мікрочастинки, розміром до 10 мікронів;

Q_B - вища теплота згорання палива, кДж/м^3 ;

Q_H - нижча теплота згорання палива, кДж/м^3 .

ВСТУП

Обґрунтування вибору теми дослідження.

Стрімкий розвиток відновлюваних джерел енергії, необхідність в зниженні викидів забруднюючих речовин (оксидів азоту, оксидів вуглецю, вуглеводнів, твердих частинок попелу, оксидів сірки, тощо) від діючих спалювальних установок сформували високу затребуваність і широкі можливості для застосування нових технологій, ціллю яких є сумісне поліпшення енергетичної та екологічної ситуацій.

Одним з можливих шляхів підвищення енергоефективності, енергозбереження та декарбонізації економіки може бути впровадження технологій, що пов'язані із застосуванням водню. В ЄС використання водню визначено одним з ключових пріоритетів переходу енергетичного сектора ЄС до екологічно чистого, сталого розвитку.

8 липня 2020 р. Єврокомісією прийнята програма «A hydrogen strategy for a climate-neutral Europe», завданням якої є сприяння реалізації європейського «зеленого курсу» (European Green Deal) з прагнення ЄС до кліматично нейтральної економіки до 2050 р. У додатку Б наведена коротка характеристика Водневої Стратегії. Також на розгляді «Енергетична стратегія України на період до 2050 року». Так, згідно цих документів, водень називають світовим трендом у розвитку нової енергетики, паливом з низькими викидами забруднюючих речовин. Біогаз, водень та паливо на основі водню будуть демонструвати швидке зростання в структурі споживання – заплановано, що на ці енергоресурси буде припадати майже 20% світової енергії у 2050 році (а це зростання більше ніж у 20 разів в порівнянні з 2020 роком). Також озвучені наміри виробітку до 2050 року більш ніж 500 мегатон водню, з якого близько 60% буде отримано за допомогою електролізу.

Політичне прагнення України до євроінтеграції стимулює внутрішньодержавний напрямок, пов'язаний з перспективними світовими тенденціями енергетичного розвитку, що пов'язані з водневими технологіями. Україна не може розглядатись як вагомий експортер водню до Європи як через вкрай низькі обсяги можливого виробітку по відношенню до того ж європейського попиту, так і через відсутність газотранспортної мережі трубопроводів, яка відповідає б експлуатаційним вимогам перекачування такого продукту, як водень.

Так, за даними АТ «НАК «Нафтогаз України» споживання газу підприємствами ТКЕ у 2020 році становило 5,1 млрд м³, що на 2,3 млрд м³ (+ 82%) більше, ніж у 2019 році, через «доступні ціни» для населення на природний газ та активне його використання для виробництва електроенергії.

При спалюванні водню в атмосферному повітрі обсяги викидів оксидів азоту зростають до 300-400 мг/м³, що в 2-3 рази перевищує аналогічні значення при спалюванні природного газу. Тобто, при переході на використання водню як палива в комунальній сфері, матимемо зростання викидів оксидів азоту в ти ж 2 - 3 рази, що може становитиме до 200 тис. тон викидів NO_x за рік (викиди оксиду азоту у 2021 році склали 76 тис. тонн) Це створить ще одну проблему для вирішення і без того не простої екологічної ситуації в нашій Державі.

Україна дотримується міжнародних зобов'язань перед Енергетичним Співтовариством, що визначені Національним планом скорочення викидів від великих спалювальних установок (НПСВ), зокрема, визначає наміри України як члена Енергетичного Співтовариства істотно скоротити викиди діоксиду сірки, оксидів азоту і пилу від теплоелектростанцій (ТЕС) і теплоелектроцентралей (ТЕЦ) України, потужність яких становить 50 МВт і більше.

Ключові зобов'язання зафіксовані в трьох Додатках до НПСВ, де:

Додаток 2 встановлює щорічний сумарний дозволений обсяг викидів по кожній з трьох забруднюючих речовин для усіх ТЕС/ТЕЦ, що входять до

НПСВ. Сумарні річні викиди від усіх енергоблоків — це зобов'язання України на міжнародному рівні, про виконання якого Міненерго звітує Секретаріату Енергетичного Співтовариства щорічно. Відповідно до звітів Міненерго, в 2018 і 2019 роках фактичні викиди — значно нижчі, ніж зазначено в НПСВ.

Додаток 3 містить строки встановлення на 90 енергоблоках сірко-, азото- та пилоочисного обладнання задля поступового скорочення викидів цих забруднюючих речовин:

- діоксиду сірки – на 95% від обсягів 2018 року до 1 січня 2029 року;
- пилу – на 97% до 1 січня 2029 року;
- оксидів азоту – на 72% до 1 січня 2034 року.

Для кожного енергоблоку є свій рік виконання – з 2020 по 2033 рр.

В Додатку 4 зазначено установки, на яких може не встановлюватись газоочисне обладнання, але ці установки після напрацювання певного часу (20 або 40 тис. годин) повинні бути виведені з експлуатації або виконувати цільові європейські нормативи по викидах. Відлік напрацювання часу починається з 01.01.2018. Це так званий OPT/OUT list (перелік).

Дисертаційне дослідження присвячене деяким можливостям використання водню в котлоагрегатах комунальної теплоенергетики, в т.ч. із задоволенням екологічних вимог експлуатації котельних агрегатів.

Можливі способи рішення даної задачі розглядаються в даній роботі.

В роботі не піднімаються питання безпеки при використанні водню, фінансової і економічної доцільності використання водню, питання отримання і транспортування. Автор розглядає екологічні, енергетичні і технологічні проблеми, пов'язані з використанням водню як палива в енергетиці.

Зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами. Дисертаційна робота виконувалася в лабораторії «Теплофізичних процесів у котлах» відділу «Теплофізичних проблем систем тепlopостачання» у відповідності з науковою тематикою Інституту технічної теплофізики НАН

України. Робота пов'язана з науковими дослідженнями в рамках наступних тем:

1. 1.7.1.873 «Розроблення методів і обладнання для підвищення енергоекологічних характеристик котлоагрегатів комунальної енергетики потужністю 3,15-30 МВт відповідно до вимог Директив ЄС» (№ДР 0115U002605), що виконується за постановою борю ВФТЕ НАНУ, протокол №13§70 від 30.09.2014 р.

2. КПКВК 6451230 «Підвищення ефективності спалювання штучних палив з твердих побутових відходів і біомаси в когенераційних установках шляхом використання водню, кисню, синтетичного та біометану для забезпечення енергетичної безпеки України»;

1. Господарчий Договір № 495 від 01.12.2019 р. на надання послуг з розроблення «Схеми теплопостачання м. Києва на період до 2030 року.

2. Господарчий Договір №496 від 01.07.2020 р. на надання послуг з «Розроблення та затвердження у встановленому законодавством порядку схеми теплопостачання м. Одеси».

Метою даної роботи є вивчення фізичного явища утворення та зміни концентрації оксидів азоту, що генеруються при спалюванні метано-водневих сумішей, від вмісту водню, задля її зниження до рівня екологічних нормативів.

Для досягнення поставленої мети необхідно вирішити наступні **завдання**:

1. Дослідити процеси горіння метано-водневих сумішей та утворення монооксиду та діоксиду азоту, що відбуваються в технологічних процесах, наближених до умов «Водневого ХАБу»:

1.1. Встановити найбільш значущі процеси та їхні параметри, які впливають на утворення оксидів азоту при горінні метано-водневих сумішей.

1.2. Розробити методику експериментальних досліджень характеру зміни концентрацій монооксиду та діоксиду азоту та локальних температур у фронті полум'я від вмісту водню у суміші, що спалюється.

1.3. Провести експериментальні дослідження утворення монооксиду та діоксиду азоту при горінні метано-водневих сумішей та встановити характер змін температури полум'я і концентрацій монооксиду і діоксиду азоту в залежності від вмісту водню у суміші, що реагує.

2. Запропонувати впровадження результатів дослідження на існуючому теплогенеруючому обладнанні теплопостачальних підприємств, в т.ч. для створення додаткових балансуєчих потужностей.

Об'єкт дослідження: процес спалювання метано-водневої суміші, що містить водень у водному розчині.

Предмет дослідження: вплив концентрації водню на утворення монооксиду та діоксиду азоту у фронті полум'я в процесі горіння метано-водневої суміші, що містить водень від 9,5% до 11,5%.

Методи дослідження:

В роботі використані розрахункові та експериментальні методи досліджень.

При розробленні розрахункової моделі для побудови матеріальних і теплових балансів процесів спалювання використані методи статистичного опрацювання даних, реалізовані в складі стандартних пакетів MS Excel і MathCad, для графічного зображення конструктивних елементів лабораторної установки – пакет Autocad.

Експериментальні методи досліджень були використані при проведенні експериментів на модернізованому стенді. Дослідження фронту горіння здійснювалося в стаціонарному «зворотному» факелі метану зі змінною часткою водню у розчині, що реагує.

Наукове значення роботи полягає в теоретичному обґрунтуванні та експериментальному визначенні умов, які дозволяють проводити спалювання

метано-водневої суміші, що містить близько 10% водню, із задовільненням екологічних вимог.

Практична цінність отриманих результатів дисертаційної роботи полягає в наступному.

Отримані результати дисертаційного дослідження можуть бути використані при проектуванні котельного обладнання (топкових камер, пальників, екранів тощо), що працюватиме на газових сумішах з додаванням водню.

Описано спосіб балансування енергосистеми за допомогою діючих котлоагрегатів та застосування водневих технологій в межах водневого ХАБу. Результати експериментальних та розрахункових досліджень використані для потужних теплогерел «СТ-1» в м. Києві та РК «Південна-1» в м. Одесі – розрахунки та проектування їх на перспективу до 2030 року у стан водневого ХАБу, тобто з отриманням синтетичного метану. Застосування заходів, запропонованих в роботі, дозволить зробити технологію спалювання на теплогерелах в перспективі вуглецево нейтральною.

Особистий внесок здобувача. Принципові і основні результати дисертації отримані автором особисто. Автором самостійно проведено аналіз стану проблеми, розроблено ідею і тему дисертації, обґрунтовано методики експериментальних досліджень, виконано аналіз отриманих даних, сформульовано висновки.

В роботах, опублікованих у співавторстві, пошукачеві належить участь у постановці задач дослідження і проведенні експериментів, надання обґрунтованих пояснень отриманих результатів.

Апробація результатів дисертації

Основні наукові положення й результати дисертаційної роботи обговорювалися на XXVIII, XXIX, XXX, XXXI міжнародних конференціях «Проблеми екології і експлуатації об'єктів енергетики» (Одеса, Київ 2017 - 2021 рр.); XI, X Міжнародних конференціях «Проблеми теплофізики та

теплоенергетики» (Київ, Інститут технічної теплофізики НАН України, 2018, 2019 рр.), VI Міжнародній науково-практичній конференції “About the problems of science and practice, tasks and ways to solve them”, 2020 р., Мілан, Італія, I Міжнародній науково-практичній конференції «Problems of modern science and practice», 21-24 вересня 2021 р., Бостон, США, а також на наукових семінарах відділу теплофізичних проблем систем теплопостачання в ІТТФ НАН України.

Публікації

Основні наукові положення дисертаційної роботи опубліковано в 29-ти наукових працях, у тому числі 6 статтях у спеціалізованих фахових виданнях, з яких 3 входять до наукометричної бази даних SCOPUS, 1 до наукометричної бази даних WOS, а також в 2 монографіях, 20 тезах науково-практичних конференцій міжнародного рівня, подана заявка на патент на винахід.

Структура і об’єм дисертації. Дисертаційна робота містить анотацію, вступ, п’ять розділів, висновки, перелік використаних джерел та додатки. Основна частина дисертації викладена на 105 сторінках, включаючи 24 ілюстрацій, 12 таблиць, перелік використаних джерел з 113 найменувань, додатки на 25 сторінках.

РОЗДІЛ 1. ОГЛЯД ТА ПЕРСПЕКТИВИ РОЗВИТКУ ВОДНЕВИХ ТЕХНОЛОГІЙ У ПАЛИВНО-ЕНЕРГЕТИЧНОМУ КОМПЛЕКСІ УКРАЇНИ

1.1. Відновлювані джерела енергії як рішення в проблемі потепління клімату

Протягом попередніх двох десятиліть однією з найбільш вагомих глобальних проблем людства називають потепління клімату. Сьогодні наявні негативні розрахункові прогнози, що свідчать про можливе підвищення температури поверхні Землі на 4 - 5°C до 2100 року [1], за умови незмінності номенклатури виробничих потенціалів розвинених держав. Наслідками глобального потепління буде стрімке танення льодовиків, підняття рівня води світового океану та наступні кліматичні зміни, що ними викликані. Отримані дані підкреслюють терміновість впровадження ефективної кліматичної політики для пом'якшення наслідків глобального потепління та захисту майбутнього нашої планети.

Одним з найбільш впливових секторів на таке погіршення екологічної ситуації експерти вважають теплоенергетику та відповідно процеси спалювання, які домінують в її структурі отримання енергії. Задачі зупинки глобального потепління, збереження наявного клімату, викликані не стільки енергетикою як такою, як процесами, що пов'язані з використанням основних викопних енергетичних ресурсів: вугілля, нафтопродуктів, природного газу. Так, лише в Україні валову частину викидів парникових газів (близько 75%) згенеровано саме об'єктами енергетики .

Шкідливими речовинами в продуктах згорання вуглеводневих палив, що викидаються в атмосферу через димарі, є оксиди азоту і сірки, тверді частинки і важкі метали, продукти неповного згорання, серед яких присутній ряд канцерогенних поліциклічних ароматичних вуглеводнів [2].

Так, у деяких випадках при спалюванні палива в продуктах згорання можуть бути присутніми такі продукти незавершеного горіння: сажа, формальдегід НСНО, поліциклічні ароматичні вуглеводні, такі як бенз(а)пірен $C_{20}H_{12}$ 9-10-діметілантрацен $C_{14}H_{14}$, бенз(а)антрацен $C_{18}H_{12}$, дібенз(а,h)антрацен $C_{22}H_{14}$ і інші, які відносяться до канцерогенних речовин.

Наприкінці 2015 року учасники кліматичного саміту ООН у Парижі підписали угоду про обмеження антропогенних викидів парникових газів [3]. Паризькі домовленості спрямовані на стримання зростання глобальної середньої температури значно нижче 2 °С понад доіндустріальні рівні і докладання зусиль з метою обмеження зростання температури до 1,5 °С. Суттєвою відмінністю даної угоди від Кіотського протоколу [4] є те, що держави-підписанти добровільно беруть на себе зобов'язання зі скорочення викидів в атмосферу незалежно від рівня їх економічного розвитку.

За попередні кілька років Європейська Комісія оприлюднила ще ряд документів, які направлені на підвищення ефективності використання ресурсів, боротьбу з глобальним потеплінням, скороченням забруднення, що охоплює всі сектори економіки – енергетику, промисловість транспорт тощо [5], найбільш вагомими серед них в питаннях збереження клімату та підвищення енергоефективності авторка вважає наступні:

1. Стратегія ЄС з інтеграції енергетичної системи (EU Strategy for Energy System Integration), яка направлена на підвищення енергоефективності економіки ЄС за рахунок створення інтегральної системи енергозабезпечення, яка об'єднує в єдине ціле різні джерела енергії, інфраструктуру, споживачів і передбачає широке і ефективне використання місцевих джерел енергії, а також ширше застосування електроенергії [6];

2. Європейський зелений курс (The European Green Deal), метою якого є перетворення Європи до 2050 року на перший кліматично нейтральний континент [7];

3. Декарбонізація енергетики. Директива 2018/2001 Європейського Парламенту та Ради від 11 грудня 2018 року (RED II) [8];

4. Воднева стратегія ЄС (EU Hydrogen Strategy), яка передбачає широке використання водню як енергоносія в електроенергії як для накопичувача енергії і має на меті значне зниження викидів вуглекислого газу промисловими об'єктами, транспортом, енергетикою, будівництвом тощо. Воднева стратегія ЄС має намір першочергово розвивати взаємодію з виробництва «зеленого» водню з сусідніми країнами і регіонами, щоб сприяти їх переходу до чистої енергії та їх сталому розвитку [9].

Одним із ключових рішень для реалізації та практичного впровадження вище зазначених документів є використання відновлюваних джерел енергії (ВДЕ). До ВДЕ відносять в основному сонячне світло, вітер, енергію води і біопалив, геотермальне тепло. Вважається, що ВДЕ природним чином поновлюються в людському масштабі часу та здатні в перспективі кількох десятиліть забезпечити достатнє виробництво електроенергії та теплової енергії у світі.

Традиційно прийнято всі енергетичні потоки ВДЕ класифікувати двома основними групами – пряма енергія сонячного випромінювання та її вторинні прояви (гідроенергія, теплова енергія середовища, вітер, біомаса тощо) [10].

Основними перевагами використання ВДЕ є їхня відновлюваність і екологічна безпека. Вже сьогодні, через геополітичну ситуацію озвучений глобальний вагомий наратив – енергетична безпека і ВДЕ є одним із можливих ключових рішень у цьому.

Але ВДЕ мають недоліки, які гальмують їх широке використання, а саме:

- значні зміни їх енергетичного потенціалу в часі (дискретність енергетичних потоків) та географії користування (невисока прогнозованість);

- висока собівартість енергії через інженерно-технічні проблеми створення ефективних технологій отримання і зберігання енергії;
- низька густина енергії в одиниці об'єму.

Тобто, однією з причин обмеженого використання ВДЕ є нерегулярність надходження енергії та дискретність (змінність) енергетичного потенціалу. Це не відповідає сучасним вимогам щодо енергопостачання цільових споживачів. Тому широке впровадження ВДЕ потребує створення регулюючих потужностей на основі традиційних енергосистем для забезпечення стабільного енергопостачання в періоди відсутності енергії від ВДЕ.

Є припущення, якщо сонячні і вітрові станції приблизно 25-30 % своєї потужності спрямовуватимуть на виробництво водню, який потім знову буде конвертуватися в виробництво електроенергії, то таким чином відновлювана енергетика сама себе може підтримувати «піковими потужностями» і стати більш прогнозованою. Це є одним із можливих шляхів інтеграції запланованих великих обсягів відновлюваної енергетики в енергосистему України. Автори [11] вважають, що відновлювана енергія вітру та сонця буде створювати серйозні проблеми для забезпечення цілих секторів економіки, якщо не доповнюватиметься водневими технологіями. Більш детально дане питання розглянуто в наступних розділах.

1.2. Європейські наративи водневих технологій. Огляд способів отримання водню

Глобальна геополітична ситуація, що формувалась крайні десятиліття, актуальні прогнози розвитку ВДЕ та їх впливу на трансформацію світової енергетики свідчать про подальше та незворотне зменшення вжитку технологій прямого спалювання вуглеводнів (в першу чергу використання вугілля, нафти та, зрештою, і природного газу), яке негативно впливає на глобальну екологічну ситуацію.

Рада Європейського Союзу зазначила, що до 2050 року «відновлювані гази» — в основному водень (H_2) і біометан — можуть становити до 70% загального споживання газу у ЄС [12]. Питання впровадження водневих технологій стає ще більш актуальним зважаючи на воєнні геополітичні конфлікти у Східній Європі.

Після оприлюднення «Водневої стратегії ЄС до 2050 року» [9], особливого значення набуває питання розвитку транспортування та зберігання відновлюваних газів (водню, біометану та синтетичного метану), в якому ЄС розглядає Україну як перспективного партнера. Водневі національні стратегії та плани вже розроблені або перебувають в стадії підготовки в передових країнах Європи, таких як Австрія, Бельгія, Німеччина, Латвія, Португалія, Іспанія, Франція, Румунія, Польща, Італія, Нідерланди та Швеція.

В ЄС використання водню визначено одним з ключових пріоритетів щодо переходу енергетичного сектора ЄС до екологічно чистого, сталого розвитку. Так, 8 липня 2020 р. Єврокомісією прийнята програма «A hydrogen strategy for a climate-neutral Europe» («Воднева стратегія для кліматично-нейтральної Європи») (Додаток Б), завданням якої є сприяння реалізації європейського «зеленого курсу» (European Green Deal) та прагненню ЄС до кліматично нейтральної економіки до 2050 р. і глобальним цілям по реалізації завдань Паризького Угоди щодо зниження викидів парникових газів.

Програмою поставлені стратегічні цілі щодо поетапного розгортання водневих технологій:

- Перший етап: впровадження в період з 2020 по 2024 рр. електролізерів для виробництва «зеленого» водню (з використанням ВДЕ) потужністю не менше 6 ГВт (вже наявне значне відставання від заявлених намірів);

- Другий етап: впровадження в період з 2025 по 2030 рр. електролізерів для виробництва «зеленого» водню потужністю не менше 40 ГВт;

- Третій етап після 2030 року: досягнення зрілості водневих технологій і широке їх впровадження в промислових масштабах у всіх секторах, які складно декарбонізувати.

За даними (МЕА) [13], наразі 99% водню отримується з викопних видів палива, а його глобальне вироблення становить близько 70 млн тонн. Так, близько 6% світового виробництва природного газу та близько 2% вугілля спрямовуються на виробництво водню шляхом парового риформінгу метану та газифікації вугілля. Це так званий «сірий» та в залежності від типу використаного вугілля «бурий/чорний» водень. На сьогодні «сірий» водень становить більшу частину продукції і зумовлює утворення близько 9,3 кг CO₂ на 1 кг водню. Як наслідок, виробництво водню призводить до викидів близько 830 млн тонн вуглекислого газу на рік, що еквівалентно викидам Великої Британії та Індонезії разом.

На рисунку 1.2.1 представлена спрощена схема класифікації «кольорів» водню, залежно від способу його отримання.

Колір	Виробляється з ...
зелений	електроенергії з відновлюваних джерел енергії через електроліз води
блакитний	викопних вуглеводнів (газ, нафта, вугілля) із застосуванням технології уловлювання та зберігання вуглецю
сірий	викопних вуглеводнів (газу, нафти)
коричневий / чорний	вугілля
бірюзовий	розщеплення метану
фіолетовий	електроенергії з АЕС та тепла
рожевий / жовтий	електроенергії з АЕС через електроліз води / електроенергії будь-якого походження через електроліз води
червоний	теплової ядерної енергії
білий	водень природного походження

Рис. 1.2.1 – Класифікація водню в залежності від способу його отримання

«Блакитний» водень отримують за допомогою систем уловлювання, утилізації та зберігання вуглецю CCUS (Carbon capture, utilization and storage), уловлюючи CO₂ з «сірого» водню (наразі ефективність цих систем складає до 80-90%).

Шляхом електролізу отримують «зелений» та «рожевий» водень (який вже у 2023 році ЄС визнало «зеленим» воднем), які виробляються, відповідно, за рахунок відновлюваних джерел енергії (в основному енергії сонця і вітру) та атомної енергії. Пріоритетом для ЄС є «зелений» водень, як зазначалось вище. Зокрема, передбачається, що він застосовуватиметься як засіб добового і сезонного балансування електроенергетичної системи, яка базується на відновлюваних джерелах енергії. До 2050 року близько 20% електроенергії з відновлюваних джерел може бути використано для виробництва «зеленого» водню, за рахунок якого буде забезпечено до 24% світової потреби в енергоресурсах, а його щорічні продажі складуть близько 630 млрд євро.

Реакція ринку зараз свідчить про високу перспективність водневих технологій і про готовність до розроблення і впровадження водневих проектів. Так, з листопада 2019 року по березень 2020 р глобальний портфель інвестиційних проектів по розгортанню генерації водню на базі промислових електролізерних установок, запланований до 2030 р, зріс з встановленої потужності в 3,2 ГВт до близько 8,2 ГВт. Їз цієї кількості близько 57% заплановано ввести в експлуатацію саме в ЄС.

Вже сьогодні водневій тематиці приділяється значна увага. Загалом, уряди багатьох передових держав розробляють національні водневі стратегії [14-19].

Японія, Австрія мають намір зробити значне переналаштування своїх енергетичних систем для використання цього енергоносія та називають себе країнами «водневої економіки». Так, у Японії з 2018 року будується т.з. «Дослідницьке водневе поле» (FH2R) площею 180 тис. м² Fukushima Hydrogen Energy Research Field. Сонячний генератор (20 МВт) разом з енергією від мережі використовуються для живлення найбільшої у світі водневої установки (до 10 МВт), що виробляє водню 1200 нм³/год. Установка забезпечена додатковим обладнанням для постачання та зберігання водню.

Проект (H₂-Hub Gladstone facility – Queensland) у Австралії дещо відрізняється - електролізер (175 кВт) живиться від локальної мережі ВДЕ, водень у суміші з природним газом, що містить 10% водню, транспортують невеликим промисловим підприємствам (до тисячі одиниць) через наявну газову мережу. Це найбільший обсяг суміші з воднем у цій країні, що поставляється через наявну мережу.

Об'єднання нідерландських, норвезької і німецької компаній Gasunie (Groningen Seaports, Shell Nederland Equinor, RWE) планують створити в Північному морі вітропарк North₂. Він буде працювати для забезпечення роботи електролізної установки для виробництва «зеленого» водню. Планується, що електростанція буде введена в експлуатацію у 2027 році, і кожні 3 роки буде розширюватися. Її початкова потужність складе 1 ГВт, в 2030-му вона повинна досягти 4 ГВт, а до 2040-го – 10 ГВт.

В Англії British Petroleum (нафтогазова компанія) планує великий проект HyGreen Teesside з виробництва «зеленого» водню, який буде розроблятися в кілька етапів, починаючи з близько 60 МВт потужностей з виробництва водню 2025 року і досягне 500 МВт до 2030 року. [20].

В Іспанії американська енергетична компанія Cummins у співпраці з іспанським виробником та постачальником електроенергії Iberdrola побудує великий електролізний завод для виробництва водню потужністю 500 МВт із можливим розширенням до більш ніж 1 ГВт та вартістю 50 млн євро [21].

У журналі Power Engineering International [22] описані основні водневі проекти, які суттєво вплинуть на поширення використання водневих технологій. Водень є сучасним світовим енергетичним, екологічним трендом, попит, на якого на ринку надзвичайно швидко збільшується.

Цікавим є пілотний проект використання водню для комунального сектору промисловості. Для опалення житлового будинку вперше в історії у Нідерландах у місті Розенбург був введений в експлуатацію побутовий котел на водні. Водневий котел був встановлений в котельні поруч з існуючим звичайним котлом на природному газі, який стабільно забезпечує жителів

достатньою кількістю теплоти та гарячою водою [23]. Пілотне тестування 100% водневого котла здійснює BDR Thermea Group з червня 2019 року в рамках проекту, ініційованого власником газових мереж Stedin в партнерстві з муніципалітетом Роттердама і житловим кооперативом Ressorst Wonen. Принцип роботи котла на водні такий, як і у працюючого на природному газі. Чистий водень використовується як паливо для системи центрального опалення житлового будинку. BDR Thermea Group стала першою в Європі компанією, яка отримала сертифікацію на використання водневої суміші в побутових котлах у Нідерландах. Компанія бере участь у британській програмі Ну4Heat і активно вивчає водневі експериментальні проекти по всій Європі. У найближчі роки планується встановити більше 400 водневих котлів. Передбачається, що «зелений» водень може зрівнятися у ціні з природним газом до 2050 року.

Вже зараз зрозуміло, що для кожної країни водневий шлях буде свій, адже залежить не лише від прагнень «йти в ногу» зі світовими тенденціями, а і від наявної бази і стану паливно-енергетичного комплексу конкретної держави.

1.3. Тенденція щодо зміни структури енергетичних балансів України на шляху до покращення екологічної та безпекової ситуації регіону

Перехід від викопних видів палива до відновлюваної енергії покладено в основу європейських ініціатив, до яких прагне долучитися Україна. Насамперед йдеться про приєднання до Європейської зеленої угоди, декарбонізацію промисловості для підтримання конкурентоздатності на європейському ринку та й взагалі про виконання зобов'язань щодо альтернативної енергетики в межах Угоди про Асоціацію. Для України першочергово це означає значне скорочення експлуатації теплових і газових електростанцій.

На сьогодні можливість виконання деяких політичних декларацій, заявлених Україною щодо скорочення емісії забруднюючих речовин, не

виглядає надто реалістично – через відсутність різностороннього бачення, яким саме чином буде здійснюватися практичний перехід до ВДЕ хоча б найближчими роками.

Існують проблеми з уже побудованими ВДЕ (у частині їх оплати та балансування), предметні дискусії щодо подальшого розвитку як "зеленої", так і всієї електроенергетики (інтеграція ОЕС України до загальноєвропейської енергосистеми ENTSO-E, передбачена Угодою про Асоціацію між Україною та ЄС [24] - яка вже частково реалізована) та європейського ринку електроенергії та зеленої угоди. На передній план, наприклад, підіймається хвиля заяв та дискусій про виробництво "зеленого" водню в Україні для постачання в ЄС.

Кам'яне вугілля і природний газ становлять найбільш вагомий вклад у енергетичний баланс України в порівнянні з іншими традиційними видами палива.

На рисунку 1.3.1 наведено графіки, що показують щомісячні обсяги використання та залишки ключових енергоносіїв в Україні за останні 5 років.

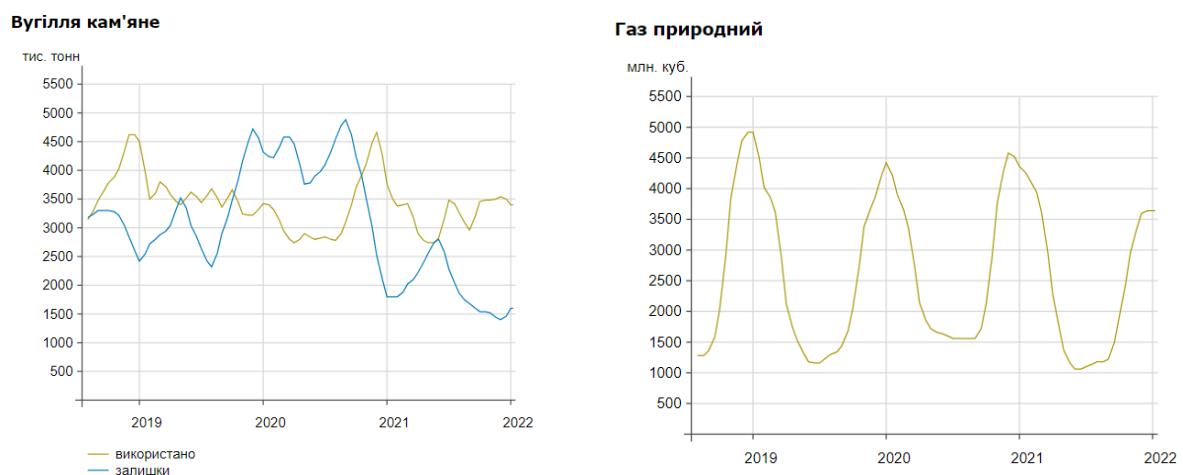


Рис.1.3.1 - Використання та залишки вугілля та природного газу в Україні за період 2019 - 2022 рр.[25]

Якщо проаналізувати звітні дані крайніх років, то можна зробити висновок, що зменшення споживання вугілля та природного газу відбувалось в першу чергу через зниження обсягів виробництва та обмеження експорту продукції, спричинене світовим економічним спадом пов'язаним з Covid, а не

через впровадження енергоефективних низьковуглецевих технологій, як того вимагають міжнародні зобов'язання.

Проте, певні напрацювання в напрямку підвищення енергоефективності все ж були здійснені. Але курс уряду України на скорочення споживання природного газу і спалювання замість нього вугілля на теплових електростанціях для виробництва теплової та електричної енергії призвів до значного забруднення повітря, ґрунту та ґрунтових вод. Тобто, маючи на меті покращення глобальної екологічної ситуації, за рахунок енергозбереження отримали локальне її погіршення за рахунок збільшення використання вугілля. Це відбулося в т.ч. по причині збільшення експлуатації зношеного обладнання теплової енергетики, 90 % якого фактично вичерпало свій проектний термін роботи. Так, середній вік вугільних станцій становить 50 і більше років. ККД не перевищує 45-50 %.

Згідно звіту [26], в Україні розташований один із найбільш забруднюючих парків вугільних електростанцій у світі. Згідно із нещодавнім звітом [27], вугільні електростанції країни є лідерами за викидами SO₂ та зольного пилу в Європі. Українські вугільні електростанції генерують 80% загальних викидів діоксиду сірки в Україні та 25% оксидів азоту, але при цьому на українських вугільних станціях практично відсутній контроль за цими викидами. Рівні викидів зольного пилу особливо високі та перевищують граничні значення, визначені Наказом Міністерства охорони навколишнього природного середовища України №541 від 22.10.2008 «Про затвердження технологічних нормативів допустимих викидів забруднюючих речовин із теплосилових установок, номінальна теплова потужність яких перевищує 50 МВт» та змінами, внесеними згідно з наказами Міністерства екології та природних ресурсів України № 337 від 17.09.2015 та № 62 від 16.02.2018, в кілька десятків разів. Згідно з аналізом отриманих даних про викиди, 72% загальних обсягів зольного пилу, що викидається вугільними електростанціями сукупно в ЄС, країнах-членах Енергетичного Співтовариства та Туреччині,

надходить від українських ТЕС. Серед 30 великих спалювальних установок з найвищими викидами золи — 18 українських ТЕС.

У підтвердження даних звіту автори дослідження [28] провели аналітичну роботу, яка охопила аналіз викидів від вугільних електростанцій у повітря з 27 країн-членів ЄС, Великої Британії, Туреччини, а також країн-членів Енергетичного співтовариства (в т.ч. і України). Забруднення повітря оцінювали за трьома показниками викидів: SO_2 , NO_x та PM_{10} (тверді мікрочастинки, розміром до 10 мікронів). Основні висновки даного дослідження:

- Українські вугільні електростанції відповідальні за 72% викидів PM_{10} .
- Україна генерує 27% викидів SO_2 . Серед 30 електростанцій, які забруднюють атмосферу викидами SO_2 , 12 — з України.
- Найбільше викидів оксидів азоту виробляє Туреччина (20%). Далі — викиди з електростанцій Німеччини, України (по 16%) та Польщі (14%).

Україна виробляє 34% споживчої енергії на 20 вугільних електростанціях, які збудували ще до 1976 року. На жодній із них, крім другого енергоблоку Трипільської ТЕС, немає обладнання для десульфуризації — очищення димових газів від сполук сірки.

Дослідники вказують, що Україна має потенціал до розвитку альтернативних джерел енергії, зокрема від сонця та вітру. Експерти прогнозують, що Україна могла б відмовитися або значно скоротити використання вугільних електростанцій до 2030 року.

Укріплення державності України, можливість входження її повноправним членом у ЄС передусім вимагають вирішення проблем організації сталих і надійних шляхів забезпечення паливно-енергетичними ресурсами, зменшення залежності від імпорту енергоносіїв та передусім їх ефективного використання. Україна відноситься до найбільш енергоємних країн не лише Європи, а і світу в цілому, зумовлюючи ріст економічних і національних ризиків, що з цим пов'язані. Близько 40% енергоносіїв Україна змушена закуповувати за кордоном [29]. Лише природного газу, одного з

найбільш вживаних енергоресурсів, Держава змушена закуповувати за кордоном близько 10 млрд м³/рік. Впродовж крайнього десятиліття це значення еквівалентне третині від значень фактичного використання цього ресурсу основними категоріями споживачів (населенням, виробниками теплоти, промисловістю, небюджетними організаціями та ін.) [30].

Світові вектори розвитку енергетики направлені на лібералізацію енергетичних ринків, зростання частки ВДЕ в енергетичних балансах регіонів, де це є можливим.

Паливо-енергетичний комплекс (ПЕК) нашої Держави – складна взаємопов’язана структурна система виробництва палива та енергії (електроенергії й теплоти), їх транспортування, розподілу і безпосереднього використання. До його складу входять паливна (нафтова, газова, вугільна, сланцева, торфова) промисловість та електроенергетика, які тісно пов’язані з усіма іншими галузями господарства. Логістична доступність паливно-енергетичних ресурсів (ПЕР), економічно конкурентна їх вартість є основою формування та успішного функціонування багатьох виробничо-промислових комплексів і водночас підґрунтям для сталого розвитку ПЕК конкретного регіону чи країни загалом [31, 32].

Геополітична ситуація, енергетичний перехід України на шляху до євроінтеграції, що направлений на декарбонізацію економіки шляхом підвищення енергоефективності та енергозбереження, також стимулює в нашій Державі стрімкий розвиток відновлюваних джерел енергії.

Проте, розглядаючи перспективи ВДЕ для України важливо розуміти базову та наявну структуру ПЕК та безпекову складову енергогенеруючих станцій.

Військові дії на території нашої держави, тимчасова окупація північно-східних та південних територій України, ракетні атаки призвели до втрати близько 10 ГВт потужностей різних видів генерації, основу яких становить Запорізька АЕС - 6 ГВт. Крім того, на станом на травень 2023 року більше 25% встановленої потужності ВДЕ розміщуються на непідконтрольних

Україні територіях (зокрема близько 75% вітроелектростанцій та до 15% об'єктів сонячної енергетики). Тому для об'єктивної оцінки енергоспоживання, доступності типових балансових потужностей взято саме передвоєнний 2021 рік (як базовий).

Згідно інформації, наданої Міністерством Енергетики України [32], у 2021 р. фактичний обсяг виробництва електричної енергії електростанціями України у цілому склав 156 575,7 млн кВт·год, що на 7 719,5 млн кВт·год, або на 5,2 % більше, ніж за 2020 рік. Порівняльну структуру виробництва електроенергії наведено в таблиці 1.3.1.

Табл. 1.3.1 Порівняльна структура виробництва електроенергії за 2020 - 2021 рр.

Вирібок електроенергії	2020 рік	2021 рік	Відносно 2020	
	млн кВт·год	млн кВт·год	млн кВт·год	%
Всього	148856,2	156575,7	7719,5	5,2
ТЕС та ТЕЦ, з них:	52360,8	45834	-6526,8	-12,5
ТЕС ГК	39562,4	37224,9	-2337,5	-5,9
ТЕЦ та когенераційні установки	12798,4	8609,1	-4189,3	-32,7
ГЕС та ГАЕС, з них:	7583,9	10445,8	2861,9	37,7
ГЕС	6026,5	9155,4	3128,9	51,9
ГАЕС	1557,4	1290,4	-267	-17,1
АЕС	76202,6	86205,4	10002,8	13,1
ВДЕ	10862	12519,7	1657,7	15,3
Блок-станції	1846,9	1570,8	-276,1	-14,9

Основну частку в загальному виробітку у 2021 році складав виробіток АЕС – 55,1%, ТЕС та ТЕЦ – 29,3%, а виробіток ГЕС та ГАЕС – 6,7%. У 2020 році частка виробітку АЕС, ТЕС та ТЕЦ і ГЕС та ГАЕС складала відповідно 51,2%, 35,2% і 5,1%. Для наглядної ілюстрації частки в загальному виробітку електроенергії у 2020 та 2021 рр. проілюстровано у відсотковому співвідношенні на рисунку 1.3.2.

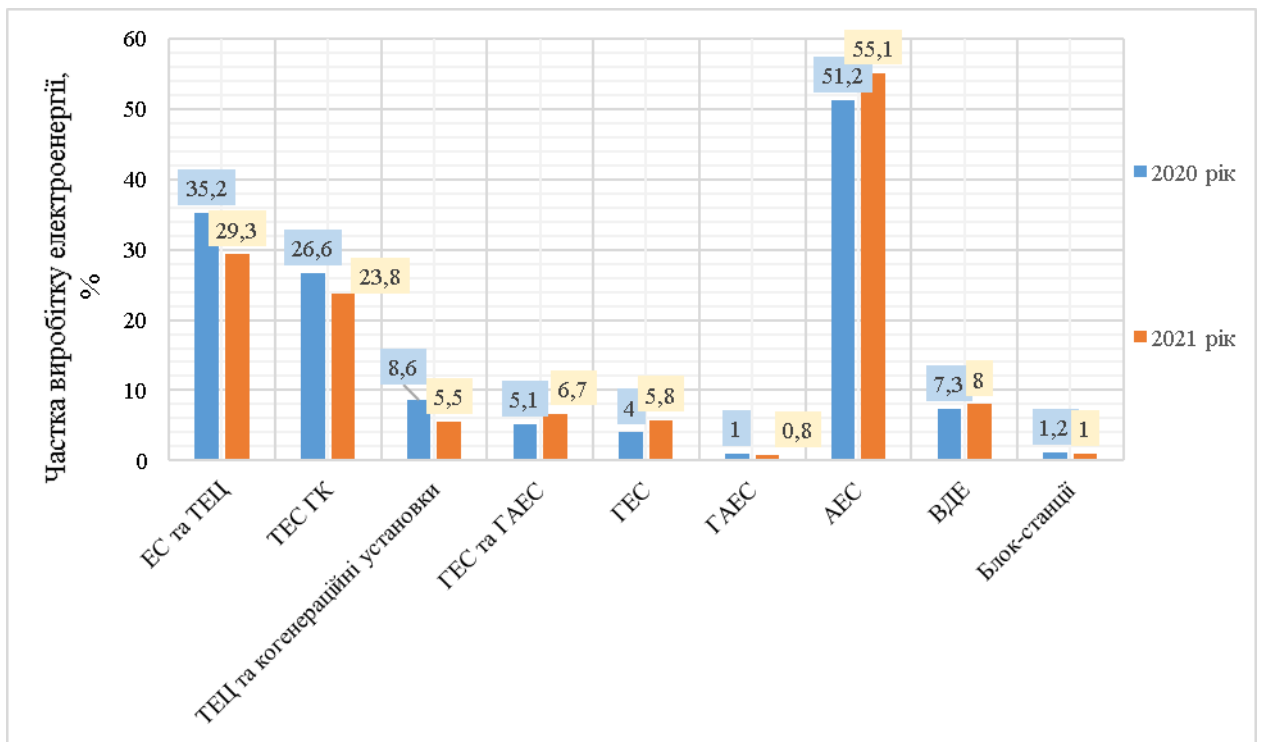


Рисунок 1.3.2 - Частки в загальному річному виробітку електричної енергії основними групами генеруючих потужностей за період 2020 і 2021 рр..

Аналіз таблиці 1.3.1 та рисунку 1.1.2 показує, що у 2021 році знизися виробіток електроенергії саме на ТЕС та ТЕЦ (на 5,9% та 32,7% відповідно), а збільшився на ГЕС та ГАЕС та АЕС.

Щодо нетипового (в т.ч. за структурою виробництва електричної енергії) 2022 року - загальне виробництво електроенергії в Україні в порівнянні з 2021 роком скоротилося на 27,5%. Зокрема, зниження за рахунок скорочення виробництва е/е на АЕС на 28%, на ТЕС – на 35%, на ТЕЦ – на 32%, а генерація ВДЕ – на 36%. При цьому ГЕС збільшили своє виробництво на 6,5%, а ГАЕС відпрацювали на рівні 2021 року [33]. При цьому з зупинкою ЗАЕС (потужність близько 6000 МВт) та частковою руйнацією сонячних електростанцій, пікових потужностей вистачає. Очікувано, що подальші зміни у структурі виробництва електричної енергії можуть продовжуватись, зважаючи на можливі теракти спрямовані на енергетичні об'єкти України і

виведення з ладу Каховської ГЕС 6 червня 2023 року. Ці всі фактори негативно впливають і розбалансовують енергосистему Держави.

Тенденція енергетичної безпеки є актуальною для нашої Країни. "Енергетичною стратегією України до 2035 року" (ЕСУ) [34], що схвалена 18 серпня 2017 року, передбачено стратегічні вектори розвитку ПЕК України на період до 2035 року. Одним з ключових напрямків визначено значний розвиток ВДЕ (в порівнянні з іншими видами генерації), що дозволить збільшити їх частку у структурі загального первинного постачання енергії до 25 %. Загалом стратегією визначено три основні етапи реалізації стратегії, кожен з яких має свій конкретний план дій, для забезпечення реалізації всіх завдань цього документу.

Інститутом економіки і прогнозування НАН України було підготовлено Звіт [35], у якому розраховано три сценарії розвитку енергетичного сектору до 2050 року за допомогою математичних комп'ютерних моделей. За одним із прогнозованих сценаріїв, ВДЕ до 2050 року може замінити обсяг виробництва АЕС, але для цього потрібно врахування специфіки енергії, отриманої з ВДЕ, а саме: нестабільність генерації, невисокі технічні показники та великі обсяги необхідних резервних потужностей. Ці аспекти ще додатково збільшують вартість енергії виробленої з ВДЕ, в порівнянні з традиційною його генерацією.

Зараз вже зрозуміло, що розвиток ВДЕ повинен не лише задовольняти політичні амбіції, а в першу чергу корелюватись і доповнювати наявну структуру національної енергетики, аби вона працювала збалансовано. Держава має будувати свою нову енергетичну стратегію з баченням скорочення використання викопного палива та обґрунтованого переходу до відновлюваних джерел енергії.

Так, фактично через такий дисбаланс викликаний геополітичною ситуацією, розробляється Енергетична стратегія України на період вже до

2050 року, основними цілями якої є енергетична безпека, енергоефективність, виконання екологічних зобов'язань [36], а саме:

1. Забезпечення комплексної захищеності інфраструктурних об'єктів енергетичного сектору;
2. Досягнення максимального рівня кліматичної нейтральності та збільшення використання низьковуглецевих джерел енергії;
3. Оновлення та модернізація енергетичної інфраструктури за найкращими світовими стандартами;
4. Підвищення ефективності використання енергетичних ресурсів в енергетичному секторі та суміжних секторах економік;
5. Всебічна інтеграція з енергетичними ринками ЄС та забезпечення ефективного функціонування внутрішніх енергетичних ринків;
6. Зменшення енергетичної бідності, захист вразливих споживачів, гендерна і соціальна інклюзія;
7. Забезпечення енергетичного сектору власними ресурсами із врахуванням економічної та ринкової доцільності;
8. Забезпечення енергетичного сектору інноваційними рішеннями.

Саме тому важливо, щоб розвиток ВДЕ, як один з можливих перспективних сценаріїв для покращення екологічної та енергетичної ситуацій, заміщення блоків АЕС, що виводяться з експлуатації, та здолання енергетичної бідності в нашій Країні не призвів до руйнації енергосистеми через неадаптивність до сучасної енергосистеми України [37].

1.4. Можливості та перспективи водню для України. Огляд української водневої стратегії

Основним інструментом переходу з існуючої «енергетичної» до епохи «збалансованої енергетики», як уже згадувалось вище, має стати раціональне використання енергетичних ресурсів. Вже давно назріває необхідність у новій концепції системи централізованого теплопостачання 4-го та 5-го

поколінь. Вже сьогодні спостерігається інтенсивний пошук нових підходів для підвищення ефективності функціонування СЦТ [38, 39]. Характерними рисами систем централізованого опалення 4-го і 5-го поколінь та систем охолодження є [40]:

- Забезпечення низькотемпературним централізованим теплопостачанням для потреб гарячого водопостачання і опалення приміщень;
- Розподіл енергії в системі з мінімальними втратами в мережі;
- Повторне використання відпрацьованої енергії та інтегрування поновлюваних джерел енергії;
- Поєднання з розумними енергетичними системами;
- Накопичення більших об'ємів енергії;
- Сприяння використанню централізованого теплопостачання для перетворення теплової енергії, застосування теплових pomp для підвищення ефективності мережі та їхнього використання одночасно з потребою в охолодженні.

Так, автори [41] передбачають, що після 2050 року основні заходи в енергетиці будуть спрямовані на використання ВДЕ, і використання водневих технологій може бути одним з шляхів впровадження ВДЕ. В такому ключі водень може бути проміжним продуктом для зберігання надлишкової електроенергії і сприятиме вирішенню цієї проблеми [42].

Потенційно можливий обсяг виробництва «зеленого» водню в Україні розраховано за результатами проведених наукових досліджень спеціалістами Інституту відновлюваної енергетики НАН України щодо потенціалу генерації електроенергії вітро- та фотоелектричними станціями. Для розрахунку потенційно можливого обсягу виробництва «зеленого» водню за допомогою електролізу води передбачено питоме споживання електроенергії 4,5 кВт·год/нм³ H₂ або 50,56 кВт·год/кг H₂. Можливий розподіл потенційного

середньорічного виробітку «зеленого» водню на території України представлено на рисунку 1.4.1 [43].



Рис. 1.4.1 - Розподіл потенційного середньорічного виробітку «зеленого» водню на території України

З рисунку 1.4.1 можна бачити, що загальний потенціал середньорічного виробництва «зеленого» водню може становити понад 505 млрд м³ (близько 50 000 тис.т). Одним із вагомих факторів, як зазначалось вище, що обмежує виробництво водню, є висока вартість технологій його отримання. Проте наявні прогнози є надто позитивними, а саме через спрощення і, відповідно, здешевлення технологій отримання «зеленого» водню, його вартість прогнозовано може знизитись до 0,8 дол/кг (сьогодні це значення еквівалентне 2,5-6,8 дол/кг).

Ідею транспортування водню у ЄС через українську ГТС в найближчі кілька десятиліть розглядає і "Оператор газотранспортної системи України" [44]. Проте у тому контексті, про який йде мова, використання водню для

нашої держави не є актуальним. Для транспортування водню необхідно проводити модернізацію трубопроводів, адже в Україні переважна більшість труб є сталевими і збудованими ще у 60-70-х роках. Основною ж проблемою є запірна арматура. Подача у них водню може спричинити додаткову корозію і витіки водню в атмосферу. Хоча руйнування металу процес тривалий і потребує значного часового проміжку, але з огляду на вік української ГТС проблема проникнення водню може бути гострішою.

Так, станом на 2021 рік у світі налічувалось всього до 5 тис. км спеціалізованих водневих трубопроводів, більша частина яких знаходиться у США [45].

На п'яти полігонах України провели експерименти для дослідження поведінки водню у газорозподільній системі. Випробування проводили спеціально підготовані для роботи з воднем фахівці РГК спільно з вченими Національної академії наук України та Івано-Франківського національного технічного університету нафти і газу. Проект унікальний тим, що для експерименту використали суміш, яка містила 99% водню. Використовувати чистий водень поки що забороняє українське законодавство. Дослідження було заплановано у кілька етапів:

- Підготовка (08.01.2020-30.06.2020);
- Статичні випробування на полігонах (6.08.2020 – 30.06.2021);
- Динамічні випробування на полігонах (22.10.2022 – 30.06.2022) – через початок військових дій даний етап не завершено.

Перші випробування показали, що ділянки середнього тиску, які мали достатню для експлуатації герметичність на природному газі, на водні показали значні витіки, які склали 0,25-0,4 %/год і не відповідали вимогам на герметичність. Типовими місцями витоків були різьбові та муфтові з'єднання із застосуванням сучасних ущільнюючих матеріалів, місця під'єднання датчиків тиску та регуляторів, а також зварні шви, в тому числі і заводського виконання. Також слід зауважити, що H_2 є леткий газ і подавати

його до багатоквартирних будинків є аварійно небезпечно. Наступним логічним етапом як продовження даного дослідження є наукове супроводження експериментів транспортування сумішей водню та природного газу розподільними газопроводами.

Оцінка впливу газових сумішей водню різної концентрації з метаном ($10\%H_2/90\%CH_4$ та $20\%H_2/80\%CH_4$) на експлуатаційні та теплофізичні характеристики поліетиленових труб ПЕ-80 та їх матеріал, які попередньо експлуатувалися у діючих газорозподільних мережах України впродовж 15 років, після 6 місяців їх наводнювання здійснена фахівцями Інституту електрозварювання ім. Є.О. Патона НАН України, Інституту хімії високомолекулярних сполук НАН України, Інституту газу НАН України і описана в роботі [46]. Проаналізовано вплив вищезазначених сумішей на властивості матеріалу поліетиленових труб, наявність такого впливу визначалась зменшенням розмірів кристалітів поліетилену та їх упорядкованості в об'ємі стінок труб під дією газових сумішей. Було проведено механічні, гідравлічні дослідження (рисунок 1.4.2), зроблений аналіз на термічну стабільність та термоокислювальну деструкцію матеріалу поліетиленових труб.

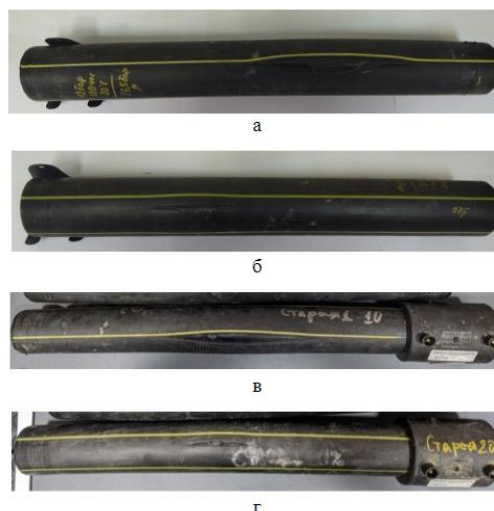


Рис. 1.4.2 - Загальний вигляд зразків після гідравлічних випробувань на стійкість труб до внутрішнього тиску після руйнування:

а — до наводнювання ST1; б — до наводнювання ST2; в — ST1 після 6 міс наводнювання сумішшю 10%H₂/90%CH₄; г — ST2 після 6 міс наводнювання сумішшю 20%H₂/80%CH₄

Встановлено залежність між концентрацією водню в суміші та ступенем його впливу на міцнісні характеристики зразків. Змін у хімічній структурі матеріалу поліетиленових труб не виявлено. Слід зауважити, що наведені результати є лише першим етапом більш глобального дослідження, в ході якого планується дослідити вплив водневих сумішей на технічні поліетилени також після 12 та 24 місяців їх наводнювання.

Тому ідея транспортування водню, що згенерований в Україні, до Європи на сучасному етапі виглядає більш як утопічною, так як відсутні механізми для реалізації цього процесу. Більш доцільно, як вважає авторка, локальне використання водню на території України. Запропоновані способи реалізації водню як енергоносія в процесах спалювання представленні нижче в дисертаційному дослідженні.

Водень є одним з інструментів декарбонізації та кліматичної політики як в Україні, так і в Європі. Проєкт Української водневої стратегії містить повний перелік заходів, які необхідні для “зеленої” трансформації України [47]. Зокрема, в документі визначено, як виробництво та використання “зеленого” водню може допомогти декарбонізувати економіку України та покращити її стан. Воднева стратегія України, робота над якою активно триває, має сприяти комплексному розвитку галузі та враховувати всі етапи водневої енергетики: від виробництва енергоносія до його транспортування, зберігання та використання.

Вагомим фактором розвитку прогнозованої енергетики є оптимальне співвідношення пікових (ТЕС, ТЕЦ, ГЕС) і базових (АЕС, ВДЕ) потужностей, ідеальний варіант 1:1 [48]. Співвідношення по виробництву енергії на таких потужностях у 2021 році в Україні становило 0,64:1. Тобто джерела, що генерують близько 38 млн кВт-год, потребують маневрових потужностей для регулювання.

Враховуючи втричі меншу об'ємну теплотворну здатність водню у порівнянні з природним газом (2750 ккал/м³ та 8250 ккал/м³ відповідно) та потенційний обсяг виробництва «зеленого» водню (станом на 2021 рік 505 млн м³), для заміщення обсягів природного газу, що було спожито в Україні у 2021 році (26,8 млрд м³), потрібно було б 80,4 млрд м³ водню, тобто вказаний потенційний обсяг виробництва «зеленого» водню становить менше 1% (0,62%) потреби. При плановому зростанні частки ВДЕ до 2050 року вдесятеро і відповідно збільшення обсягів «зеленого» водню до 5 млрд м³ [49], ймовірна частка заміщення природного газу може зрости пропорційно в десять разів. Але звичайно про повне заміщення мова не йде.

Наступне важливе питання - в яких установках спалювати водень. Зрозуміло, що котли мають бути повністю адаптовані для роботи з таким енергоносієм, який має відмінні теплотехнічні характеристики від традиційних видів палива, таких як наприклад природний газ. Більш доцільніше спалювати водень у невеликих котельних установках, проте на сьогодні єдиний завод з серійного виробництва таких установок, який знаходився у Італії, вже не працює. Найбільш ймовірне використання водню як енергоносія в найближчій перспективі, на думку здобувачки, розглянуте в наступних розділах.

1.5. Використання твердих побутових відходів як енергоресурсу і роль водню в процесах їх спалювання

На сьогодні в Україні, особливо в умовах військової агресії проти нашої держави, однією з найбільших загроз національній безпеці є енергетична залежність України від імпорту природного газу; зменшення цієї залежності є першочерговим завданням для забезпечення стабільної роботи енергосистеми України. Одним з потенційних шляхів вирішення цього завдання є використання енергетичного потенціалу твердих побутових відходів (ТПВ). Провідні країни світу розглядають тверді побутові відходи як альтернативний локальний енергоресурс, який є невід'ємною частиною соціального життя

країни і постійно утворюється, до того ж зручний логістично – в населених пунктах, поблизу споживачів енергії.

ТПВ у своєму складі зазвичай мають високий відсоток органічної фракції, саме тому для їхньої переробки найчастіше застосовують такі термічні методи, як спалювання, низькотемпературний піроліз, високотемпературний піроліз та ін. [50].

Важливими перевагами сучасних методів термічної переробки ТПВ є: використання їх енергетичного потенціалу (енергетичне відновлення), знешкодження патогенної мікрофлори, що може міститись у складі відходів, значне зниження об'ємів самих відходів.

Наразі перспективним напрямом є розроблення спеціальних цільових програм енергоутилізації ТПВ на підприємствах – виробниках теплової енергії, метою якої є залучення енергетичного потенціалу ТПВ за рахунок їх енергетичного відновлення в енергетичний баланс регіону.

Сьогодні в Україні експлуатується єдиний сміттєспалювальний завод «Енергія» КП «Київтеплоенерго» (м. Київ), що в промисловому обсязі спалює ТПВ. Встановлена теплова потужність становить 104 Гкал/год, корисна - 75,5 Гкал/год. Принципова схема устаткування заводу наведена на рисунку 1.5.1.

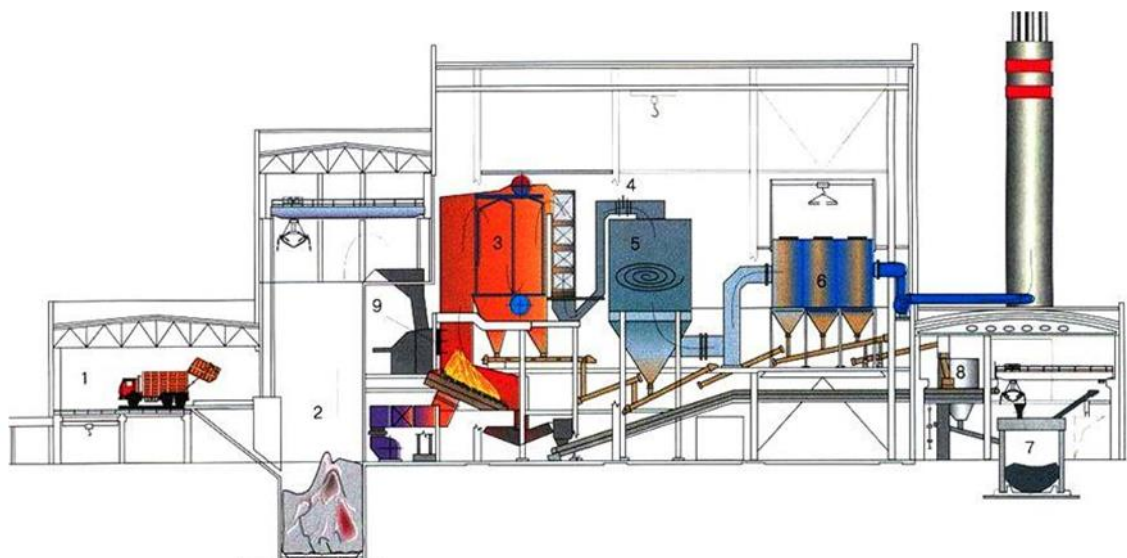


Рис.1.5.1 - Принципова схема устаткування заводу «Енергія» КП «Київтеплоенерго»:

1 – склад прийому ТПВ, 2 – бункер відходів, 3 – котлоагрегат, 4 – реактор летючого потоку, 5 – абсорбер, 6 – блок рукавних фільтрів, 7 – бункер шлаку, 8 – бункер золи, 9 – система пригнічення утворення окислів азоту, 10 – димова труба

Фактична потужність заводу «Енергія» зі спалювання ТПВ становить 240 тисяч тонн на рік.

Підприємство включено до системи теплопостачання міста. Здобувачка була однією із розробниць СЦТ м. Києва на період до 2030 року. Саме за її участі було прийнято концептуальні рішення щодо розвитку СЦТ на наступне десятиліття, які включають як реконструкцію існуючого об'єкту, так і будівництво нового заводу з сортування та термічної переробки ТПВ, загальною прогнозованою встановленою електричною потужністю 20 МВт (теплова потужність: близько 80 Гкал/год, з них 34 Гкал/год від когенерації).

Відповідно до законодавства ЄС [51], яке зараз імплементується в українське законодавство, сміттєспалювальні заводи повинні бути спроектовані, обладнані, побудовані та експлуатовані таким чином, щоб температура горіння навіть за найнесприятливіших умов підтримувалася на рівні щонайменше 850 °С протягом щонайменше двох секунд. Ці умови забезпечують найбільш повну утилізацію небезпечних речовин, таких як діоксини та фурани, що утворюються при спалюванні відходів. Для відходів, що містять більше 1 % галогенізованих органічних речовин у перерахунку на хлор, ця температура має становити щонайменше 1100 °С. Підтримання необхідної температури зазвичай вимагає додаткового підігрівання. Найбільшого поширення набули способи, за якими у якості додаткового компоненту, який підвищує температуру у топці котла, є природний газ. Його сумісне горіння з твердими побутовими відходами піднімає температуру процесу до 800 - 1100°С. Проте, такий спосіб є енергетично затратним, а також збільшує емісію в атмосферу вуглекислого газу, що утворюється при горінні природного газу, отже погіршує екологічну ситуацію.

Враховуючи досить низьку теплотворну здатність звичайних ТПВ (близько 1650 ккал/кг) і навіть палива (RDF, SRF), виготовленого з ТПВ (2000 - 4000 ккал/кг), підтримання необхідної температури часто вимагає додаткового палива з високою теплотворною здатністю.

Можливим рішенням є використання водню як такого додаткового палива.

Особливість водню, яка полягає в тому, що адіабатична температура горіння водню в повітрі висока, приблизно на 260° вище ніж адіабатична температура природного газу, може бути корисною для процесів, де температура горіння зазвичай недостатньо висока, і її необхідно підвищити. Таким процесом є, зокрема, термічна переробка твердих побутових відходів.

Можливий до використання наступний спосіб. Водень генерується шляхом електролізу з використанням «зеленої» електроенергії з відновлюваних джерел (сонця, вітру тощо) або власного виробництва на ТЕЦ, і частково подається в топку котла, що спалює RDF (SRF), спричиняючи підвищення температури згоряння, та частково подається в метанізатор.

Водяна пара, що міститься в димових газах, конденсується до рідкої води, а вуглекислий газ подається в метанізатор.

Під час реакції взаємодії водню з вуглекислим газом із димових газів котлів у метанізаторі утворюється синтетичний метан, утворену метано-водневу суміш (до 10% водню) можна використовувати практично як звичайний метан, зокрема в існуючих котлах, що працюють на природному газі, або подавати до місцевої газової мережі. Вуглекислий газ, який утворюється під час подальшого спалювання такої суміші, більше не вважається викидом парникових газів, бо використовується в закритій схемі і не попадає до атмосфери.

Щорічно в Україні утворюється до 11 млн тонн твердих побутових відходів, щорічний приріст яких складає 1,5 –2% [52]. Враховуючи теплотворну здатність ТПВ на рівні 1600-1700 ккал/кг, їх енергетичний потенціал становить $17,6 \cdot 10^6$ Гкал/рік. Навіть за умови, що лише 10% ТПВ буде утилізуватись на

побудованих в перспективі сміттєспалювальних заводів, потенційний внесок теплоенергії в енергосистему становитиме до $1,76 \cdot 10^6$ Гкал/рік, що еквівалентне значенню річного виробництва теплової енергії «міста мільйонника», наприклад м. Одеса.

1.6. Водень як альтернативний енергоресурс. Дослідження процесів спалювання водню

Гідроген – перший хімічний елемент таблиці Д. Менделєєва, молекула з двох атомів якого утворює найлегшу речовину, без кольору, смаку, запаху – водень. Вперше водень був відкритий у Європі у XVIII ст. На сьогодні відомі такі прізвища як Ф. Парацельс, Р. Бойль Г. Кавендіш та А. Лавуазьє [53] – саме ці вчені вперше згадуються як першовідкривачі і дослідники цього цінного ресурсу. Використання сировинного потенціалу водню продовжується вже багато років. Головна перевага водню - високий тепловміст на одиницю маси 120,7 ГДж/т, що є основною причиною використання рідкого водню як палива для ракет, енергопостачання космічних кораблів і літальних апаратів, для яких високий енерговміст на одиницю маси має першочергове значення. Інтерес до потенціалу водневої енергії виявляли радянські вчені з Харківського авіаційного інституту ще на початку другої половини XX ст. [54, 55].

Проте результати розробок часто носили секретний стратегічний характер, а отже не могли в повній мірі представлятись та обговорюватись світовою науковою спільнотою. Вже понад 30 років над проблематикою використання водню працюють Інститут проблем машинобудування ім. А. М. Підгорного та Інститут відновлюваної енергетики НАН України. Країни ЄС, США, Канада, Японія, Китай також вже понад 30 років освоюють можливості, які дає водень. Існують різні способи використання водню – світова практика показує позитивні результати при додаванні 5-20% водню до природного газу. Професор С.О. Кудря говорить про можливості додавання до 25 % водню в газову мережу [56] та транспортування

трубопровідним транспортом в ЄС, застосування водневих технологій для акумуляції та передачі «зеленої» енергії, виробництва металургійної, хімічної продукції, а також у транспортному секторі.

Останнім часом використання водню в промисловості широко обговорюється, теплоенергетика є дуже енергоємним комплексом із сталими виробничими процесами, тому необхідні перехідні технології для адаптації у цих процесах, що вимагають більш тривалого періоду вивчення можливостей використання водню [57]. Сучасні дослідження показують, що водень може виступати альтернативою для заміни енергетичних потреб у секторі індустрії, потреб побутового сектору і сектору індивідуальних споживачів, основні сектори його використання наступні: у двигунах внутрішнього згорання, у ракетній техніці, у процесах зварювання металів, у металургійних процесах, у паливних елементах [58-62].

Проте, при розгляданні водню як сировини вже в енергетичних цілях (як джерело отримання енергії для промислових процесів) - питання вартісної доцільності використання цього компонента набуває першочергового значення.

Водень можна отримати з його підземних родовищ, виділивши з викопного палива, наприклад, крекінгом чи піролізом метану з відходів біомаси, або термохімічним способом. Але особлива увага у всьому світі прикута до технологій отримання шляхом електролізу води та використання т. з. «зеленого водню». Якщо фінансові питання доцільності та окупності таких процесів віднести на другий план, то існує багато варіантів його технічного отримання, наприклад, завдяки електролізу води з використанням енергії сонця або вітру. Це позитивно впливає на екологію, бо сприяє декарбонізації енергетики, промисловості та транспорту.

У 2021 році компанія ДТЕК підписала угоду з Siemens Energy про пілотний проєкт з виготовлення «зеленого» водню. Планувалось встановлення електролізера потужністю 8,5 МВт на Маріупольському металургійному комбінаті, вартість якого становить 25 млн євро. Проєкт був

спрямований на виробництво сталі з низьким викидом CO₂ [63]. Наразі через тимчасову окупацію території проект призупинив свою діяльність.

Тести воднем пройшли п'ять моделей шафових газорегулюючих пунктів, виготовлених на заводах RGC Production у Львові та Дніпрі. Запуск такого обладнання, як заявляється, в перспективі дозволить експлуатувати газові мережі з доданням до природного газу 20 % водню. Також RGC Production планує почати випуск вузлів обліку газу та газорегуляторних пунктів блочного типу, які зможуть працювати з воднем [64].

Стійке зниження вартості відновлюваної енергії, розвиток технологій і гостра необхідність в зниженні викидів парникових газів сформували високий попит і в перспективі широкі можливості застосування водню.

На цей час водень, як відносно CO₂-нейтральний енергоресурс, привертає зростаючу увагу в ЄС і в світі в цілому. При використанні водню як енергоресурсу, викиди CO₂ відсутні, що є ефективним рішенням в декарбонізації промислових процесів і секторів економіки, де зниження викидів парникового газу CO₂ є вкрай необхідним [65]. Але водяна пара, яка утворюється при спалюванні водню - це теж парниковий газ, і якщо не використовувати конденсаційні схеми, то очікувана «декарбонізація» не реалізується, тобто простий перехід на водень суттєво не зменшить викиди парникових газів.

Одним з перспективних напрямків з промислового використання водню є використання його в якості палива на об'єктах енергетики, промислових підприємствах і міських опалювальних котельнях, на яких у найбільшій кількості (серед інших викопних палив) використовується природний газ. Разом з цим важливо розуміти відмінності в теплотехнічних характеристиках природного газу і водню (таблиця 1.6.1).

Таблиця 1.6.1. Основні характеристики природного газу і водню

Характеристики	Одиниця вимірювання	Природний газ, CH ₄	Водень, H ₂
Калориметрична	°C	2211	2471

Характеристики	Одиниця вимірювання	Природний газ, СН ₄	Водень, Н ₂
температура			
Температура запалювання	°С	645	510
Усереднене значення теплотворної здатності	Гкал/м ³	8520	2750
Q _В / Q _Н	%	111	118
Густина	м ³ /кг	0,087	0,716
Число Воббе	МДж/нм ³	4,07	48,2
Швидкість розповсюдження полум'я	м/с	0,38	2,6

Усереднене значення теплотворної здатності для водню на одиницю об'єму приблизно втричі менше, аніж для природного газу. Тобто при використанні суміші, яка містить прогнозовані 20 - 25 % водню, теплотворна здатність становитиме вже не 8250 Гкал/м³, як це могло бути для чистого метану, а відповідно близько 6875 Гкал/м³. На рисунку 1.6.1 зображено залежність теплотворної здатності паливної суміші, що містить водень, від його вмісту в одиниці об'єму палива.

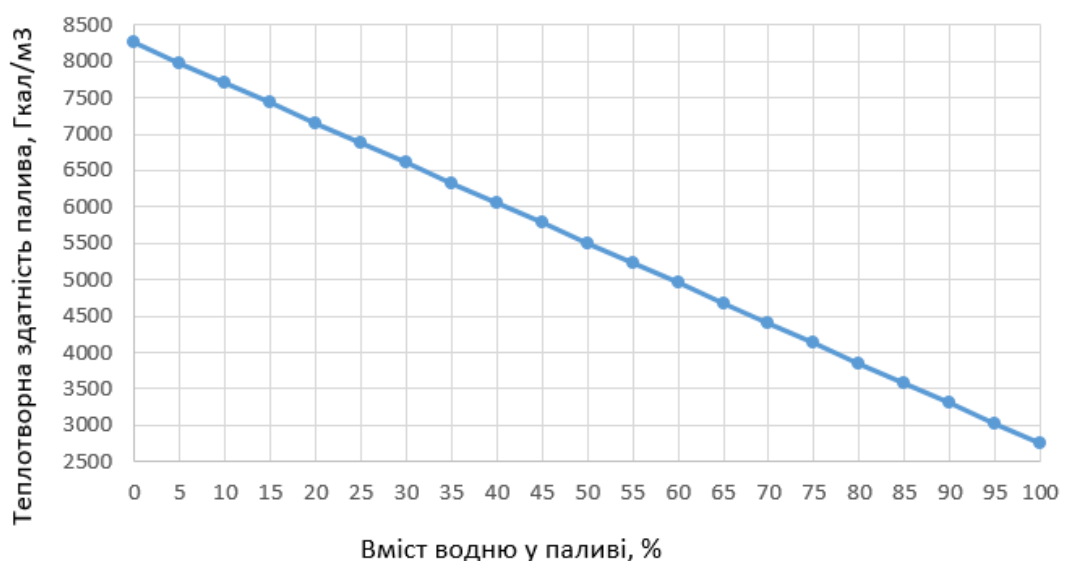


Рис. 1.6.1 – Залежність теплотворної здатності паливної суміші від вмісту у ній водню

Здобувачкою запропоновано введення коефіцієнту K_N , який описує зміну теплотворної здатності одиниці об'єму палива в порівнянні з природним газом.

$$K_N = \lambda / \lambda_{п}, \quad (1.6.1)$$

Для природного газу з теплотворною здатністю 8250 ккал/куб.м:

$$\lambda = -55 \cdot N + \lambda_{п}, \quad (1.6.2)$$

де λ - теплотворна здатність суміші палива, що містить частку водню, ккал/куб.м.

$\lambda_{п}$ - теплотворна здатність природного газу, до якого додається водень (в розрахунках прийнято $\lambda_{п}=8250$ ккал/куб.м) .

N – частка (об'ємна) водню у паливі, %.

У таблиці 1.6.2 приведені значення K_N та теплотворної здатності паливної суміші ($CH_4 + H_2$) залежно від частки водню в її складі. Представлені співвідношення паливних складових « $H_2 - CH_4$ », які найбільш часто обговорюються в сучасній літературі.

Таблиця 1.6.2 Залежність теплотворної здатності палива від вмісту у ньому водню

Складові палива:	Вміст відповідних компонентів паливної суміші, %						
	- CH_4	100	90	80	75	70	50
- H_2	0	10	20	25	30	50	100
Теплотворна здатність паливної суміші, Гкал/м ³	8250	7700	7150	6875	6600	5500	2750

Значення K_N	1,00	0,93	0,87	0,83	0,80	0,67	0,33
----------------	------	------	------	------	------	------	------

Так, знижена теплотворна здатність паливної суміші не дає можливості роботи котельного агрегату відповідно до його режимної карти, що неминуче призводить до зниження теплопродуктивності котлоагрегату, і відповідно для відпуску тієї ж кількості теплової енергії потрібна більша об'ємна витрата палива, якщо її дозволяє котел, або введення в експлуатацію додаткового котлоагрегату.

Пропускна здатність котла по об'єму газу є величина постійна, що обумовлена розмірами газоходів котла, швидкістю руху суміші, потужністю тягодуттєвих пристроїв. У випадку зміни теплотворної здатності, необхідно забезпечити відповідну зміну швидкості подачі палива і окисника, адже в протилежному випадку відбудеться проскок полум'я в пальник. Визначено, що для спалювання $1\text{ м}^3 \text{ H}_2$ необхідно подати вже не 10,8, як для природного газу, а $18,5 \text{ м}^3$ повітря. При концентрації водню у суміші з природним газом до близько 15%, зміна числа Воббе відбувається в допустимому інтервалі +/- 5%; при вмісті H_2 у суміші з CH_4 понад 15% виникає необхідність заміни пальникових пристроїв.

Енергетичні, технологічні котли і котли опалювальних котелень є джерелами забруднення атмосфери зокрема викидами оксидів азоту. У ряді випадків екологічні показники існуючих котлів за викидами оксидів азоту не відповідають вимогам екологічного законодавства, що посилюються [66], і котли знаходяться під загрозою заборони на їх подальшу експлуатацію.

Метою Національного плану скорочення викидів від великих спалювальних установок (НПСВ) [67,68] є поступове скорочення викидів діоксиду сірки (SO_2), оксидів азоту (NO_x) та дрібнодисперсного пилу від існуючих великих спалювальних установок (ВСУ), номінальна теплова потужність яких становить 50 МВт і більше. Строк дії Національного плану скорочення викидів – 2018 - 2033 роки. Відповідно до НПСВ, станом на 2034 рік вміст шкідливих речовин в димових газах ВСУ має відповідати

вимогам європейської Директиви 2010/75/EU [69]. У 2021 році в Україні експлуатувалось 223 ВСУ загальною встановленою тепловою потужністю 116 ГВт. До НПСВ включено 90 ВСУ загальною номінальною тепловою потужністю 65 ГВт, оператори яких зобов'язалися спорудити нові газоочисні системи. За час дії НПСВ валові викиди SO_2 від всіх ВСУ, включених до НПСВ, мають знизитися в 19,9 рази (з 1017034,5 т до 51004,4 т), викиди пилу – в 39,8 рази (з 205878,2 т до 5172,0 т), а викиди NO_x повинні зменшитися в 3,6 рази (з 191300,3 т до 53791,3 т). Щорічне скорочення валових викидів пилу має становити майже 20 тис. т, SO_2 – близько 96 тис. т, NO_x – близько 9,2 тис. т. [70].

Як уже зазначено вище, використання водню в якості палива на об'єктах енергетики промислових підприємств і міських опалювальних котелень є одним із перспективних напрямків його використання. Традиційно на таких теплоджерелах найчастіше використовується природний газ.

Супутні процеси, пов'язані з використанням водню у енергетичних процесах, не є простими та безпечними. При розгляді питання розвитку водневих технологій слід зважати на ризики, які несе з собою цей процес.

Сьогодні можливе використання водню в котлах систем теплозабезпечення, а також енергетичних котлоагрегатах, пов'язане з наступними проблемами, які потрібно вирішити перш ніж використовувати водень безпосередньо або як частину паливної суміші на наявному котельному обладнанні:

- Адіабатна температура горіння водню на 260°C вища, аніж адіабатна температура горіння природного газу
- Низька теплотворна здатність H_2 на одиницю об'єму близько 2750 ккал/м³ становить лише третину від значень для природного газу.
- Не вирішені проблеми стабілізації факелу (спостерігається відрив полум'я газо-водневої суміші від сопла пальника).
- Підвищення утворення оксидів азоту за рахунок «термічних NO_x » при спалюванні водню та водневих сумішей в атмосферному повітрі;

- Швидке зношення матеріалу пальника, а саме завихрювача, через властивість водню підвищувати крихкість металу;
- Організація відводу води з димової труби (захист від корозії).
- Більш жорсткі умови експлуатації котлів, що працюють на водневих сумішах. Водень є більш вибухо- та пожежонебезпечним ніж природний газ: у поєднанні з повітрям водень створює вибухову суміш – гримучий газ. Швидкість розповсюдження полум'я водню у 8 разів вища за ту ж характеристику природного газу, а воднево-кисневе полум'я має адіабатну температуру горіння 2800°C. Температура спалаху (самозаймання) водню нижча за природний газ (відповідно 510 та 645°C).
- Число Воббе для H_2 і CH_4 значно відрізняється (4,07 і 48,2 МДж/м³ відповідно), що зумовлює необхідність зміни конструктиву пальника (допустима різниця у значеннях становить близько $\pm 5\%$).

Проте, навіть за умови, якщо ці проблеми можна вирішити шляхом впровадження нових технічних рішень (які базуватимуться на результатах наукових досліджень), то практичний запуск навіть одного котла в Україні, який працював би на водні (або метано-водневій суміші) не буде можливий в умовах чинної процедури отримання дозвільних документів на експлуатацію, які надає Центральне міжрегіональне управління Державної служби з питань праці та Державний комітет України з промислової безпеки, охорони праці та гірничого нагляду. Відповідно до ДНАОП 0.00-5.08-96, для кожного котла, який працюватиме на новому виді палива, необхідно здійснити повірковий його розрахунок. На сьогодні у нормативному методі розрахунку котельних агрегатів відсутнє таке паливо, як водень. Лише після внесення змін та доповнень до цього документу такий розрахунок зможе бути здійснений легітимно.

Кількість публікацій з водневої тематики досить велика. Проте переважна більшість таких публікації присвячені аналізу способів отримання, їх економічній доцільності та уникненню можливих аварійних

ситуацій при його транспортуванні. Питання використання водню в водогрійних котлах, а також енергетичних котлоагрегатах у якості монопалива або при спалюванні у певному відсотковому співвідношенні з вже традиційним природним газом вивчене недостатньо.

Авторами [71] розглянуто сучасний стан можливостей взаємозаміщення природного газу змішаним газом із додаванням водню. Проведені експериментальні дослідження на побутових газових пристроях – кухонній плиті та побутовому опалювальному котлі – із застосуванням сумішевого CH_4 – H_2 газового палива в діапазоні вмісту $\text{H}_2 = 0$ –50%. Здійснена спроба описати побутові пальники за можливістю їх роботи на метано-водневій суміші (в діапазоні вмісту $\text{H}_2 = 0$ –50%). (рис. 1.6.2 а, б). Співвідношення $[\text{H}_2]/[\text{CH}_4]$, яке досліджувалось в паливній суміші, вказано на графіках.

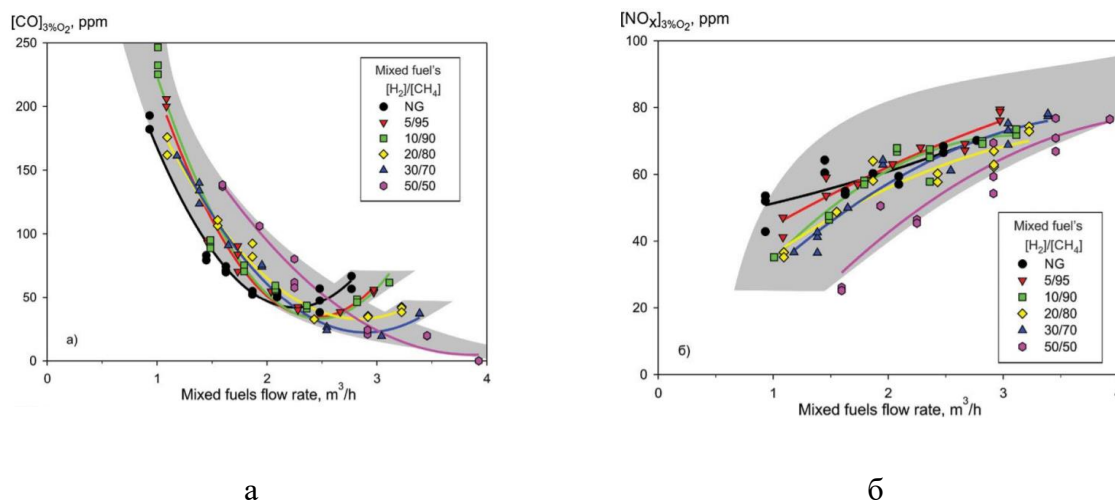


Рис. 1.6.2. - Залежність концентрації шкідливих викидів побутового двоконтурного котла RÖDA від витрат палива:
а - викидів CO , б – викидів NO_x

Добавка водню до природного газу призводить до зростання зони стійкості горіння суміші. Якщо нижня межа змінюється несуттєво (4,2 - 4,7 %), то верхня межа зростає з 14,7 до 68,3%, тобто понад у 4 рази, що надає більші можливості баластування такої суміші інертом і відповідно можливість впливати на зниження утворення оксидів азоту. З підвищенням вмісту водню в суміші з природним газом, приріст нормальної швидкості

розповсюдження полум'я збільшується лінійно. Якщо порівнювати нормальну швидкість розповсюдження полум'я для водню і природного газу (1,6 м/с і 0,282 м/с відповідно) - відмінність значень у 5,6 разів. При вмісті водню у природному газі до 30% ця величина складе 0,676 м/с – вже при таких добавках підвищиться більш як вдвічі в порівнянні з природним газом, але відомо, що для організації стаціонарного горіння потоку горюча суміш повинна поступати до фронту полум'я зі швидкістю, що дорівнює нормальній швидкості розповсюдження полум'я, і саме це є основною умовою стабілізації факелу. Як бачимо, навіть при 30%, суміші реагенту, що вводиться додатково, досягти такої умови без зміни конструкції соплового апарату не є можливим. Слід також відзначити, що значне збільшення швидкості поширення полум'я призводить до значного збільшення реакційної здатності суміші. Саме це зменшує можливість використання існуючих пальникових пристроїв в енергетичних установках. Зміна числа Воббе з неперевищенням інтервалу $\pm 5\%$ забезпечується при концентрації водню у суміші з природним газом до близько 15%. Тільки для використання таких сумішей можуть використовуватись стандартні пальникові пристрої, та що дуже важливо – відповідні стандартні газогони зі стандартним робочим тиском. Отже є велика ймовірність, що при використанні сумішей з концентраціями водню понад 15% потрібно замінювати пальникові пристрої задля запобігання «проскоку» полум'я. Якщо не змінювати пальниковий пристрій, то треба підвищувати тиск такої суміші перед пальником, що можливо, але лише в деякому невеликому інтервалі – через обмеження самої конструкції пальника.

Отримані авторами роботи [71] результати і зроблені висновки свідчать про можливість застосування досліджуваних співвідношень метан-водень у побутових газових плитах. Але ці результати не можна масштабувати для промислових пальників та загалом до всіх пальників, які встановлені в існуючих котельних агрегатах, по причині відмінності їх технічних характеристик.

Існує багато експериментальних досліджень горіння водню в енергетичних двигунах, наприклад [72,73]. Ці дослідження мали в основному на меті всебічне дослідження характеристик двигунів внутрішнього згорання (ДВС) з прямим уприскуванням водню з турбонаддувом на всій робочій карті ДВС з метою оптимізації їх продуктивності. Експерименти проводилися на 2,0-літровому двигуні внутрішнього згорання з прямим уприскуванням водню з турбонаддувом, який охоплював широкий діапазон робочих умов. Зокрема, частота обертання двигуна змінювалася від 1000 до 4000 об/хв, тиск наддуву змінювався від 3,7 до 10,6 бар.

Експериментальні результати показують, що максимальна швидкість підвищення тиску двигуна внутрішнього згорання водню з прямим уприскуванням водню з турбонаддувом (3,85 бар/°C при 1500 об/хв) при різних швидкостях двигуна при широко відкритій дросельній заслонці є вищою, ніж у двигуні внутрішнього згорання водню з турбонаддувом і вприскуванням палива. Крім того, варіації у коефіцієнті еквівалентності та моменті запалювання викликають значне збільшення швидкості підвищення тиску на 328,4% і 233,3%, відповідно. Характеристики швидкості підвищення максимального тиску дають цінну інформацію для оптимізації шуму, вібрації двигунів внутрішнього згорання з прямим уприскуванням водню з турбонаддувом. Крім того, тривалість горіння демонструє початкове збільшення та подальше зменшення зі змінами моменту початку впорскування, що допомагає визначити оптимальний момент початку упорскування для досягнення високої теплової ефективності робочих механізмів. Загалом це дослідження дає цінну інформацію про макроскопічні характеристики роботи двигуна внутрішнього згорання з прямим уприскуванням водню з турбонаддувом у різних умовах експлуатації.

У роботі [74] досліджено процеси горіння водню з точки зору оцінки ефективності горіння воднево-кисневої суміші при різних тисках і надлишку окиснювача. Для цього на основі експериментальних даних, отриманих на 4-

секційній жаровій трубі, перевірено розрахункову модель процесів горіння воднево-кисневої суміші, включаючи тепломасообмін в граничних умовах експерименту. Показано, що підвищення тиску продуктів згорання призводить до помітного зменшення недопалу водню. Максимальний ефект спостерігається в третій секції жарової труби (зменшення на 56,72 %), а мінімальний — у першій секції (зниження на 7,58 %). При цьому середнє питоме зниження недопалу водню в секціях I-IV жарової труби в межах розглянутого тиску коливалося в межах 8,13, 17,41 і 31,34 %/МПа відповідно. Збільшення надлишку окиснювача призводить до закономірного зменшення недопалу водню, максимальне зниження недопалу водню досягається при коефіцієнті надлишку окиснювача 2 у третій секції жарової труби (зниження на 58,86%). При цьому спостерігається посилення позитивного ефекту підвищення тиску. При цьому в перших двох ділянках жарової труби спостерігається найбільша залежність від збільшення коефіцієнта надлишку окиснювача. Таким чином, максимальне відносне зниження недопалу водню досягається при тиску 6 МПа і в результаті становить 24,46% і 43,5% при коефіцієнті надлишку окиснювача 1,5 і 2 відповідно.

1.7 Механізми утворення оксидів азоту в енергетичному обладнанні і основні способи їх зниження

При створенні сучасного устаткування конструктори прагнуть до того, щоб нові моделі мали кращі екологічні характеристики. Це стає все більш актуальним, оскільки незважаючи на цілий ряд прийнятих законодавчих актів, які встановлюють достатньо жорсткі обмеження викидів в атмосферу оксидів сірки, оксидів азоту, оксиду вуглецю, органічних сполук і пилоподібних частинок, їх вміст у повітрі, особливо у великих містах, постійно збільшується.

Оксиди азоту, які характеризуються високою токсичністю, здатні утворити ще токсичніші комплекси і виконують важливу роль в утворенні фотохімічних туманів (смогів). Наприклад, для нітробензола C_6H_5NO

середньодобова гранично допустима концентрація в атмосферному повітрі складає 0,008 мг/м³.

Сучасні уявлення про природу азотних сполук припускають утворення 7 різних оксидів, серед яких при горінні органічних палив найбільш вагомими при визначенні токсичності процесів горіння є монооксид NO і діоксид NO₂, а за впливом на парниковий ефект - N₂O. За специфікою механізму утворення монооксиду азоту розрізняють три основні групи оксидів: "термічні", "швидкі" і "паливні" NO. При спалюванні вуглеводневих палив, що не містять сполук азоту, (природний газ, тощо) утворення оксидів відбувається за двома механізмами: "швидкому", діючому в зоні розігрівання паливоповітряної суміші і безпосередньо в зоні горіння, і "термічному", який ґрунтується на реакції між атомарним киснем і молекулярним азотом і стає превалюючим в найбільш високотемпературній зоні факела.

Сумарний викид оксидів азоту з димовими газами можна записати у вигляді [75-77]:

$$NO_{x\Sigma} = NO_x^t + NO_x^p + NO_x^p. \quad (1.4.1)$$

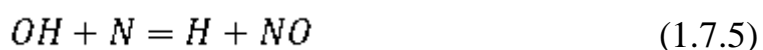
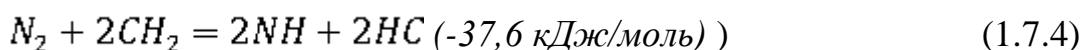
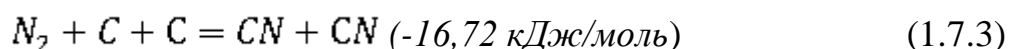
де:

NO_x^t – «термічні» оксиди азоту, суттєве утворення яких спостерігається при високих температурах (більше 1500-1600 К) за рахунок окиснення молекулярного азоту атомарним киснем. В роботі Я.Б. Зельдовича, П.Н. Садовникова і Д.А. Франк-Каменецкого [76] була показана термічна природа реакції окислення молекулярного азоту, в якій вирішальна роль відводилась атомарному кисню. Залежність концентрації оксидів азоту від концентрації атомарного кисню є лінійною, а від температури експоненційною. Тому головними факторами утворення термічних NO_x^t виступають максимальна локальна температура і час перебування в зоні високих температур. Хоча з часу проведення цих експериментів минуло кілька десятиліть, процеси утворення оксидів азоту при горінні не вивчені повною мірою досі, і вимагають подальшого детального опрацювання складної кінетики

хімічного процесу зі спільним вивченням тепломасообміну і його впливу на кінетичну картину процесу в цілому.

NO_x^p – «паливні» оксиди азоту, утворюються із азотовмісних компонентів рідких і твердих палив. Наявність такого джерела оксидів азоту була показана в дослідженні Томаса і Шоу [75], які при спалюванні в лабораторній установці оксиду вуглецю з азотовмісними добавками (метил ціанід, сек-бутиламін, пірідін) отримували високу концентрацію NO в продуктах спалювання (до $1200 \text{ см}^3/\text{м}^3$ без залежності від того, чи використовувалось в якості окиснювача повітря чи суміш кисню з аргоном, що не містить азоту. Температура горіння CO в дослідах Томаса і Шоу була досить низькою: 860-1145 К).

NO_x^p – «швидкі» оксиди азоту, утворення яких пояснюється гомогенним кінетичним процесом, що відбувається в зоні за фронтом полум'я, після завершення процесу горіння попередньо перемішаної горючої суміші з коефіцієнтом надлишку повітря $\alpha > 1,0$. Невідповідність термічної теорії Зельдовича була відкрита Фенімором у 1970 році [77]. Фенімор на підставі аналізу ряду реакцій запропонував пояснення процесу, чому у вуглеводневих еквівалентах безпосередньо в зоні горіння фіксуються чималі концентрації NO , хоча час горіння на порядок менше, ніж період часу, необхідний для отримання рівноважних концентрацій NO , навіть при горінні метано-повітряної суміші стехіометричного складу. Занадто швидке утворення пояснюється тим, що молекули азоту зв'язуються радикалами типу CH , CN і CH_2 , вступаючи в реакції з дуже маленькими енергетичними витратами. До таких реакцій С. Фенімором були віднесені:



Для зниження викидів NO_x до необхідного рівня найбільш широко застосовуються різні методи топкового зниження утворення оксидів азоту, шляхом різноманітного впливу на процеси горіння. В багатьох випадках такі методи є достатньо ефективними, і вони потребують значно менших витрат аніж встановлення газоочисного обладнання.

У таблиці 1.4.1. представлена спрощена схема, яка ілюструє всі промислові технологічні заходи зі зниження утворення оксидів азоту в енергетичному обладнанні, що спалює органічне паливо.

Таблиця 1.4.1 Основні заходи для зниження утворення оксидів азоту в спалювальному обладнанні



Відповідно до особливостей конструкції пальника, топкової камери і режиму роботи котельного агрегату, методи зниження оксидів азоту визначаються в кожному випадку індивідуально. Велика кількість технічних рішень одночасно змінюють і рівень максимальних температур і концентрацію окиснювача на початковій ділянці факелу. Вибір методу зниження викидів азоту – це завжди вирішення задачі на оптимум, адже

зменшення локальної температури зменшує утворення оксидів азоту, як позитивний результат, однак і знижує ККД котла.

Одним з найпростіших методів зниження температури (без зміни конструктиву котельного агрегату) є зниження навантаження котла. В багатьох дослідженнях було показано, що залежність кількості утворення оксидів азоту від теплопродуктивності котла є степенева функція [75 - 78]. Найпоширенішим способом зниження температурного рівня є рециркуляція димових газів. Цей спосіб передбачає зниження концентрації кисню в окиснювачі. Потрібно також зважати, що введення димових газів в потік дуттьового повітря підвищує втрати теплоти з газами, що відходять, та зумовлює зростання споживання електроенергії (на власні потреби – забезпечення процесу рециркуляції), а отже знижує економічні показники котла. Ще одним недоліком є ріст концентрацій небезпечної речовини – бенз(а)пирену, тому ступінь рециркуляції R для практичного використання має обмеження до 28-30%.

Ще один можливий спосіб зниження концентрації оксидів азоту через зниження максимальної температури в топці котла можна здійснити встановленням двосвітного екрану або інших теплосприймаючих поверхонь нагріву в зоні інтенсивного горіння, що збільшує теплоснімання в топковій камері.

Існує ствердження, що в результаті спалювання водню в енергетичному обладнанні утворюється лише вода, як продукт реакції, а інші токсичні речовини відсутні. Однак це хибна думка. При високих температурах процесу також утворюються оксиди азоту, які є одними з самих токсичних продуктів згоряння, і їх концентрація залежить від рівня температури процесу і концентрації реагуючих речовин.

В роботі [78] зроблена оцінка вмісту оксидів азоту у продуктах згорання при спалюванні водню (при теоретичній температурі 2380 К в умовах термодінамічної рівноваги), що дорівнює 0,0005 мольних часток (547 мг/м³).

Якщо порівнювати концентрацію оксидів азоту при горінні природного газу (при теоретичній температурі 2222 K) – 0,002 мольних часток (2466 мг/м³), очевидна перевага з точки зору екологічності на перший погляд належить водню, адже вміст NO_x в 4 рази більше утворюється при горінні метану. Проте, якщо порівнювати еквівалентні значення енергетичної цінності об'ємів двох газів, зважаючи що теплотворна здатність водню в 3,3 рази менша, аніж природного газу, то величини вмісту оксидів азоту у продуктах згорання близькі за величинами.

1.8. Спосіб використання водню в якості акумулятора енергії в комунальній теплоенергетиці

Залежно від технології виробництва водню, як було наведено вище, його умовно позначають кольорами. При цьому лише «зелений» водень, отриманий з використанням енергії від відновлюваних джерел, є перспективним для кліматично нейтрального розвитку промисловості.

Були розглянуті способи отримання водню, одним з яких є електроліз. «Зелений» водень виробляється електролізом води за умови, що електроенергія для електролізу використовується виключно з відновлюваних джерел, що не створюють викидів CO₂. В результаті електролізу води, як фізико-хімічного процесу, окрім водню, утворюється важливий і високовартісний супутній продукт – кисень O₂. Його складно транспортувати до споживача, через його вибухонебезпечні властивості, тому доцільно установки з електролізу води встановлювати саме в локаціях потенційних споживачів кисню. Сьогодні кисень є важливою складовою багатьох процесів хімічної, аграрної та металургійної промисловості. В енергетиці він знайшов застосування при газифікації твердого палива, збагаченні повітря для побутових і промислових котлів. Його застосовують на сміттєспалювальних заводах [50], де кисневе дуття використовується для підвищення температури в топці більш ніж 850 °C задля розкладання

діоксинів і фуранів, та більш ніж 1100 °С для розкладання хлорвмістких сполук.

Разом з цим описані вище проблеми, що пов'язані з необхідністю транспортування водню, є додатковим аргументом щодо пріоритетності його використання найближче до місця отримання.

В результаті аналізу літературних джерел зроблено висновок про необхідність вирішення задачі пошуку способів використання водневих технологій (спалювання водню та його похідних) на наявному котельному обладнанні та вивчення процесів зниження утворення оксидів азоту при спалюванні палива, що містить водень.

Саме тому, пропонується реалізувати таку можливість шляхом створенням т.з. «водневого ХАБу». Тут і далі терміном «водневий ХАБ» позначено місце, де наявні всі складові для виробництва, зберігання (транспортування до місця зберігання) та використання водню. Наприклад, до складу такого ХАБу можуть входити установки отримання енергії з відновлюваних джерел, електролізер, метанізатор, абсорбер (функція якого є виділення CO₂ для подальшого його використання в метанізаторі) та котельна установка (див. нижче). У додатку А приведена заявка на патент на винахід за авторства в. т. ч. здобувачки - спосіб дозволить адаптувати використання водню, отриманого від електролізу, шляхом утворення в замкнутій схемі синтетичного метану. Запропонована концептуальна схема дозволяє реалізувати технологію відомими технічними засобами.

Запропонований спосіб використання водню, що отримується з електроенергії, згенерованої на ВДЕ, яка є надлишковою в ОЕС, може бути застосований на об'єктах паливно-енергетичного комплексу України, що дозволить:

- здійснювати балансування надлишкової електрогенерації;
- використовувати воденьвмісне паливо на наявному котельному обладнанні.

Процес утворення з отриманого водню в метанізаторі синтетичного метану, для його подальшого використання в паливоспалювальних установках, дозволяє створити замкнутий процес використання водню без заміни наявної котельної бази. В цілому процес електролізу є енерговитратним. При цьому слід відмітити, що зберігання чистого водню в резервуарах можливе лише за наявності спеціально створених умов, що відповідають жорстким протипожежним вимогам через його вибухонебезпечні властивості, а також використання спеціальних матеріалів через окрихчення під впливом водню (таких на цей час в промисловій і комунальній енергетиці практично немає), тоді як зберігання та транспортування утвореного синтетичного метану аналогічне до традиційного природного газу.

Українська газорозподільна система має низку особливостей, які не дозволяють повністю запозичувати та впроваджувати результати європейських водневих проєктів [23], що пов'язане в першу чергу з її станом з технічної точки зору.

Тому здобувачкою пропонується використання водню в паливоспалювальних установках комунальної енергетики, в якості продукту для створення синтетичного метану, який є практично аналогом типового палива для більшості опалювальних котлів та котлів промислового комплексу. Таке використання можливе без заміни котельного парку, а також реалізує «замкнуту» безвуглецеву схему отримання та спалювання синтетичного метану, без викидів парникових газів.

Нижче наведений короткий опис технології.

Електроенергія, отримана від установок відновлюваних джерел енергії, використовується для електролізу води у спеціальних пристроях – електролізерах відповідної потужності. В результаті реакції електролізу утворений водень поступає у метанізатор. В абсорбері (який виконує функцію деарбонізатора) з димових газів відокремлюється діоксид вуглецю і

поступає в метанізатор. При реакції взаємодії водню з діоксидом вуглецю з димових газів котлів в метанізаторі утворюється синтетичний метан, утворена метаново-воднева суміш (до 11 % водню) спалюється у збагаченій киснем (від електролізу) атмосфері, зі зниженим рівнем викидів оксидів азоту в навколишнє повітря або подається до ГТС (рис 1.1.8) .

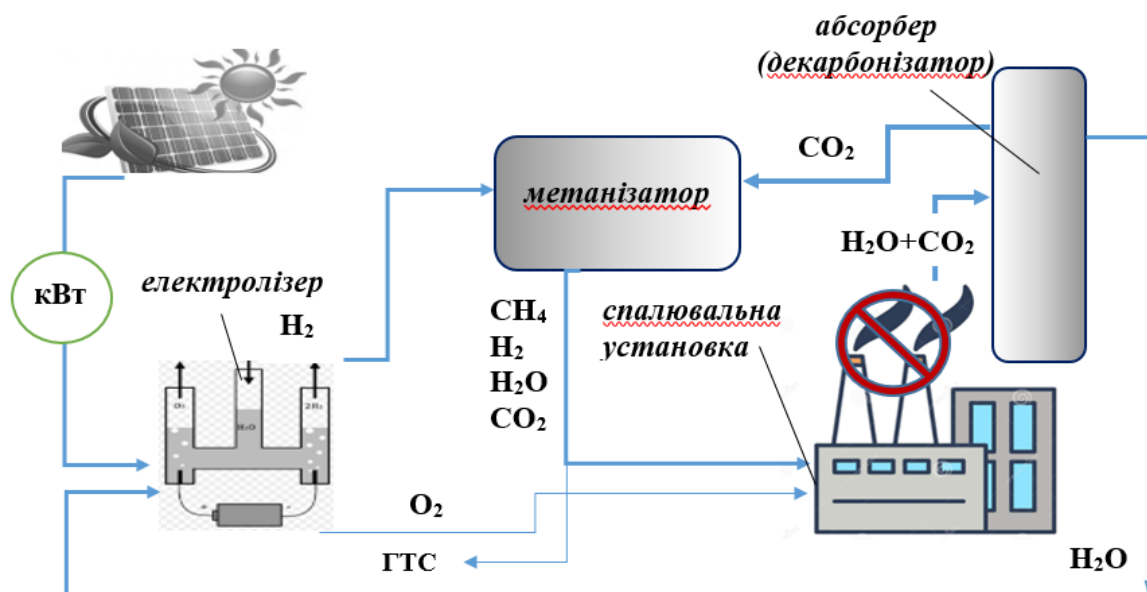


Рис.1.1.8 – Спосіб використання водню в рамках створення водневого ХАБу

Утворений при спалюванні такої суміші (після реакції) діоксид вуглецю вже не враховується як викид парникового газу, бо використовується і надалі як реагент для отримання синтетичного метану. При чому слід зазначити, що схематично абсорбер і метанізатор зображені різними установками, проте на практиці для зменшення відстані транспортування водню, рекомендовано ці вузли об'єднати в одну установку.

Основна проблема – це практична реалізація процесу використання водню у такій «замкнутій» схемі, а саме:

- дотримання прийнятих Україною зобов'язань щодо зниження рівня викидів оксидів азоту (потребує визначення рівня підвищення утворення оксидів азоту при спалюванні синтетичного метану з добавками водню);
- висока собівартість процесу отримання синтетичного метану;
- недосконалість технологічного обладнання для реалізації процесу, зокрема в процесі метанізації на виході отримується, як продукт, не чистий синтетичний метан, а й домішки інших складових, які не повністю прореагували в метанізаторі, зокрема діоксид вуглецю, водень, вода, тощо;

Вміст синтетичного метану становить до 85%, а решта 15% - це вміст інших компонентів, що не прореагували, з яких концентрація водню (у водному розчині) може становити близько 10-11%.

Тому вивчення закономірностей утворення оксидів азоту при спалюванні метану з добавками водню близько 10...11% потребує цілеспрямованих досліджень.

1.9. Висновки до розділу 1. Мета та завдання дослідження

Тенденції розвитку енергетики України передбачають поширення використання водневих технологій, що і зумовлює високу актуальність роботи. Аналіз літературних джерел показав, що питання спалювання водню і водневих сумішей, утворення токсичних речовин в цьому процесі недостатньо вивчені. Питання доцільності використання добавок водню у природний газ, що транспортується розподільчими мережами України, потребує подальшого глибокого дослідження як з практичної точки зору (допустимий термін експлуатації та матеріал трубопроводів, оптимальна частка водню у газових сумішах), так і з екологічної, враховуючи вплив на водний баланс територій, на яких планується виробництво, транспортування та використання цільових і супутніх продуктів.

При спалюванні метано-водневої суміші у котельних агрегатах слід враховувати зміну променевих теплових потоків, за рахунок локального

підвищення температури, що може призводити до швидкого зношення внутрішніх конструктивних елементів топки котла. Для запобігання цьому необхідно проводити конструктивні зміни, які потребують попереднього перерахунку топкового простору котла, з визначенням нових значень параметрів та кореляційних коефіцієнтів, що враховують добавки водню до газової суміші. Наразі зробити це неможливо, так як у Нормативному методі розрахунку котлоагрегатів таке паливо відсутнє. Необхідно щонайшвидше розпочати роботу щодо доповнень до нормативного методу розрахунку котельних агрегатів, щоб не затримувати подальші процедури отримання сертифікатів та дозволів для експлуатації котлів, які працюватимуть на метано-водневих сумішах та водні.

Зважаючи на описані вище проблеми з використання водню в якості монопалива та у складі паливних сумішей на об'єктах паливно-енергетичного комплексу, є доцільною інтенсифікація проведення експериментальних досліджень процесів спалювання водню та можливих способів використання водню без конструктивних змін існуючого устаткування.

Аналіз літературних даних показав, що зі збільшенням вмісту водню у паливі розвиваються більш високі температури, що призводить до необхідності введення додаткових баластів в процес горіння та враховування їх впливу не тільки термодинамічного, а і кінетичного.

Недостатня визначеність впливу кінетичної складової процесу спалювання палива з домішками водню обумовлює необхідність проведення додаткових досліджень в цьому напрямку.

На основі опрацьованих літературних джерел можна зробити висновок, що описані способи спалювання палива, що містить водень, потребують складної та дорогою заміни обладнання, не адаптовані до існуючого паливоспалювального обладнання, а для адаптації існуючого обладнання, окрім числа Воббе, необхідно врахувати вплив кінетичної складової процесу

горіння, в першу чергу на процес утворення оксидів азоту. Дуже важливо також розуміння межі вмісту водню в паливі, до якої не відбудеться перевищень допустимих рівнів оксидів азоту згідно чинних екологічних норм [67]. Додавання водню до суміші піднімає адіабатичну температуру і відповідно концентрація термічних оксидів азоту зростає, а можливості скорочення її технологічними засобами мають теоретичні межі, визначені температурною сходинкою Франк-Каменецького ($\ln e$, тобто до близько у 2,7 разів).

Метою даної роботи є дослідження фізичного явища утворення та зміни концентрації оксидів азоту, що генеруються при спалюванні метано-водневих сумішей, в залежності вмісту водню, задля її зниження до рівня екологічних нормативів.

Для досягнення поставленої мети необхідно вирішити наступні **завдання**.

1. Дослідити процеси горіння метано-водневих сумішей та утворення монооксиду та діоксиду азоту, що відбуваються в технологічних процесах, наближених до умов «Водневого ХАБу»:

1.1. Встановити найбільш значущі процеси та їхні параметри, які впливають на утворення оксидів азоту при горінні метано-водневих сумішей.

1.2. Розробити методику експериментальних досліджень характеру зміни концентрацій монооксиду та діоксиду азоту та локальних температур у фронті полум'я від вмісту водню у суміші, що спалюється.

1.3. Провести експериментальні дослідження утворення монооксиду та діоксиду азоту при горінні метано-водневих сумішей та встановити характер змін температури полум'я і концентрацій монооксиду і діоксиду азоту в залежності від вмісту водню у суміші, що реагує.

2. Запропонувати впровадження результатів дослідження на існуючому теплогенеруючому обладнанні теплопостачальних підприємств, в т.ч. для створення додаткових балансуєчих потужностей.

Об'єкт дослідження: процес спалювання метано-водневої суміші, що містить водень у водному розчині.

Предмет дослідження: вплив концентрації водню на утворення монооксиду та діоксиду азоту у фронті полум'я в процесі горіння метано-водневої суміші, що містить водень від 9,5% до 11,5%.

Методи дослідження:

В роботі використані розрахункові та експериментальні методи досліджень.

При розробленні розрахункової моделі для побудови матеріальних і теплових балансів процесів спалювання використані методи статистичного опрацювання даних, реалізовані в складі стандартних пакетів MS Excel і MathCad, для графічного зображення конструктивних елементів лабораторної установки – пакет Autocad.

Експериментальні методи досліджень були використані при проведенні експериментів на модернізованому стенді. Дослідження фронту горіння здійснювалося в стаціонарному «зворотному» факелі метану зі змінною часткою водню у розчині, що реагує.

РОЗДІЛ 2. ТЕОРЕТИЧНІ ОСНОВИ ВПЛИВУ ВОДНЮ НА ПРОЦЕС СПАЛЮВАННЯ ВУГЛЕЦЕВОГО ПАЛИВА

2.1. Процеси та параметри, які впливають на ефективність спалювання вуглецевого палива

При спалюванні навіть найбільш «чистого» (з точки зору впливу на довкілля) палива - природного газу, димові гази, що утворюються, містять значну кількість токсичних оксидів азоту: концентрація NO_x в перерахунку на NO_2 складає 100-200 мг/м³, що відповідає питомим викидам 1,25 – 2,5 г NO_2 на 1 м³ спаленого газу. Якщо врахувати об'єми природного газу, що спалюються в зимовий час в опалювальних котлах, то стає очевидним, що для розв'язання екологічних проблем у містах необхідно вживати заходів для зменшення викидів оксидів азоту.

В українських директивних документах з охорони навколишнього середовища припускають повний перехід NO в NO_2 в атмосфері, що, звичайно, призводить до завищення розрахункової загальної концентрації оксидів азоту в повітрі в порівнянні з фактичною. Таке рішення було прийнято кілька десятиліть тому в зв'язку з неможливістю розраховувати частку переходу NO в NO_2 [79]. Дослідження, проведені в 70-х роках радянськими (А.К. Внуков, І.Я. Сігал та ін.) і зарубіжними (Бейлке, Елшоут та ін) вченими, дозволили оцінити з достатньою точністю ступінь переходу NO в NO_2 в залежності від деяких атмосферних параметрів.

Вміст оксиду азоту NO в димових газах котлів, в яких спалювання палива здійснюється при температурах близьких до 1500 К, у багато разів перевищує вміст діоксиду азоту NO_2 . Вміст NO в димових газах потужних котлів складає 97 - 99% від вмісту NO_x .

Окислення NO в NO_2 може протікати за трьома реакціями:



Реакція (2.1.1) грає значну роль тільки при достатньо високих концентраціях NO, швидкість її зменшується в міру зниження концентрації NO і становиться несуттєвою. Ще меншу роль відіграє реакція (2.1.3): перетворення оксиду азоту в діоксид за допомогою пероксидного радикала має значення лише тоді, коли високі концентрації вуглеводневих радикалів і інтенсивність ультрафіолетового опромінення. Найбільше значення має реакція (2.1.2) окислення NO озоном, а отже її перебіг важливо враховувати в процесах горіння, що відбуваються в атмосферному повітрі.

В ході досліджень останніх років, проведених на лабораторних стендах Інституту технічної теплофізики НАН України і в промислових умовах, показано, що в розрахунках процесів горіння вуглецевмісного палива, а також утворення і розпаду токсичних речовин необхідно враховувати роль певних параметрів, які впливають на ефективність функціонування системи.

Зокрема до них відносять концентрацію реагуючих речовин, вміст та спосіб подачі вологи, температуру, коефіцієнт надлишку повітря тощо. Так, питаннями зниження утворення оксидів азоту займалися фахівці профільних Інститутів академії наук України, таких як Інститут газу (Сігал І.Я., Сорока Б.С., Сміхула А.В.), Інститут вугільних енерготехнологій (Дунаєвська Н.І., Нехамін М.М.) та низка інших наукових та науково-дослідних установ.

Як вже зазначалось у розділі 1 цієї роботи, оксиди азоту, які утворюються при спалюванні будь-якого органічного палива в топках енергоустановок, умовно поділяють на три групи: паливні, термічні та кінетичні («швидкі»).

Кількісна залежність утворення швидких оксидів азоту від деяких параметрів експериментально була досліджена І.Я. Сігалом і його співробітниками в Інституті газу НАН України. Застосований ними метод дозволяв без екстраполяції по фронту полум'я, оцінити концентрацію швидких оксидів азоту при швидкому охолодженні продуктів спалювання і заморожуванні реакції утворення NO в зоні спалювання природного газу.

Було визначено, що для ефективного зниження концентрацій оксидів азоту в продуктах згорання палива в умовах експлуатації котлів, режимно-технічними заходами необхідно організувати процес спалювання палива так, щоб активно впливати на початкову ділянку факела, починаючи від виходу з сопла до зони досягнення максимальних температур.

Як відомо, основними чинниками, що визначають утворення оксидів азоту в полум'ї вуглеводнів, є локальна температура, час перебування в зоні горіння і концентрація реагуючих компонентів. Відповідно найпоширеніші способи зниження утворення оксидів азоту забезпечують вплив саме на ці параметри. Однак слід відмітити, що суттєвими чинниками можуть бути також вміст та спосіб подачі вологи, зокрема водню, до зони горіння.

В процесі горіння водню відбуваються наступні ланцюгові реакції:

1. Реакції зародження ланцюга:



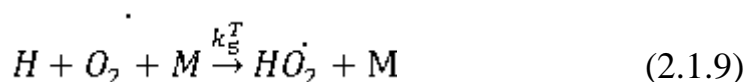
2. Реакції розгалуження ланцюга:



3. Реакції розповсюдження ланцюга:



4. Реакції обриву ланцюга:



Процес поширення полум'я характеризується швидкістю поширення U_n — це лінійна швидкість переміщення зони горіння (фронт полум'я) по відношенню до суміші реагентів [81]. Вимірюється вона вздовж нормалі до фронту полум'я. Швидкість поширення полум'я в ламінарних умовах для

заданої суміші є фізико-хімічною константою, яка залежить лише від тиску і температури.

Механізм розповсюдження полум'я в розглянутому випадку ґрунтується на передачі теплоти і активних центрів з зони реакції до свіжої суміші завдяки значним градієнтам температури і концентрацій між зоною горіння і свіжою сумішшю.

Суміші горять лише в тому випадку, якщо вміст пального й окиснювача достатні для горіння зі швидкістю не менше декількох сантиметрів в секунду. По мірі розбавлення U_n падає до деякого мінімального значення, і при подальшому розбавленні горіння стає неможливим. Ця обставина використовувалася в якості однієї з головних передумов в теоріях горіння, заснованих на уявленні про існування фіксованої температури займання T_i . Концентраційні межі поширення полум'я в цих теоріях здавалися очевидними: якщо в результаті розбавлення суміші температура горіння T_b виявляється нижче T_i , то горіння газу виявляється неможливим. Однак розрахунок швидкості полум'я згідно цих теорій приводить до висновку про те, що швидкість полум'я повинна в міру розбавлення, тобто в міру зниження T_b , плавно зменшуватися, доходячи до нуля при $T_b = T_i$, що суперечить експериментальним фактам. Насправді межі горіння обумовлені тепловими втратами в навколишнє середовище і на випромінювання. Частина теплоти відводиться теплопровідністю (рис. 2.1.1). Тепловтрати мають місце головним чином у зоні прогрівання і в області продуктів горіння. Охолодження призводить до зниження температури при віддаленні від зони реакції і до появи відповідного поздовжнього (в напрямку, зворотному поширенню полум'я) потоку теплоти. Відведення теплоти із зони реакції до продуктів горіння залежить від швидкості їх охолодження.

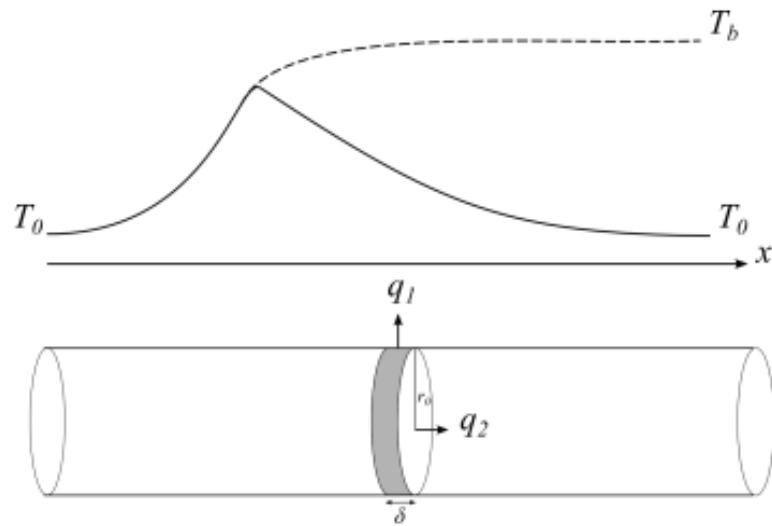


Рис.2.1.1 - Розподіл температури у фронті полум'я за наявності тепловтрат в навколишнє середовище. Пунктиром показано розподіл температури за відсутності тепловтрат

З цих причин температура полум'я T_b' в реальних умовах спалювання горючої суміші виявляється менше адіабатичної температури горіння T_b , і відповідно швидкість поширення полум'я за наявності теплових втрат менше нормальної швидкості U_n , що відповідає термодинамічній температурі T_b . Але теплові втрати крізь стінки і втрати випромінюванням, правда в меншій мірі, самі залежать від швидкості поширення полум'я.

Так, в роботі [82] відмічається, що велика кількість теоретичних досліджень дозволила вирішити задачу для полум'я, у якому параметри хімічного процесу перетворення палива достатньо прості. Для полум'я з більш складною кінетикою практично неможливо отримати достатньо точне аналітичне рішення.

2.2. Вплив вологи на утворення токсичних речовин при горінні палив

Аналіз впливу вологи на процес горіння доцільно починати з широко відомих процесів, які є складовими загального процесу. Волога виконує функцію тепловідводу, перетворюючись у пару і відбираючи енергію на це у полум'я, і в результаті знижує температуру в зоні горіння, що приводить до

зменшення концентрації оксидів азоту. Крім того, якщо енергії факелу достатньо, то молекула води розпадається на водень H_2 і кисень O_2 . Водень, що вивільнився, приймає участь у реакціях горіння, тобто ми досліджуємо процес, прообразом якого є горіння водню в атмосферному повітрі.

Впорскування вологи в зону горіння відносять до технологічних методів зниження оксидів азоту, і цей процес є досить поширеним. Використовуються різні способи подачі води в зону горіння: шляхом перемішування з потоком атмосферного повітря, шляхом подачі розпиленої води у високотемпературну зону факела, застосуванням водопаливних емульсій тощо.

У роботах МЕІ [83, рис. 4.16] для ГТУ при спалюванні газомазутних емульсій у якості присадки використовували впорскування пари. Розрахунки проводилися для наступних значень відносних витрат палива і пари, що впорскується: $G_{\text{п}} / G_{\text{т}} = 0; 0,02; 0,053; 0,11; 0,33$, де $G_{\text{п}}$, $G_{\text{т}}$ - відповідно вагові витрати пари і палива.

Зі збільшенням обсягу впорскування пари відбувається деяке розтягування зони горіння, зниження максимальної локальної температури факела на 80-100 град, при цьому при введенні незначної кількості H_2O вміст CO може зменшуватись, а при великій кількості – навпаки збільшуватись. Концентрація NO зменшувалася приблизно на 7%, що вказує на слабкий вплив добавок вологи на утворення оксидів азоту в цьому процесі.

На розробленому авторами [84] експериментальному стенді раніше вивчався вплив вологи у процесі горіння природного газу. В цих дослідженнях в зону горіння метану (ламінарний факел) вносились каплі дистильованої води різного об'єму. Відповідно до зроблених висновків, волога, внесена з початковими продуктами в процес горіння, може бути розділена на вологу, яка бере участь в хімічному процесі окислення пального, тобто ту, що розпадається в ході високотемпературної дисоціації на H_2 і O_2 з подальшим утворенням гідроксилу OH чи пероксидного радикалу HO_2 , які є сильними окиснювачами і ініціюють прискорення процесів горіння вуглеводнів, наприклад доокислення CO за реакцією:



За реакцією (2) може також утворюватися вільний водень, який також ініціює з CO та CO₂ ланцюги реакцій, в т.ч. з можливістю відновлення в локальних «холодних» відновлювальних зонах метану CH₄ за реакцією (3):



В процесі (1) утворюється волога, яка не бере участі в хімічних процесах горіння, тобто надмірна, що виконує тільки роль баласту і відводить із зони горіння теплоту.

Розрахункові і експериментальні дослідження [82,83,85] дали можливість визначити кількісно вплив вмісту води в початкових компонентах на процес горіння вуглеводних палив, за якими початкова волога паливо-повітряної суміші складає близько 8-9% вологовмісту продуктів згорання. Цей факт лежить в основі уявлення про незначний вплив вологовмісту початкових продуктів на процес горіння.

Одержані в роботі [84] експериментальні дані при коефіцієнті надлишку повітря $\alpha=1,1$ ілюструють, що збільшення вмісту монооксиду азоту починається перед фронтом полум'я, а зменшення за фронтом полум'я при зниженні температури продуктів згорання за рахунок розбавлення і реакції рекомбінації.

Концентрація монооксиду азоту знижується залежно від температури і приблизно повторює зміни останньої з деяким «запізненням». Ці дані добре узгоджуються з результатами досліджень [85] за формою кривих абсолютних значень температур і концентрацій, а також підтверджують припущення, зроблене за результатом аналітичних досліджень в роботі [86], про неспівпадіння зони максимальних температур і зони максимуму концентрацій.

Значною мірою саме такою подвійною роллю води пояснюється різноманітність і неспівпадіння даних про вплив води на процес горіння,

приведених в різних літературних джерелах [84-86]. Зустрічаються навіть протилежні думки, від інтенсифікації процесу горіння до збільшення об'єму неефективного баласту. Можна також припустити, що такі поширені методи, як рециркуляція продуктів горіння в корінь факела і турбулізація полум'я в дифузійних пальниках (що виконує туж саму функцію), забезпечують підживлення кореня факела вологою першого типу.

Для збідненого полум'я зниження температури при збільшенні коефіцієнту надлишку повітря як без введення вологи так і з введенням її приводить до зниження концентрації NO у фронті полум'я. При введенні краплі H₂O максимальна локальна температура знижується не менше аніж на 200 градусів, вміст монооксиду азоту в цьому випадку також незмінно зменшується.

Кількість вологи, яка може бути хімічно використана в процесі горіння, очевидно буде різна для різних видів палива і буде залежати від коефіцієнта надлишку повітря.

Авторами [87] здійснена спроба описати побутові пальники за можливістю їх роботи на метано-водневій суміші (в діапазоні вмісту H₂= 0–50%). Отримані результати і зроблені висновки свідчать про можливість застосування досліджуваних співвідношень метан-водень на побутових газових плитах. Але ці результати не можна масштабувати для промислових пальників та загалом до всіх пальників, які встановлені в існуючих котельних агрегатах, по причині відмінності технічних характеристик.

Експериментальні дослідження очікувано показали, що зі збільшенням вмісту водню розвиваюся більш високі температури, та що не можна враховувати ефективність впливу введення додаткових середовищ (баластів) в процес горіння тільки шляхом розрахунку їх термодинамічної складової, а необхідно враховувати й кінетику процесу. Хоча якщо в цьому плані порівняти, наприклад, баласту, що часто вводяться при стадійному спалюванні, такі як надмірне повітря і пара, авторами [85] показано, що з підвищенням максимальних локальних температур процесу ефективність

введення термодинамічно різних баластів зближується, що можна пояснити припущенням домінування кінетики над термодинамікою.

При написанні радикальних ланцюгових реакцій для воднево-кисневої суміші при $T > 1000$ К механізми розгалуження ланцюга відносно незалежні від природи воднево-кисневих сумішей палива. Проте вже при температурі близькій до 1000 К (традиційна для роботи більшості котельних агрегатів) вони стають значно складнішими і залежать від природи палива [88].

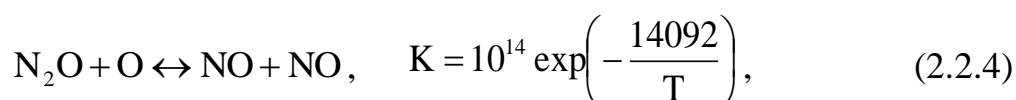
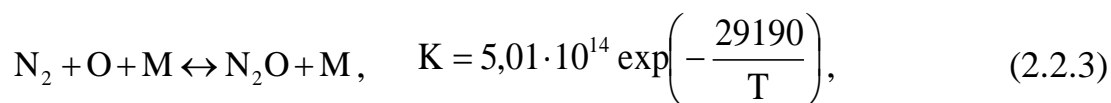
Як результат вищеописаного можна вважати, що недостатня визначеність впливу домішок водню (кінетичної складової процесу спалювання) обумовлюють необхідність проведення досліджень в цьому напрямку.

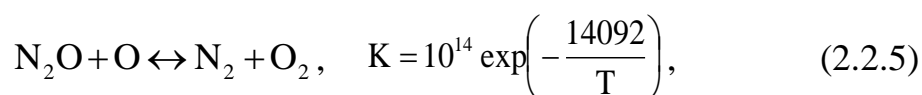
Всі режимні методи зниження викидів оксидів азоту в атмосферу при спалюванні органічних палив, як відомо [89-91], без винятку ґрунтуються на введенні в топку баластної маси, в якій обов'язковим компонентом є волога у газоподібному чи рідкому вигляді.

Відомо, що у присутності водяної пари утворення NO може йти за реакціями:

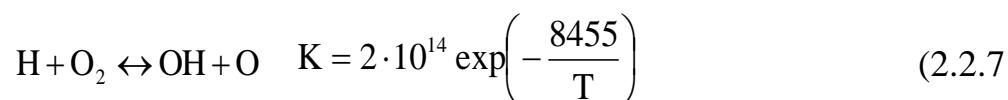


Автори [92] показали, що утворення NO при спалюванні бідних сумішей CO у вологому повітрі не може бути пояснено лише надмірною концентрацією радикалів. Ними показано, що при горінні в умовах інтенсивного перемішування, низької температури і бідної суміші активну роль в процесі утворення NO виконує сполука N_2O . Вони ж припустили механізм утворення NO через N_2O :





З урахуванням впливу атомарного водню на процес утворення NO, П.В. Росляковим механізм був доповнений наступними реакціями [93]:



У роботі [94] зроблено припущення, що реакція



також може впливати на утворення NO, особливо в білястехіометричних і багатих паливоповітряних сумішах.

Дослідження [86, 93], підтвердили високий вміст діоксиду азоту в полум'ї природного газу, виявили основні температурні області утворення і дисоціації NO₂ і показали можливий механізм утворення і взаємодії з реагентами в топковій камері. Утворення діоксиду азоту відбувається в передполум'яній і заполум'яній зонах при температурах 700-1000 К, у фронті полум'я діоксид азоту дисоціює на NO і атомарний кисень. Оскільки введення вологи змінює поле температур в топковому просторі, то можна припустити, що при цьому змінюються умови утворення і дисоціації діоксиду азоту. Найвірогіднішими окислювачами NO в NO₂ є: атомарний кисень, радикал OH і пероксидний радикал HO₂⁻.

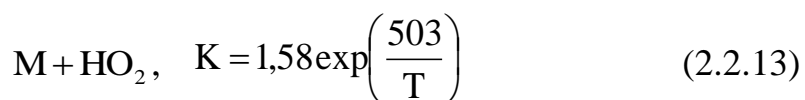
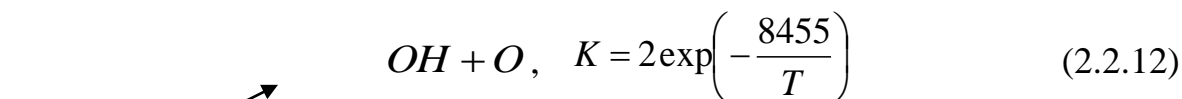
Механізм доокиснення NO у NO₂ досить добре описується реакцією:



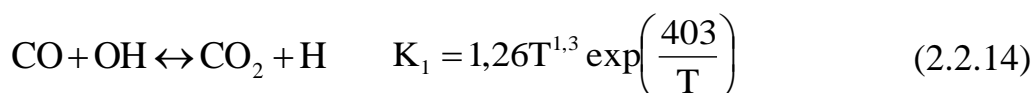
Можна вважати, що за наявності HO₂⁻, NO практично миттєво переходить в NO₂, і лише недостатня кількість HO₂⁻ перешкоджає повному доокисненню NO в NO₂. Вся кількість пероксидного радикала, винесеного із зони горіння в результаті дифузійного процесу в передполум'яну і

післяполум'яну області, прореагує, значна частина якої буде використана з утворенням NO₂.

Пероксидний радикал утворюється в значних кількостях в полум'ї вуглеводнів в зоні зникнення атомарного водню і поблизу неї в результаті реакції, яка може бути представлена у вигляді [94-96]:



Джерелом атомарного водню, необхідного для протікання реакції в області температур 900-1100 К, може бути реакція догорання СО:



Оксид вуглецю є стійким проміжним продуктом процесу горіння будь-якого вуглеводневого палива.

2.3. Оцінка енергії дисоціації води, що міститься в атмосферному повітрі, при спалюванні палива

Водяна пара є обов'язковим компонентом будь-якого процесу горіння в атмосферному повітрі. Горіння для спрощення розуміння традиційно вважається як двокомпонентна реакція (взаємодія палива і окисника), але в реальних реакціях це не зовсім так – саме водяна пара є третім компонентом [96-98]. І саме наявність водню, який є складовою води, і є каталізатором, який запускає всі наступні ланцюгові реакції процесів горіння. На практиці часто на графіках зміни температури по фронту полум'я зображують зону т.з «прогрівання» (передполум'яну) як невелику, плавну ділянку зміни температури, і вже потім відбувається «стрибок» - різке зростання температури. Ця зона і враховує витрати теплоти на випаровування вологи (фізичний процес) (рис.2.3.1), а за нею домінуючим процесом становиться хімічний – залишку енергії має вистачити на те, щоб розчепити хоча б одну

молекулу води на кисень і водень, вивільнений водень в залежності від температур утворить гідроксил (вище 760°C) чи пероксидний радикал (нижче 760°C), і відповідно запустити наступні реакції. Ці реакції не є темою даного дослідження.

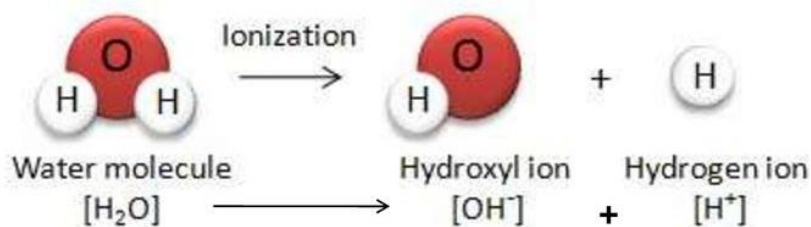


Рис. 2.3.1. – Схема дисоціації молекули H_2O

Тобто описана реакція – підготовча, це ключова реакція, саме вона генерує водень. Додаток водню має значний вплив на утворення оксидів азоту (не лише тому що адиабатна температура горіння водню вище), а і за рахунок кінетики процесу.

Важливим для висновків є оцінка кількості енергії, яка витрачається на нагрів та пароутворення води, що міститься в атмосферному повітрі. Здобувачкою був проведений чисельний аналіз і обчислено, яка кількість енергії потрібна на ці процеси для різних значень вологості повітря та температури в залежності від коефіцієнту надлишку повітря.

Здобувачкою були виконані обчислення з варіацією значень коефіцієнтів надлишку повітря, характерних для енергетичних котлів та котлів комунальної енергетики, по відношенню до різних вологостей повітря (а отже вмісту води в повітрі). Результати чисельного експерименту представлені в таблиці 2.2.1.

Таблиця 2.2.1. Значення енергії, що витрачається на нагрів та випаровування H_2O , для температур характерних для процесів горіння з різними коефіцієнтами надлишку повітря.

α	Енергія, що витрачається на нагрів та випаровування H_2O , що міститься в 1 м^3 , ккал		
	Вологість 20%, $t_1 = 25^\circ\text{C}$ Вміст води 20 г/м^3	Вологість 100%, $t_2 = 30^\circ\text{C}$ Вміст води 30 г/м^3	Вологість 20%, $t_3 = 0^\circ\text{C}$ Вміст води 4 г/м^3
0,5	70,52	105,79	14,10
0,9	126,94	190,41	25,39

α	Енергія, що витрачається на нагрів та випаровування H_2O , що міститься в 1 м^3 , ккал		
	Вологість 20%, $t_1 = 25^\circ\text{C}$	Вологість 100%, $t_2 = 30^\circ\text{C}$	Вологість 20%, $t_3 = 0^\circ\text{C}$
	Вміст вологи 20 г/м^3	Вміст вологи 30 г/м^3	Вміст вологи 4 г/м^3
1	141,05	211,57	28,21
1,05	148,10	222,15	29,62
1,1	155,15	232,73	31,03
1,15	162,21	243,31	32,44
1,2	169,26	253,89	33,85
1,25	176,31	264,47	35,26
1,5	211,57	317,36	42,31

Для оцінки енергії, що витрачається на нагрів та випаровування води в повітрі, доцільно розглядати це значення по відношенню до корисної енергії, яка отримується в процесі спалювання палива. За умови, що паливо це природний газ, зі значенням усередненої теплотворної здатності на рівні 8250 ккал (в 1 м^3 палива), то частка енергії, що витрачається на нагрів та пароутворення водяних парів в 1 м^3 повітря по відношенню до теплотворної здатності газу в залежності від коефіцієнту надлишку повітря представлена на рисунку 2.2.2.

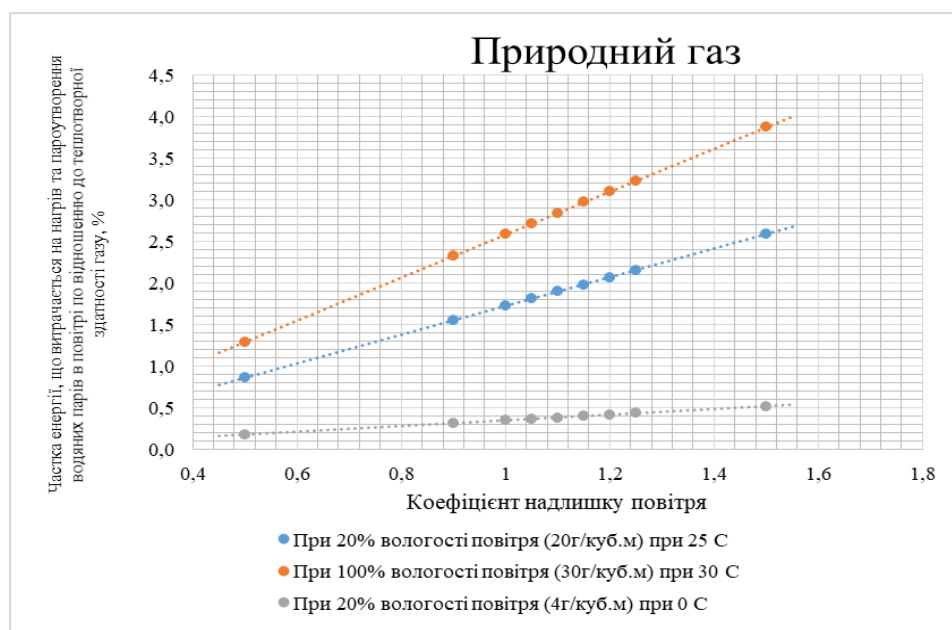


Рис. 2.2.2 - Частка енергії, що витрачається на нагрів та пароутворення водяних парів в повітрі по відношенню до теплотворної здатності природного газу в залежності від коефіцієнту надлишку повітря

Якщо мова йде про спалювання водню, теплотворна здатність якого, як було наведено у розділі 1 цього дослідження, практично втричі менша за відповідні значення природного газу, то вже частка енергії, що витрачається на нагрів та пароутворення водяних парів в повітрі по відношенню до теплотворної здатності такого палива буде відповідно вища (рис. 2.2.3).

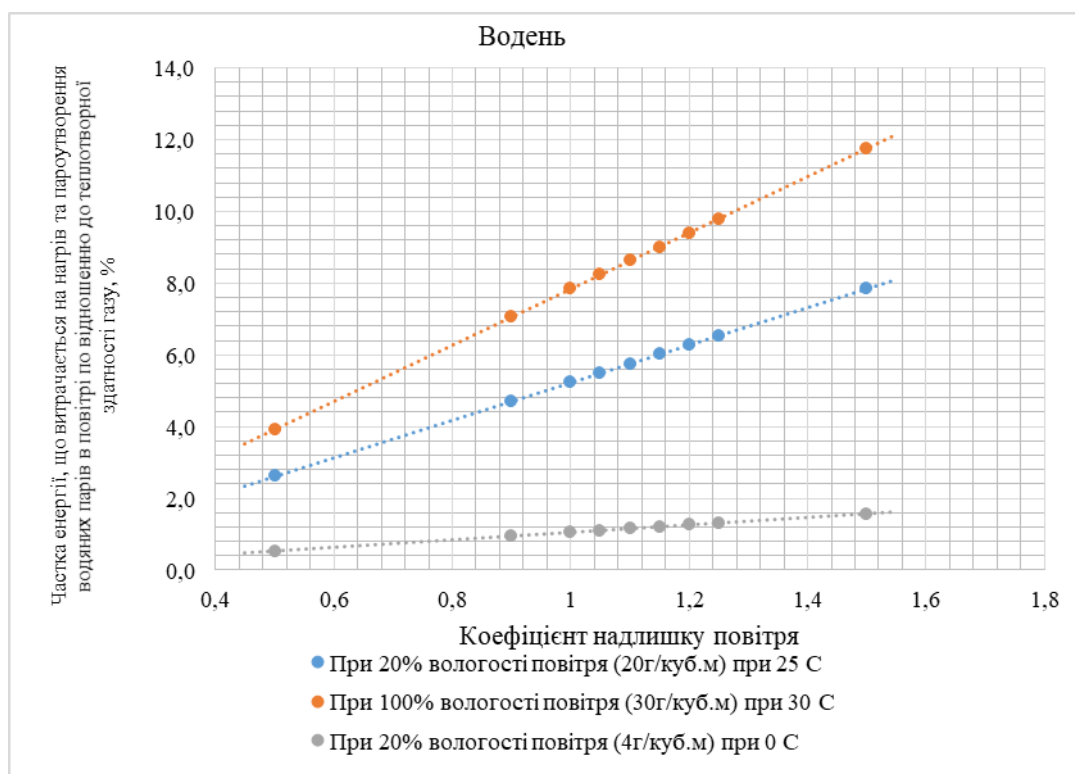


Рис. 2.2.3 - Частка енергії, що витрачається на нагрів та пароутворення водяних парів в повітрі по відношенню до теплотворної здатності водню в залежності від коефіцієнту надлишку повітря

Визначення частки енергії, що витрачається на нагрів та пароутворення водяних парів в повітрі по відношенню до теплотворної здатності суміші палива (природний газ-водень) в залежності від коефіцієнту надлишку повітря, R , можна описати наступним рівнянням:

$$R=A \cdot (1/K_N) \cdot \alpha \quad (2.3.1)$$

де A – коеф., що залежить від вологості повітря та температури і становить:

$A_{20г/куб.м}=2,58$ при 20% вологості повітря (20 г/куб.м) при 25 °С,

$A_{30г/куб.м}=1,72$ при 100% вологості повітря (30 г/куб.м) при 30 °С.

$A_{4\text{г/куб.м}} = 0,344$ при 20% вологості повітря (4 г/куб.м) при 0 °С;

α – коефіцієнт надлишку повітря.

З рисунків 2.2.2 та 2.2.3 та рівняння (2.3.1) можна зробити висновок, що за умови використання палива, що містить вже суміш водню і метану, частка енергії, що витрачатиметься на нагрів та випаровування води, буде залежати від відсоткового співвідношення водень/метан у паливі і зростатиме пропорційно збільшенню частки водню.

2.4. Висновки до розділу 2

1. Утворення NO в процесах спалювання органічного палива в енергетичних котлах зазвичай визначається переважно «термічним» механізмом, і відповідно регулюється впливом на максимальну локальну температуру в топці.

2. «Кінетичний» механізм утворення NO вивчений недостатньо, але саме він має значний вплив на процеси у невеликих спалювальних установках (малих топкових камерах).

3. Процес горіння – розглядався в цій роботі як трикомпонентна реакція, що окрім палива та окисника, включає водяну пару, яка наявна у вигляді вологи в атмосферному повітрі. Зроблено припущення, що водень та його похідні, такі як пероксидний радикал та гідроксили – є стартовими і ключовими компонентами, які запускають всі наступні ланцюгові кінетичні реакції горіння.

4. Проведений чисельний експеримент щодо визначення необхідної енергії на нагрів та випаровування водяних парів, що містяться у атмосферному повітрі, показав:

- у «передполум'яній» зоні основна частина енергії витрачається на нагрів та випаровування H_2O .

- частка енергії, необхідної для нагріву та випаровування води, по відношенню до загального обсягу енергії (теплотворної здатності) палива (воднево-метанової суміші) залежить вологості і температури повітря (вміст

вологи в повітрі), вмісту водню в паливі та коефіцієнту надлишку повітря. Так, при вмісті вологи у повітрі 20г/м^3 значення і коефіцієнту надлишку повітря 1,15, значення цієї частки енергії знаходиться в межах від 1,98% (природний газ) до 6,01 % (водень).

РОЗДІЛ 3. ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНЕ ДОСЛІДЖЕННЯ ВПЛИВУ ВОДНЮ НА ПРОЦЕС ГОРІННЯ ПРИРОДНОГО ГАЗУ

Введення безпосередньо водню у процес горіння є дуже складним (з точки зору відтворення параметрів експерименту) та вибухонебезпечним, тому практична реалізація дослідження впливу водню виконувалась з використанням вологи у вигляді пари, краплинної рідини (води) та водних розчинів перекису водню різної концентрації.

3.1. Блок-схема експериментального стенду

Згідно висновків, зроблених на основі проведення аналітичного огляду оприлюднених результатів робіт [46, 59, 60, 61, 65, 87, 97-100], викладеного в розділі 1, та поставлених задач дисертаційного дослідження, необхідним виявилось створення методики прямого експериментального визначення рівня температур та вимірювання концентрацій монооксиду та діоксиду азоту, що утворюються при спалюванні метану з добавками, що забезпечують різні концентрації водню у паливі.

Метою експериментальних досліджень, проведених здобувачкою в ІТТФ НАН України, стало вивчення процесів у передполум'яній зоні та фронті горіння метану, впливу на процес горіння газоподібного палива добавок вологи у вигляді пари, краплинної рідини (води) та перекису водню, а також комплексного баласту (вологи та повітря). Для досягнення поставленої мети було застосовано: прецизійні пошарові виміри у фронті полум'я; введення баластів та реагентів - повітря, пари, крапельної рідини у фронт полум'я; зміна хімічного складу реагентів та теплоємності баласту, тобто додавання у воду перекису водню у різних концентраціях.

В Інституті технічної теплофізики НАН України було створено експериментальний стенд для дослідження впливу вологи на утворення токсичних речовин при горінні газоподібного палива, та проведено кілька серій експериментів з його використанням.

За базу був взятий стенд, описаний у [84], який доповнений пристроєм для підготовки розчинів (перекису водню) та додатковим насосом для подачі вологи у фронт полум'я. Фото модернізованого експериментального стенду показано на рисунку 3.1.1.



Рисунок 3.1.1 - Фото модернізованого експериментального стенду

Експериментальний стенд (рис. 3.1.2) складається із змонтованих на станині газоходу, забезпеченого системами подачі повітря, газоподібного палива і пари, та підігріву їх до необхідної температури; газопальникового пристрою; системи подачі краплинної вологи у фронт полум'я (рис.3.1.3); системи прецизійного переміщення газовідбірної зонди, термопар і капіляра для подачі краплинної вологи, і системи контролю параметрів процесу горіння.

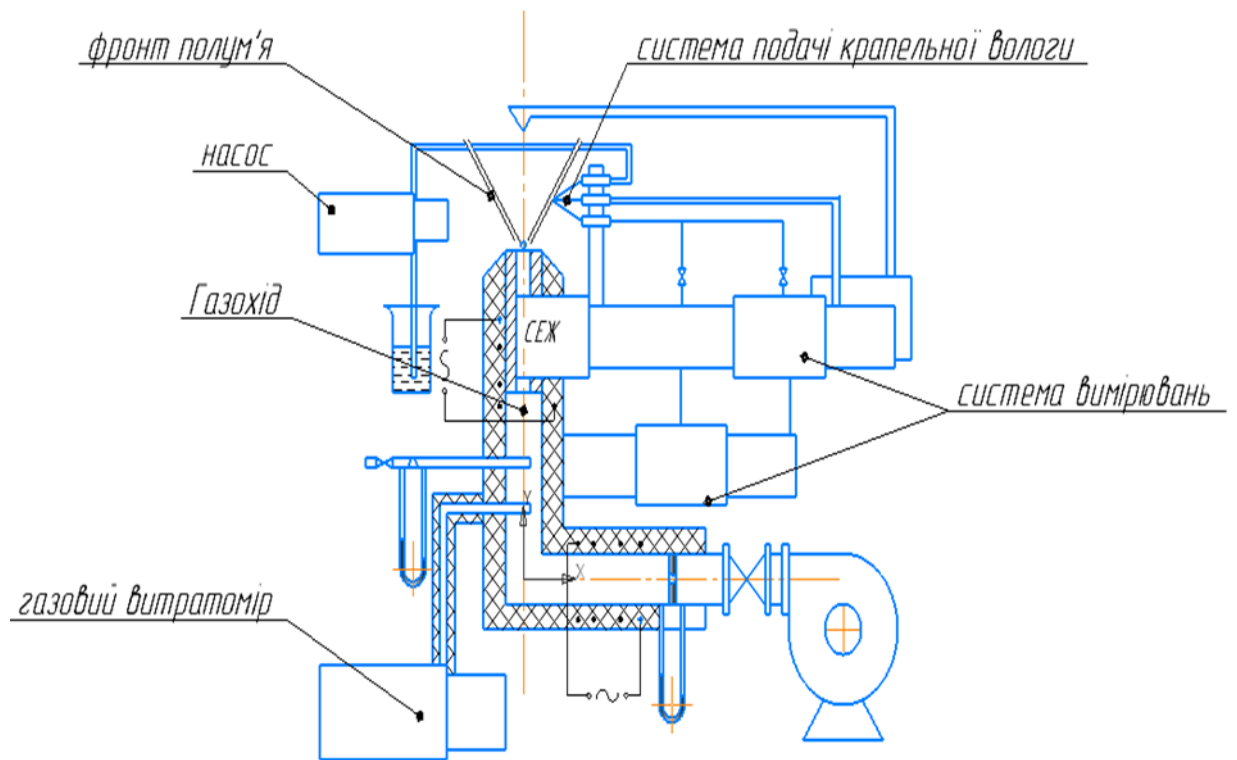


Рисунок 3.1.2 - Принципова схема експериментального стенду

Станина забезпечувала жорсткість і стійкість експериментального стенду в цілому.



Рисунок 3.1.3 - Система подачі краплинної вологи у фронт полум'я

Газохід виконаний у вигляді теплоізолюваної циліндричної труби з вогнетривкого матеріалу (магнезитового скла) діаметром 16,0 мм з

товщиною стінки 4,0 мм, що оснащена приєднаним вентилятором для подачі повітря на горіння. В горизонтальній ділянці встановлена діафрагма з мікроманометром для вимірювання витрати повітря. У вертикальній ділянці змонтоване сопло для виходу газоподібного палива і пари, а також електропідігрівач для нагріву суміші до необхідної температури. На торці вертикальної ділянки газоходу змонтований газопальниковий пристрій.

Подачу газу здійснювали по мідній трубці діаметром 10,0 мм, в якій вмонтована вимірювальна діафрагма з мікроманометром типу МНН-1 для вимірювання витрати газу. Для регулювання витрати повітря і газу у відповідних комунікаціях встановлені прецизійні голчаті вентиля.

Для виробництва пари використовували парогенератор, сполучений з газоходом мідною теплоізолюваною трубкою діаметром 10 мм.

Газорозподільчий пристрій, з отворами діаметром 0,8 - 1,0 мм, забезпечував повне змішування газу з повітрям.

3.2 . Методика визначення впливу крапельної вологи на процес горіння та утворення оксидів азоту

Дослідження впливу добавок водню на утворення оксидів азоту у фронті полум'я були проведені в лабораторних умовах на стенді з прецизійними засобами вимірювання. Схема вимірювань зображена на рис. 3.2.1.

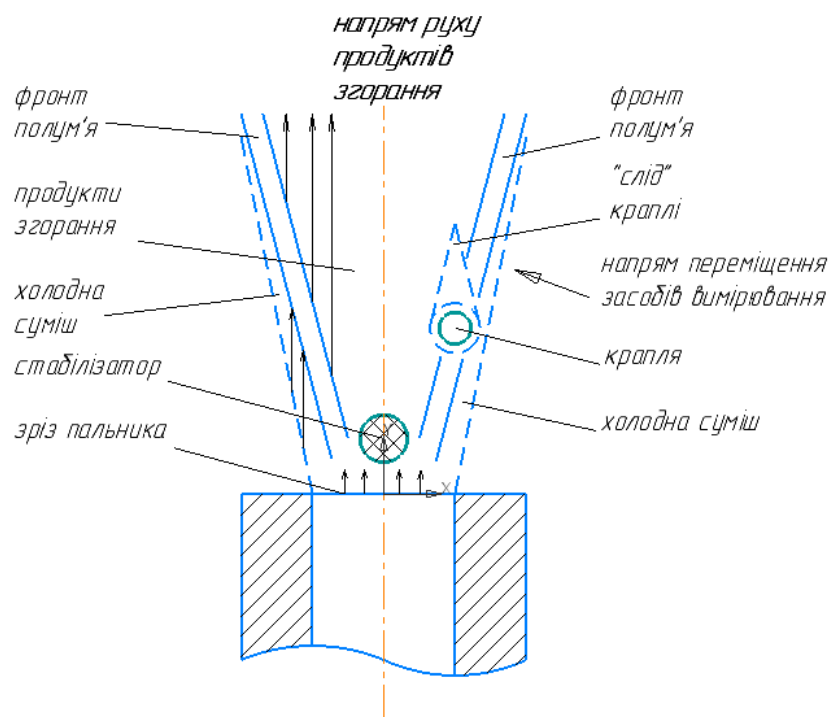


Рис.3.2.1. – Схема вимірювань впливу крапель вологи

Дослідження нормального фронту горіння здійснювалося в стаціонарному «зворотному» факелі метану, що утворюється при безперервній подачі суміші в пальник за сталевим циліндричним стабілізатором ($d=3,0$ мм). Заздалегідь проведеними дослідженнями було встановлено, що в межах діаметрів стабілізаторів від 1 до 5 мм елементарна структура фронту полум'я від діаметру стабілізатора не залежить.

При зміні коефіцієнту надлишку повітря α від 1,03 до 1,8 ширина фронту полум'я не перевищує 2,5 мм. Параметри потоку суміші відповідають $u=$ до 1500 мм/с, $Re=250$. Технічні характеристики засобів вимірювання, що використовувались у експериментальному дослідженні, представлені у додатку А.

Візуальні спостереження в ході експерименту, а також вимірювання полів температур за товщиною плоского фронту полум'я дозволяють зробити висновок про те, що термодинамічний вплив краплі на потік газу (суміші, продуктів згорання) здійснюється, в основному, за рахунок

тепломасообмінних процесів на межі розділу фаз та дії "сліду" краплі на хімічні реакції, що відбуваються в полум'ї. Втрати теплоти через випромінювання незначні, оскільки ширина зони горіння мала, а ступінь чорноти незначний навіть в областях спектру, відповідних смугам поглинання CO_2 і H_2O , тому згідно із законом Кірхгофа, випромінювання полум'я також незначне (при температурі 1800 К, концентраціях CO_2 і H_2O , що відповідають стехіометричному горінню природного газу). Підтвердженням такого ефекту служить той факт, що полум'я екрановано скляною трубкою (відповідно зона високих температур локалізована в рамках цього простору) і не торкається його стінок. За рахунок цього досягається значення майже максимальної температури полум'я для такого стехіометричного складу, незважаючи на те, що в полі зору полум'я знаходяться холодні стінки, що не відбивають теплових променів. При швидкості потоку суміші 1 м/с вплив краплі рідини, внесеної у фронт полум'я, поширюється не більше ніж на 0,4-0,5 мм з боку потоку, що набігає, при діаметрах краплі від 2,0 до 4,0 мм. "Слід" за краплею, тобто зона, в якій вплив краплі на термодинаміку процесу утворення оксидів азоту є суттєвим, досягає розмірів кількох діаметрів краплі.

Для подачі краплинної вологи та розчинів у фронт полум'я використовували два перильстатичні насоси НП-1М, з'єднані з джерелом вологи і капіляром шлангами із силіконової гуми. Вологопідвідні капіляри виконані із сталі X18M12T зовнішнім діаметром 0,8 мм. Витрати вибирали такими, щоб забезпечувати компенсацію випаровування вологи у факелі, тобто зберегти незмінним об'єм і поверхню випаровування краплі, внесеної у фронт ламінарного полум'я. Перильстатичні насоси забезпечені регулятором витрати, що дозволяє стабілізувати витрату вологи на заданому рівні.

В експериментальних дослідженнях основна увага була приділена вимірюванню максимальної локальної температури і відповідних концентрацій оксидів азоту в «сліді» краплі.

Контроль основних параметрів в процесі експериментальних досліджень включав: вимірювання геометричного положення (розташування відносно полум'я) мікрозонда, термопари і капіляра для введення краплинної рідини, витрати всіх складових суміші для горіння, газовий аналіз продуктів згорання, зокрема покроковий по ширині фронту полум'я.

Геометричне розташування мікрозонда, мікротермопари і капіляра для підведення вологи контролювалося стрілочними індикаторами мікроманіпуляторів стереотаксичної установки з ціною поділки 0,1 мм.

Налаштування маніпуляторів давало можливість переміщати зонд і мікротермопару, закріплені в них, в трьох площинах, і забезпечувало кутові переміщення в двох площинах, а дистанційне керування зводило до мінімуму можливість вібрацій в процесі управління рухом мікродатчиків. Тому використання елементів стереотаксичної установки дозволило для зондування фронту полум'я вибрати крок у напрямі, перпендикулярному фронту полум'я, рівний 0,05 мм. Співставність координати в цьому напрямі для спаю мікротермопари і зовнішньої кромки зонду (з урахуванням поправки в 0,1 мм через зону турбулізації) не порушувалася. Фронт полум'я був плаский, що виключало похибки вимірювань через невідповідність координат зонду і термопари в напрямі, паралельному площині фронту.

Величина похибки вимірювань координати через неточну фіксацію зонду і термопари щодо даної точки полум'я не перевищувала 50 мкм. При обробленні експериментальних даних враховувався кут розкриття факелу.

У процесі досліджень були отримані дані про розподіл концентрацій оксидів азоту по ширині фронту полум'я.

3.2.1. Визначення концентрації складових продуктів спалювання та температури полум'я

Вимірювання складу та температури продуктів згорання проводилось з використанням газоаналізатора MRU Optima7 (рис. 3.2.1), який є багатофункціональним приладом, оснащеним засобами відбору та підготовки

проби до аналізу.

Принцип дії газоаналізатора заснований на застосуванні комплекту електрохімічних вимірювальних датчиків – для вимірювання вмісту O_2 , CO , NO , NO_2 , інфрачервоного оптичного датчика для вимірювання вмісту вуглеводнів, термоелектричного перетворювача для вимірювання температури газового потоку, напівпровідникових датчиків – для вимірювання температури навколишнього середовища, вимірювання абсолютного тиску і різниці тисків.

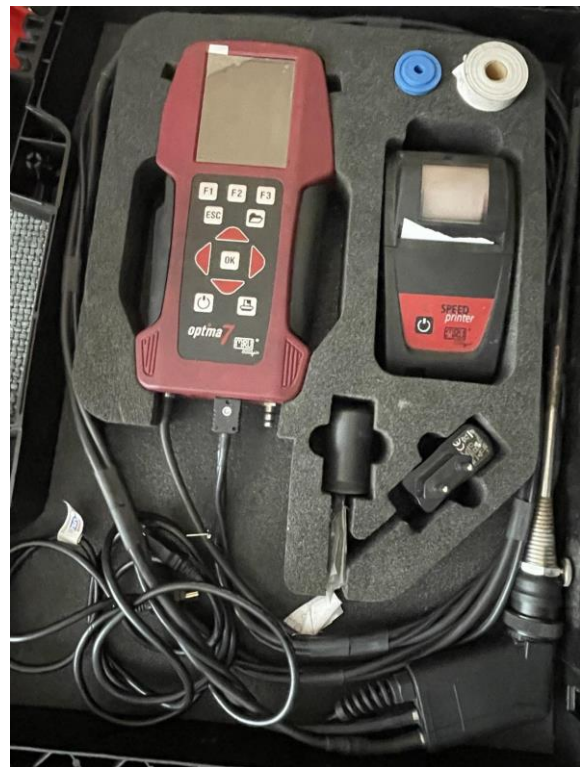


Рис.3.2.1 – Загальний вигляд газоаналізатора MRU Optima 7

Цей газоаналізатор дозволяє проводити контрольні вимірювання, наладку котлів, турбін і печей. При вазі близько 1 кг, цей газоаналізатор дозволяє вимірювати концентрації до 7 типів газів одночасно: електрохімічними сенсорами O_2 , CO , NO , NO_2 , SO_2 , H_2S , і інфрачервоним сенсором CO_2 . При цьому канали CO і NO мають по два діапазони, перемикання діапазонів відбувається автоматично. Крім цього, за допомогою газоаналізатора Optima 7 можна проводити вимірювання швидкості потоку

димових газів та розрахунок масових викидів шкідливих речовин в атмосферу. Час роботи від акумуляторів до 15 годин.

Газоаналізатор Optima 7 сертифікований в Україні, внесений до Держреєстру засобів вимірювання під номером 48157-11, а також внесений до Реєстру ВАТ «НДІ Атмосфера» як газоаналізатор, рекомендований для контролю промислових викидів шкідливих речовин в атмосферу. Таким чином, за сукупністю метрологічних і споживчих характеристик, а також на підставі офіційних документів, цей газоаналізатор можна використовувати для широкого кола завдань технологічного та екологічного призначення.

Відбір газу на аналіз проводився так званим ізокінетичним методом. Суть цього методу полягає в тому, що швидкість відбору газу підтримується приблизно рівною швидкості потоку в точці вимірювань. Експериментально встановлено, що при ізокінетичному методі відбору невеликі відхилення швидкості газу на вході у відбірник від швидкості потоку слабо впливають на результати вимірювань. При швидкості відбору від 1,5 до 7 м/с та швидкості потоку ≈ 2 м/с концентрація NO протягом часу вимірювання практично не змінюється. Вказаний факт дозволяє підтримувати лише приблизно рівність швидкостей відбору і потоку в точці вимірювань, що істотно спрощує методику відбору проб.

Протягом десятків років існувала думка, що оксиди азоту утворюються в процесах горіння лише у вигляді монооксиду і після виходу з димаря доокислюються в діоксид [101,102]. У зв'язку з цим існуючі способи аналізу орієнтовані в основному на визначення концентрації оксиду азоту або NO_x в димових газах. Проте проведені дослідження Сігала О.І., введені в методику [103] показали, що в полум'ях та топках котельних агрегатів утворюються значні кількості діоксиду азоту. Оскільки механізми утворення, а отже і методи зниження концентрацій, для монооксиду і діоксиду азоту різні, то на цей час зниження токсичності димових газів диктує необхідність роздільного визначення вмісту оксиду та діоксиду азоту. Крім того, необхідно наголосити

на наступній обставині: із зменшенням потужності та збільшенням теплової напруги вміст NO_2 в продуктах згорання зростає. Зволоження дуттьового повітря з метою зниження вмісту оксидів азоту в димових газах є додатковим джерелом вологи в полум'ї. Наявність істотних кількостей H_2O в полум'ї веде до інтенсифікації процесу переходу NO в NO_2 в розташованих поблизу полум'я зонах, що зумовлює необхідність роздільного визначення концентрацій NO і NO_2 .

Характерна особливість протікання реакцій доокислення NO в NO_2 пов'язана з наявністю низькотемпературних областей в безпосередній близькості до зони горіння, тобто високих значень градієнтів температури, що практично можливе при зіткненні факела з водоохолоджуваною поверхнею, що має відповідно “низьку” температуру, попаданні в зону горіння значних кількостей холодного повітря, продуванні факела розрізненими струменями холодного повітря, а також застосуванні інших способів різкого охолодження продуктів згорання в безпосередній близькості від полум'я або в ньому самому. Приведені обставини є джерелом додаткових похибок аналізу при роздільному визначенні NO і NO_2 в різних пробах.

3.2.2 Визначення температури полум'я

У роботі використовувалися платінородієві термопари (один з електродів містить 6% родію, інший – 30% родію) з діаметром спаю (спай кулястої форми) $d_t = 0,05$ мм. Електроди, що виходять з корпусу термопари, розташовувалися паралельно вісі факела. Це пов'язано з тим, що температура уздовж факела змінюється набагато менш різко, ніж в поперечному напрямі, і отже вказане розташування електродів забезпечує якнайменші похибки вимірювань, обумовлені нерівномірністю температурного поля. Відстань від гарячого спаю термопари до її корпусу велика ($\frac{l_t}{d_t} > 10$, d_t - діаметр спаю термопари), і, згідно оцінкам, відтік теплоти по електродах дуже малий і його можна не враховувати. Цей висновок підтверджується вимірюванням

радіальних профілів температури у факелі. Щоб зона максимальних температур не зміщувалась за рахунок зовнішніх процесів, був встановлена скляна трубка (екран).

При вимірюванні достатньо високих температур спай термопари випромінює енергію, і внаслідок цього його температура нижча за істинну температуру потоку. Тому при вимірюванні температури полум'я враховувалась поправка на випромінювання.

У зв'язку з тим, що для вимірювань температури використовувалися платінородієві термопари, існувала небезпека каталітичного окислення водню, що міститься в продуктах згорання, на поверхні гарячого спаю. Цей ефект може привести до того, що виміряна в досліді температура буде завищеною. Для того, щоб визначити, чи впливає каталітичний ефект на показання платино-родієвої термопари, вимірювання температури в пропановому факелі проводилися також за допомогою хромель-алюмельової термопари. Оскільки в останньому випадку вказаний ефект відсутній, то зіставляючи результати вимірювань, одержані термопарами, виготовленими з різного матеріалу, можна кількісно оцінити роль каталітичного допалювання. Розбіжності в показаннях термопар не перевищують точності вимірювань, що свідчить про слабкий вплив каталітичного ефекту на температуру гарячого спаю.

Сигнал ЕРС з термопар подавався в блок аналого-цифрового перетворювача сигналів з подальшою передачею через порт USB в комп'ютер (детально описано у Додатку В). Похибка цієї системи, згідно паспортним даним, складає не більше 1,5% від повного діапазону вимірювань.

Таким чином, методика вимірювань, що використовувалась, за думкою здобувача, дозволяла одержувати достовірні дані про поле температур в полум'ї.

3.3. Оцінка похибки вимірювань

Повний перелік експериментальних замірних точок значень температури та концентрації оксидів азоту, на основі яких проводився аналіз отриманих даних та визначення похибки вимірювань, представлені у Додатку Г. Усереднені їх значення, які брались для подальшого аналізу, представлені в таблиці 3.3.1.

Таблиця 3.3.1. Усереднені значення замірів, які брались для подальшого аналізу експериментальних даних

δ, мм	Без введення вологи		З введенням 1 каплі води		З введенням 2-х капель води	
	С (NO), мг/м ³	Т, К	С (NO), мг/м ³	Т, К	С (NO), мг/м ³	Т, К
-0,5		473		474		475
0	19	1273	18	1085	18	1072
0,5	28	1612	23	1375	22	1325
1	108	1618	60	1372	48	1323
1,5	114	1617	74	1370	70	1320
2	111	1620	76	1371	70	1319
2,5	105	1616	74	1330	70	1295
3	103	1473	68	1259	63	1211

3% розчин перекису водню		7% розчин перекису водню		15% розчин перекису водню		30% розчин перекису водню	
δ, мм	С (NO), мг/м ³	δ, мм	С (NO), мг/м ³	δ, мм	С (NO), мг/м ³	δ, мм	С (NO), мг/м ³
0	14	0	20,4	0	20,1	0	30,2
0,38	18,1	0,38	29,4	0,5	46,3	0,38	46,1
0,51	31	0,51	41,2	0,75	58,3	0,5	52,2
0,75	47,2	0,75	53,4	1,35	85,4	1	79,3
1	60	1	66,4	2	86	1,5	93,1
1,5	70	1,5	80,2	2,5	85,9	2	92,8
2	70,5	2	80,5			2,5	92,7
2,5	65,1	2,5	80,4				

Згідно рекомендацій, які визначені в [105], проводилась повна оцінка похибок вимірювань, обчислених при прямих вимірюваннях фізичної величини.

Відповідно до описаної методики експерименту для кожної точки (координати) перерізу фронту полум'я вносились крапля розчину з різною концентрацією розчину перекису водню. Було проведено по десять повторних вимірювань фізичної величини у кожному з перерізів. В результаті для кожного експерименту визначено абсолютну та відносну похибки вимірювань. Детальний приклад розрахунку проведено для 3% розчину перекису водню для $\delta=0$ мм (передполум'яна зона). Значення всіх інших замірів концентрації оксидів азоту та температури по ширині фронту полум'я представлено у таблиці Додатку Г.

1) Середнє арифметичне значення виміряних фізичних величин:

$$\bar{Z} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n Z_i, \quad (3.3.1)$$

де n – кількість проведених замірів фізичної величини в перетині фронту полум'я із заданою фіксованою величиною вмісту перекису водню в розчині; ($n = 10$)

Z_i – значення фізичної величини.

$$C_1 = 13,94 \quad C_2 = 14,22 \quad C_3 = 14,43 \quad C_4 = 14,28 \quad C_5 = 14,25$$

$$C_6 = 14,25 \quad C_7 = 14,24 \quad C_8 = 14,25 \quad C_9 = 14,23 \quad C_{10} = 14,33$$

$$C = 1/10(13,9 + \dots + 14,3) = 14,24 \text{ мг/м}^3$$

2) Похибка повторних вимірювань:

$$\Delta Z_i = |\bar{Z} - Z_i| \quad (3.3.2)$$

$\Delta C_1 = 0,302$	$\Delta C_2 = 0,022$	$\Delta C_3 = 0,188$	$\Delta C_4 = 0,038$	$\Delta C_5 = 0,008$
$\Delta C_6 = 0,008$	$\Delta C_7 = 0,002$	$\Delta C_8 = 0,008$	$\Delta C_9 = 0,012$	$\Delta C_{10} = 0,088$

$$\Delta Z_i^2 = (\bar{Z} - Z_i)^2, \quad (3.3.3)$$

$\Delta C_1^2 = 0.00092$	$\Delta C_2^2 = 0.00084$	$\Delta C_3^2 = 0.035$	$\Delta C_4^2 = 0.0014$	$\Delta C_5^2 = 0.00058$
$\Delta C_6^2 = 0.00124$	$\Delta C_7^2 = 0.0004$	$\Delta C_8^2 = 0.0006$	$\Delta C_9^2 = 0.00014$	$\Delta C_{10}^2 = 0.00077$

де $i = 1, \dots, n$

Результати вимірювань та обчислень заносимо у відповідні таблиці. Якщо похибки повторних вимірювань та їхні квадрати для n -го вимірювання відрізняються на порядок, то вважаємо це промахами, значення таких експериментів не беремо для подальших розрахунків, повторюємо обчислення п.1 та п.2 без врахування замірів сумнівних значень фізичної величини. В даному випадку замір №3 не беремо для подальших обчислень.

3) Випадкова похибка вимірювання:

$$\Delta Z_B = t_{0,95} \cdot \sigma_B, \quad (3.3.4)$$

де $t_{0,95}$ — коефіцієнт Стюдента для n вимірювань і довірчої ймовірності 0,95 (рис. 3.3.1.).

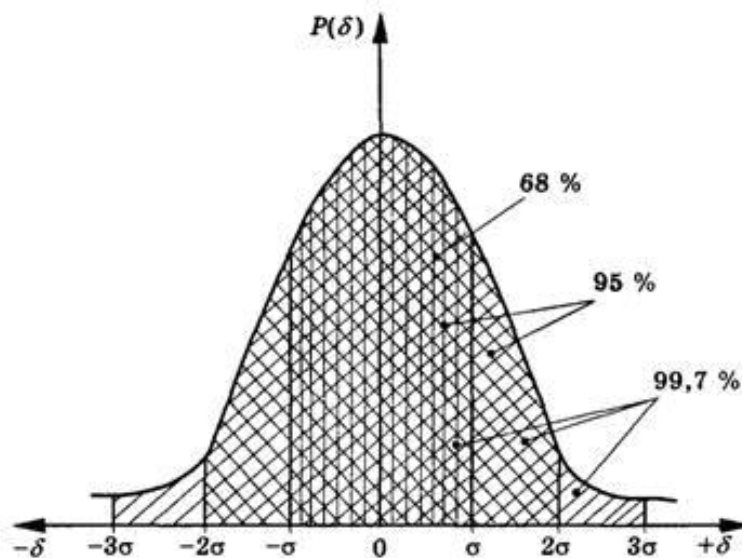


Рис. 3.3.1 – Графічне зображення розташування довірчих меж та довірчих ймовірностей.

Для звичайних технічних вимірювань, довірна ймовірність береться у межах 0,9—0,95. Виходячи з нормального закону розподілу, можна розраховувати ймовірність виникнення випадкових похибок з різними значеннями. Значення коефіцієнтів Стьюдента $t_{0,95}$ представлено у Таблиці 3.3.1:

Таблиця 3.3.1. Визначення коефіцієнтів Стьюдента

m	Надійна ймовірність P								
	0,1	0,2	0,4	0,6	0,8	0,9	0,95	0,98	0,99
2	0,16	0,33	0,73	1,38	3,08	6,31	12,70	31,80	63,70
3	0,14	0,29	0,62	1,06	1,89	2,92	4,30	6,96	9,92
4	0,14	0,28	0,58	0,98	1,64	2,35	3,18	4,54	5,84
5	0,13	0,27	0,57	0,94	1,53	2,13	2,78	3,75	4,60
6	0,13	0,27	0,56	0,92	1,48	2,02	2,57	3,36	4,03
7	0,13	0,27	0,55	0,90	1,44	1,94	2,45	3,14	3,71
8	0,13	0,26	0,54	0,90	1,42	1,89	2,36	3,00	3,50
9	0,13	0,26	0,54	0,90	1,40	1,86	2,31	2,90	3,36
10	0,13	0,26	0,54	0,88	1,38	1,83	2,26	2,82	3,25
12	0,13	0,26	0,54	0,87	1,36	1,80	2,20	2,72	3,11
14	0,13	0,26	0,54	0,87	1,35	1,77	2,16	2,65	3,01
16	0,13	0,26	0,54	0,87	1,34	1,75	2,13	2,60	2,95
18	0,13	0,26	0,53	0,86	1,33	1,74	2,11	2,57	2,90
20	0,13	0,26	0,53	0,86	1,33	1,73	2,09	2,54	2,86
25	0,13	0,26	0,53	0,86	1,32	1,71	2,06	2,49	2,80

σ_B — виправлене вибіркве середнє квадратичне відхилення.

$$\sigma_B = \sqrt{\frac{1}{n \cdot (n-1) \sum_{i=1}^n (\bar{z} - z_i)^2}} \quad (3.3.5)$$

$$\sigma_B = \sqrt{\frac{1}{9 \cdot 8(0,00092 + \dots + 0,0007)}} = 0,28$$

$$\Delta C_B = 2,31 \cdot 0,28 = 0,659 \text{ мг/м}^3$$

4) Похибка приладу

$$\Delta_{\text{пр}} Z = \frac{1}{300} \cdot t_p \cdot k \cdot Z_{\text{гр}}. \quad (3.3.6)$$

Для надійної ймовірності $P = 0,95$ з таблиці 3.3.2 визначаємо $t_p=1,98$

Таблиця 3.2.2 - Надійна імовірність P для надійного інтервалу, вираженого в частках середнього квадратичного відхилення

t_p	P	t_p	P	t_p	P
0,1	0,07966	1,6	0,89040	2,8	0,99489
0,5	0,38292	2,0	0,95450	3,0	0,99730
0,7	0,51607	2,2	0,97219	3,5	0,99953
1,0	0,68269	2,4	0,98360	4,0	0,99994
1,3	0,80640	2,6	0,99068	4,5	0,99999

*У випадку, коли клас точності приладу невідомий, приймають, що гранична похибка дорівнює половині ціни поділки шкали приладу.

k – клас точності приладу (паспортні дані)

$Z_{гр}$ – це максимальне значення, до якого може вимірювати прилад у даному діапазоні

$$\Delta C_{гр} = \frac{1}{300} \cdot 1,98 \cdot 0,05 \cdot 1245 = 0,41 \text{ мг/м}^3$$

5) похибка заокруглення

$$\Delta Z_3 = P \cdot \frac{h}{2}, \quad (3.3.7)$$

$$\Delta C_3 = 0,95 \cdot \frac{0,005}{2} = 0,002 \text{ мг/м}^3$$

де h – інтервал заокруглення, половина останнього розряду вимірної величини

б) Загальна абсолютна похибка

$$\Delta Z = \sqrt{(\Delta Z_B)^2 + (\Delta Z_{гр})^2 + (\Delta Z_3)^2} \quad (3.3.8)$$

$$\Delta C = \sqrt{(0,659)^2 + (0,41)^2} = 0,776$$

За правилом «трьох сигм», якщо одне або декілька середньоквадратичних відхилень величин принаймні втричі менші за решту, то такими відхиленнями можна знехтувати (прирівняти до нуля).

7) відносна похибка

$$\delta Z = \frac{\Delta Z}{Z} \cdot 100\% \quad (3.3.9)$$

$$\delta C = \frac{0,776}{14,22} \cdot 100\% = 4,63\%$$

Максимальні та загальні похибки відносні похибки вимірювання основних параметрів експериментів представлені в Таб.3.3.4

Таблиця 3.2 –Максимальні відносні похибки вимірювання

Параметр	Максимальне значення
Загальна абсолютна похибка концентрації оксидів азоту, мг/м ³	0,776
Відносна похибка концентрації оксидів азоту, %	4,63
Загальна абсолютна похибка локальної температури, С	0,8
Відносна похибка концентрації локальної температури, %	5,03

3.4. Висновки до розділу 3

1. У рамках підготовки експерименту модернізований експериментальний стенд для забезпечення можливості проведення дослідження утворення монооксиду та діоксиду азоту у фронті ламінарного газового полум'я, що містить водень та водоводневі суміші.

2. Експериментальний стенд надавав можливість дослідження впливу краплинної рідини, що містить рідкі розчини зі змінним вмістом водневмістких компонентів у процесі спалення на процес утворення монооксиду та діоксиду азоту .

3. Проведені випробування експериментальної установки, отримані зрівні характеристики, відповідно яких установка доопрацьована для роботи з розчинами, що містять змінний вміст водню.

4. Підбрані засоби вимірювань, визначено абсолютні та відносні похибки вимірюваних величин.

РОЗДІЛ 4. ДОСЛІДЖЕННЯ ВПЛИВУ ВОДНЮ У СКЛАДІ ГАЗОПОДІБНОГО ПАЛИВА НА ПРОЦЕС УТВОРЕННЯ ОКСИДІВ АЗОТУ

4.1. Вплив крапельної вологи на процес горіння і утворення оксидів азоту

Дослідження, проведені на експериментальному стенді, описаному в попередньому розділі, показали (рис. 4.1.1а, рис 4.1.1б) , що введення вологи знижує утворення оксидів азоту на 30 - 50% (рис. 4.1.1а) при зниженні температури горіння на $\sim 200\dots 250^\circ$ (рис. 4.1.1б). Порівняння результатів при введенні однієї і двох крапель у відповідну зону полум'я показало, що суттєвої зміни вмісту оксиду азоту з введенням додаткової майже двократної кількості води (яка в даному випадку є баластом) не відбувається. Найбільш ймовірно це пояснюється достатнім зниженням температури в зоні горіння при введенні вже однієї краплі. З рисунку видно, що введення однієї краплі знижує максимальну локальну температуру в зоні горіння на близько 200° , тому подальше зниження температури згідно з теорією Д.І. Франк-Камецького і не повинно вести до суттєвої зміни концентрації NO.

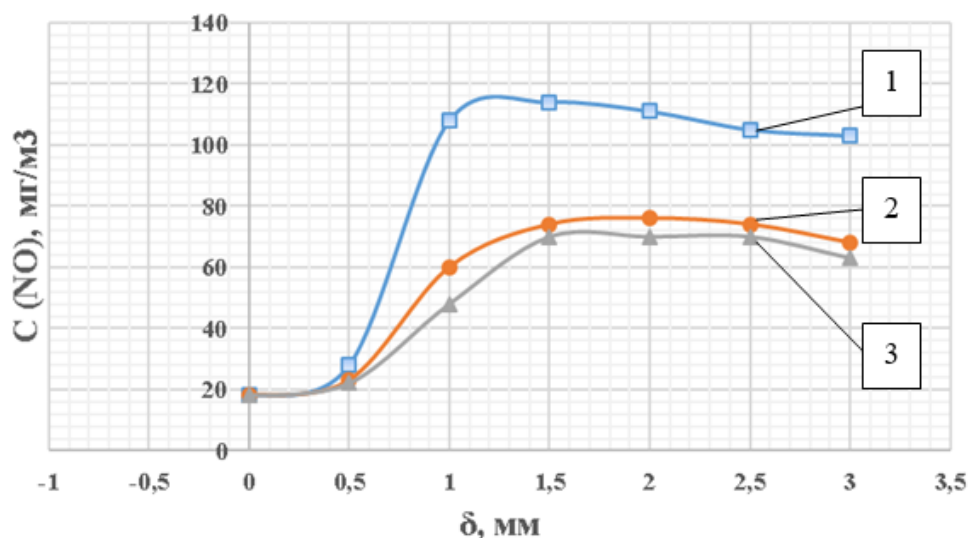


Рис. 4.1.1а. Утворення оксидів азоту по ширині фронту полум'я ламінарного факелу метану (1), при внесенні 1 краплі води (2) та 2-х крапель (3)

З урахуванням вищевикладеного способу введення вологи до зони горіння показало, що ефективність придушення утворення оксидів азоту знижується, якщо випаровування крапель відбувається до їх потрапляння у фронт полум'я. З іншого боку, під час проходження фронту полум'я питома поверхня випаровування (а отже поверхня контакту, тобто поверхня фазового переходу) крапель має бути максимальною, тобто діаметр краплі (при розпилюванні) – мінімальним. Отже ефект зниження утворення оксидів азоту буде максимальним за рахунок термодинамічного впливу на фронт полум'я при постійній витраті води, тобто зниженні ККД (вода проходить крізь фронт полум'я як мікрокраплі) [84].

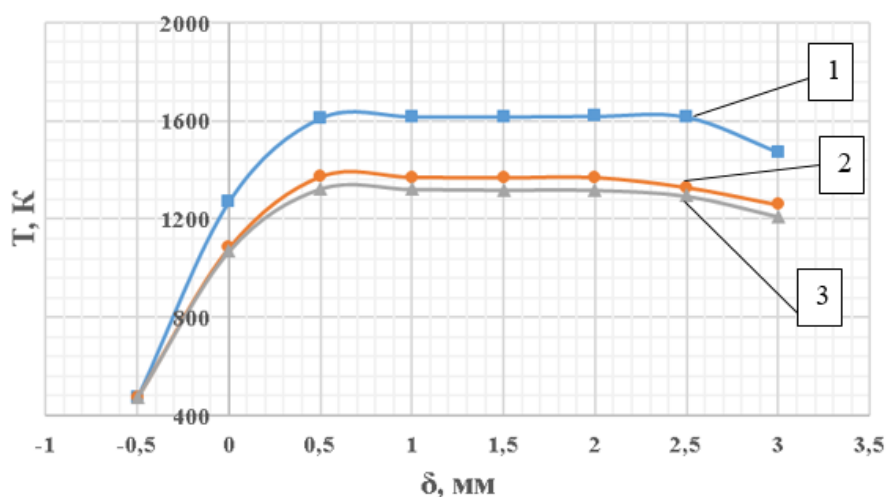


Рис. 4.1.1б. - Розподіл температури по ширині фронту полум'я ламінарного факелу метану без введення вологи (1), з введенням 1 краплі (2), з введенням 2-х крапель (3)

Більш чітко вплив водневмісних розчинів на кінетику процесу горіння дозволили виявити проведені експерименти з введення у факел краплинного розчину перекису водню різних концентрацій.

Розчин перекису водню різної концентрації (до 30%) подавався у вигляді краплі рідини у фронт полум'я ламінарного факелу метану (детальний опис установки та схема введення крапельної вологи описані у попередньому розділі). Зведені таблиці вимірювань фізичних величин представлені у додатку Г.

Отримані результати показали подібність характеру залежностей зміни концентрацій оксиду азоту по ширині фронту полум'я при введенні розчинів перекису водню характеру такої залежності при введенні дистильованої води (рисунок 4.1.2).

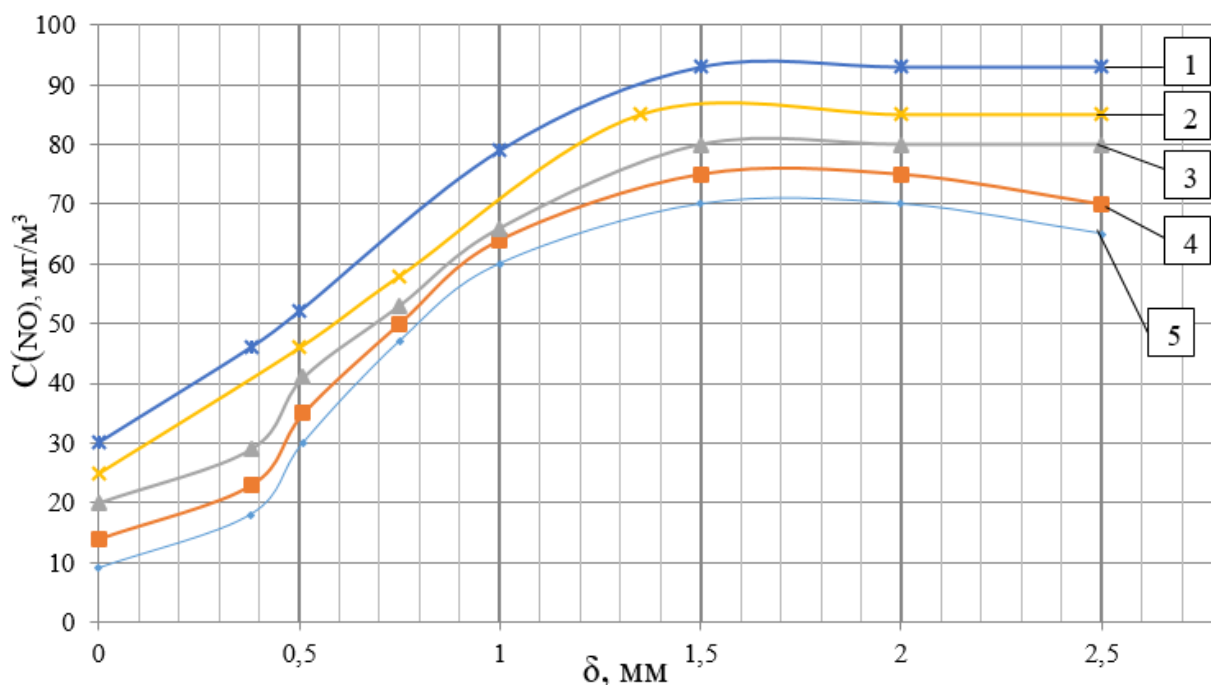


Рис. 4.1.2 - Розподіл концентрацій оксидів азоту від вмісту водню у водному розчині перекису водню по ширині фронту полум'я ламінарного факелу метану при: введенні 30% розчину H_2O_2 (1), 15% розчину H_2O_2 (2), 7% розчину H_2O_2 (3), 3% розчину H_2O_2 (4), 1 капля дист. води (5)

З рис. 4.1.2 можна бачити, що зі зменшенням вмісту перекису водню у розчині (а отже, відповідним зростанням масового вмісту водню) концентрація оксиду азоту знижується. Введення водню інтенсифікує кінетичні процеси.

Інтенсивне зростання концентрації оксиду азоту спостерігається вже у початкових перетинах фронту полум'я з моменту початку розігрівання суміші ще до досягнення максимальної температури. Причому, чим вищої концентрації розчин H_2O_2 (відповідно менша частка водню у розчині) вноситься у фронт факелу, тим інтенсивніше відбувається зростання вмісту оксиду азоту. При внесенні у фронт полум'я 30% розчину H_2O_2 рівень

концентрації NO практично досягає початкового, тобто одержаного без внесення краплинної вологи ($90-95 \text{ мг/м}^3$), тоді як внесення у фронт полум'я H_2O приводить до зниження концентрації NO до 65 мг/м^3 , тобто на 35-40 %. Це можливо пояснити тим, що перекис водню інтенсивніше ніж вода утворює радикал OH, що бере активну участь у окисненні вуглеводнів і CO.

На рис. 4.1.3 представлена залежність вмісту NO у продуктах спалення в залежності від вмісту водню в розчині. Пунктирною лінією (до т. А') показано ймовірне очікуване значення концентрації оксиду азоту для перерізу фронту полум'я при $\delta=0,51 \text{ мм}$. Проте, серія експериментів проведених в цьому перерізі показала наявність відхилення (точка А). Авторка припускає, що ця область (орієнтовно середина фронту полум'я) являє собою актуальну зону для подальшого дослідження з ціллю більш точного пояснення відхилень, різниця між отриманим і очікуваним значеннями концентрації оксидів азоту дорівнює $6-8 \text{ мг/м}^3$ і становить близько 10,5%.

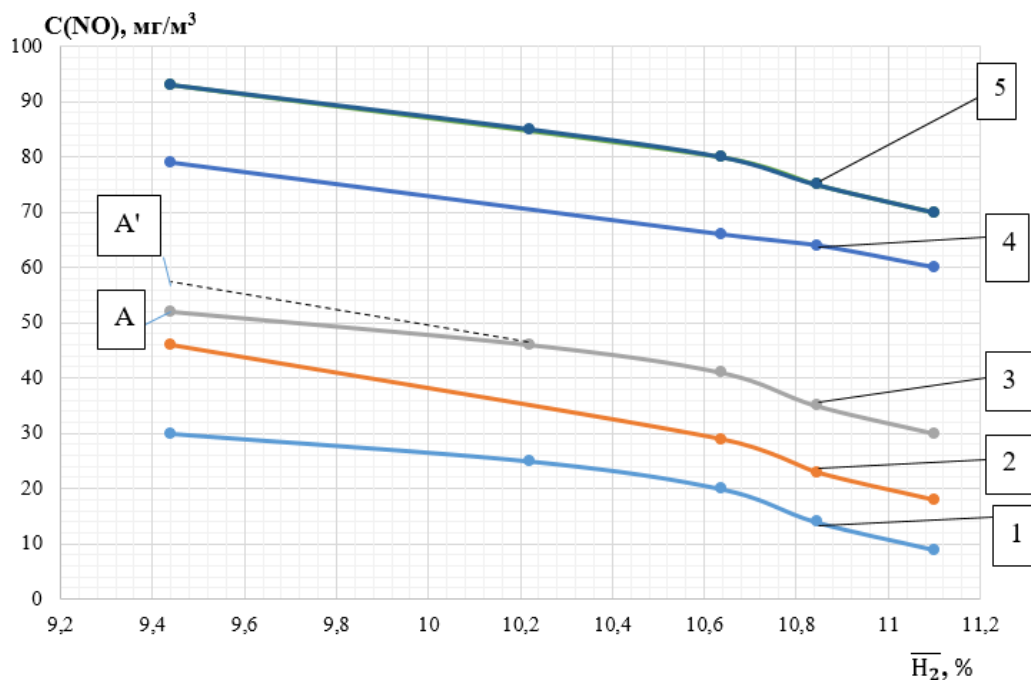


Рис. 4.1.3. - Вміст NO у продуктах спалення в залежності від вмісту водню в розчині при: $\delta=0 \text{ мм}$ (1), $\delta=0,38 \text{ мм}$ (2), $\delta=0,51 \text{ мм}$ (3), $\delta=1 \text{ мм}$ (4), $\delta=2 \text{ мм}$ (5),

Збільшення концентрації розчину H_2O_2 до 30% (і відповідно зменшення вмісту водню у розчині до 9,44 %) призводило до збільшення сумарного виходу монооксиду азоту на 35-45% для умов нашого експерименту за рахунок інтенсивнішого утворення радикалів OH^\cdot , HO_2^\cdot і збільшення рівня температур, при догоранні CO . Це узгоджується з результатами дослідження [89], у яких встановлено, що при температурах більших 1100 К концентрація оксидів азоту різко зростає, інтенсифікується догорання CO і зростає тепловий ефект процесу.

Відокремлені вимірювання концентрацій NO і NO_2 показали, що залежність частки NO_2 від вмісту H_2 у розчині, що подається до ламінарного факелу метану, є неоднозначною і істотно залежить від місця відбору проби в перерізі фронту полум'я.

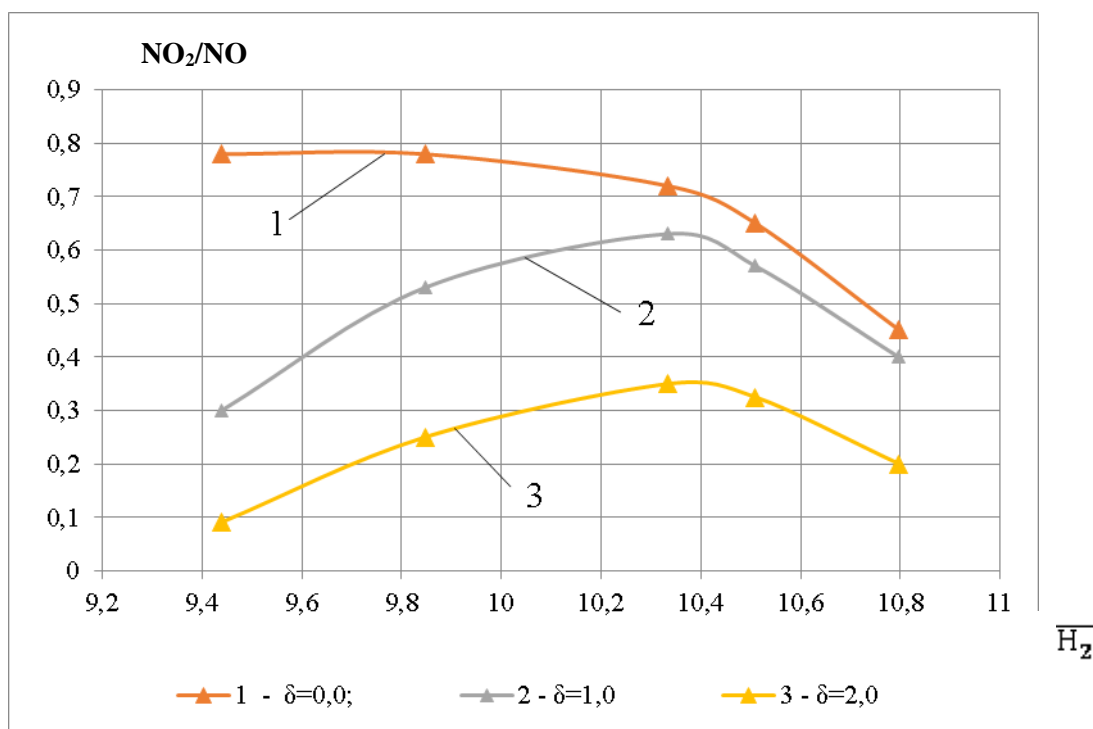


Рис. 4.1.4 - Вплив вмісту водню у розчині на утворення NO_2 у фронті полум'я ламінарного факелу метану:

1 - передня межа фронту, координата $\delta=0,0$ мм;

2 - середній переріз фронту, координата $\delta=1,0$ мм;

3 - задня межа фронту, координата $\delta=2,0$ мм.

В початковому перерізі фронту (рис.4.1.4 крива 1) співвідношення концентрації NO_2 до NO сягає вже 0,78 при вмісті водню у розчині 9,85 %

(що відповідає 22 % концентрації розчину H_2O_2), і виходячи на ці значення, залишається практично незмінною при подальшому зменшенні частки водню у розчині (відповідного збільшення концентрації розчину перекису водню). В середньому перерізі фронту полум'я (рис. 4.1.2 *крива 2*) відношення концентрацій NO_2/NO має свій екстремум, який сягає 0,63 по ординаті, тобто зменшення концентрації водню у розчині (збільшення концентрації H_2O_2 до 15%) для перерізу фронту полум'я також приводить до істотного збільшення частки NO_2 , проте подальше збільшення відсоткового вмісту перекису водню призводить до зменшення співвідношення до рівня 0,3, що приблизно відповідає впливу 9,44 % вмісту водню у розчині (3% розчину H_2O_2). *Крива 3* відповідає перерізу з координатою 2,0 мм, і майже еквідистантно повторює *криву 2*, проте з менш яскраво вираженим максимумом в точці з координатою вмісту водню у розчині близько 9,4%.

Таким чином, температура вже близько 1110 К істотно впливає на швидкості реакції і змінює кінетику процесів, які відбуваються за участі водню, що подавався в розчин, причому у різних перерізах фронту ці зміни різні за характером, що можна пояснити зменшенням часу існування H_2O_2 (за рахунок змін локальних температур, часу розпаду молекули H_2O_2) у полум'ї до 20 *мс* і менше [82].

Важливим також є факт, що ступінь дії водню у розчині перекису водню на процес доокислення NO в NO_2 для різних температур має свій екстремум по концентрації речовини, що вводиться. З рисунку 4.1.4 видно, що цей максимум концентрації NO_2 спостерігається для вмісту H_2 у розчині близько 10,4% .

4.2. Обговорення результатів дослідження впливу введення перекису водню на процес утворення оксидів азоту

Однією з причин суперечності даних про вплив вологи на утворення оксидів азоту в топках паливоспалювальних установок є різноманіття факторів, що впливають на процес горіння у промислових умовах. Зміна

режимних параметрів, конструктивні особливості агрегатів і навіть різні методи контролю призводять до того, що введення вологи здійснюється в різних умовах, що не дає змоги з'ясувати основні закономірності взаємодії вологи з фронтом полум'я. Проведені раніше стендові дослідження дозволили виявити деякі особливості складного процесу взаємодії вологи з різними компонентами в зоні горіння, проте такі результати є досить неповними.

Можна зробити висновок, що найсприятливішими умовами доокислення NO в NO_2 є введення водню з вмістом близько 10,3% у вигляді розчину перекису водню, у температурному інтервалі 800-1000 К. Цим умовам найбільш відповідає заповум'яна область (а не фронт полум'я). Проте ці твердження потребують додаткового вивчення.

При підвищенні частки водню у паливі, що спалюється в топці котла з урахуванням наявності вологи в дуттьовому повітрі буде зростати концентрація NO_2 , відповідно частка NO зменшиться.

Цей ефект збільшення частки NO_2 може бути використаний для зменшення викидів оксиду азоту в атмосферу шляхом очищення димових газів в контактних апаратах, тобто абсорбції NO та NO_2 водою. Відомо, що NO_2 повністю розчиняється у воді, а частка розчинення NO не перевищує 7% та залежить від температури і наявності домішок, що інтенсифікують процес.

Введення водню у розчинах в зону горіння може здійснюватися кількома способами і, зокрема, у вигляді крапель рідини, як було показано в роботі.

Введення вологи в водотрубну топку збільшує кількість триатомних газів, що дещо покращує радіаційну тепловіддачу до екранних труб при одночасному зниженні максимальної температури горіння природного газу за рахунок збільшення баластної складової – вологи в повітрі.

При дисоціації води на O_2 і H_2 з подальшим утворенням сильних окиснювачів-радикалів OH^\cdot і HO_2^\cdot , які інтенсифікують процес горіння вуглеводнів, у тому числі і CO , відбувається зниження температури факела за

рахунок ендотермічності розпаду молекули H_2O . В екранованій топці при спалюванні природного газу і введенні зволоженого дуттєвого повітря наявні декілька чинників, що впливають на ефективність спалювання палива:

1. Підвищення ефективності:

Інтенсифікація процесів горіння за допомогою водню неодмінно призведе до прискорення процесу утворення кінцевих продуктів реакції у вигляді CO_2 і H_2O , які є триатомними газами і відповідно забезпечують підвищення світимості продуктів спалювання, що інтенсифікує радіаційну теплопередачу на теплосприймаючі екрани. Дисоціація води при $T > 1850 \text{ K}$ інтенсифікує процес спалювання вуглеводнів за рахунок утворення сильнодіючих окиснюючих радикалів.

- Введення H_2 підвищує температуру горіння суміші, що призводить до збільшення утворення оксидів азоту

2. Зниження ефективності:

- Введення вологи, як баласту, зменшує температуру факелу і, відповідно, ефективність теплопередачі;

- Дисоціація води при $T > 1850 \text{ K}$ є ендотермічною реакцією, що обумовлює зменшення теплового ефекту горіння.

4.3. Висновки до розділу 4

1. На відміну від загально існуючого уявлення про домінування термічного механізму утворення оксидів азоту при максимальних локальних температурах полум'я вище $750 - 800 \text{ }^\circ\text{C}$ ($1023-1073 \text{ K}$), результатами дослідження показано, що навіть при температурах понад $800 \text{ }^\circ\text{C}$ ще присутній вагомий вплив кінетичного механізму утворення монооксиду азоту (NO_{prom}), що пояснюється суттєвою участю водню в утворенні радикалів OH^\cdot і HO_2^\cdot , значним збільшенням кількості таких радикалів і процесами окиснення азоту, що ними ініціюються. Причому, як показують експерименти, у різних перерізах фронту цей вплив різний за характером.

2. Дослідження утворення у полум'ї NO і NO_2 окремо показало також, що відбувається процес переходу NO в NO_2 у фронті полум'я шляхом доокиснення. Інтенсивність доокислення NO в NO_2 має свій екстремум, який залежить від концентрації водню у рідині, що додатково вводиться в полум'я. Максимальне утворення NO_2 в цих експериментах спостерігалось при вмісті H_2 у розчині 10,4%.

3. Збільшення концентрації розчину H_2O_2 від нуля до 30% призводило до збільшення рівня температур в тому числі за рахунок догорання CO і до збільшення сумарного утворення оксидів азоту на 35-45%.

4. Ефект допалювання CO за рахунок додавання палива, що містить водень, може бути застосований для організації процесу спалювання палива зі зниженим (ближче до стехіометричного) коефіцієнтом надлишку повітря і, як наслідок, збільшення ККД та ефективності використання палива в котлах.

РОЗДІЛ 5. РОЗРОБЛЕННЯ РЕКОМЕНДАЦІЙ ЩОДО ВПРОВАДЖЕННЯ ВОДНЕВИХ ТЕХНОЛОГІЙ В СИСТЕМАХ ЦЕНТРАЛІЗОВАНОГО ТЕПЛОПОСТАЧАННЯ

Після прийняття Європейською комісією в грудні 2019 року «Зеленого курсу Європи» («European Green Deal») [7], згідно з яким до 2050 року «чистих» викидів парникових газів в Європі не повинно бути, в Україні відповідно до нього вже в кінці січня 2020 року була представлена «Концепція «зеленого» енергетичного переходу України до 2050 року» [106]. Основними напрямками декарбонізації економіки в цій Концепції визначені: енергоефективність та енергозбереження; поновлювані джерела енергії; поводження з відходами; інноваційне сільське і лісове господарство; діджиталізація економічних процесів.

Зокрема, в Концепції вже до 2050 року передбачені: повна відмова від вугільної генерації, збільшення частки відновлюваної енергетики в енергосистемі України до 70%, повна інтеграція в європейську енергосистему, з діджиталізацією енергомережі. Частка викидів діоксиду вуглецю (незбалансованих) до 2050 року повинна зменшитись до 14%, а до 2070 року - до 0%.

Практичний досвід передвоєнних років, який був розглянутий в розділі 1 цього дослідження, демонструє значний інтерес інвесторів до сфери ВДЕ в Україні. Але слід відмітити, що прогнозований розвиток таких технологій без врахування українських реалій нестиме за собою також і нові виклики, зокрема пов'язані з їхнім балансуванням в енергетичній системі України.

Відповідно до тенденцій у вказаних документах та з огляду на існуючу структуру використання джерел енергії в системах комунальної теплоенергетики України, в схемах теплопостачання міст, що розробляються зараз та будуть розроблятися в наступні десятиліття, потрібно враховувати як раціональне використання викопного палива, як основного енергоресурсу в

існуючому стані на цей час, так і потенційне заміщення його відновлюваними джерелами енергії (ВДЕ) в перспективі.

В рамках адаптації вимог українського законодавства до європейського, необхідно враховувати в схемах теплопостачання міст України заходи в напрямку досягнення відповідності системи централізованого теплопостачання (СЦТ) міста статусу «Ефективної» в розумінні Директиви 2012/27/ЄС "Про енергоефективність" [107] та Закону України «Про енергетичну ефективність» [108], тобто забезпечення використання мінімум 50% відновлюваної енергії, або 50% відпрацьованої (скидної) теплоти, або 75% теплоти від когенерації, або 50% сукупності такої енергії та теплоти. Саме тому розроблення схем теплопостачання міст з населенням від 20 тисяч жителів, як своєрідної дорожньої карти, має на меті підвищення енергоефективності, забезпечення енергетичної незалежності та зменшення негативного впливу на зміну клімату [109]. В цьому розділі наводиться опис можливого способу використання водню в рамках модернізації СЦТ на існуючих підприємствах.

5.1. Пропозиції використання водневих технологій при розробленні Схеми теплопостачання м. Києва на період до 2030 року

Інститут технічної теплофізики НАН України за участі автора був одним з розробників Схеми теплопостачання м. Києва до 2030 року на замовлення Департаменту житлово-комунальної інфраструктури КМДА, зокрема екологічних аспектів цього документу державного планування. Одним із інноваційних елементів пропозицій до цієї Схеми є створення так званого «Водневого енергетичного ХАБу» на базі СТ-1 м. Києва (станція теплопостачання біля залізничного вокзалу в безпосередній близькості до р. Либідь). Принциповою новацією такого Водневого ХАБу є не тільки скорочення викидів парникових газів в м Києві, але і можливість використання збільшених обсягів електроенергії, виробленої з відновлюваних джерел в цілому. А так би мовити «побічним» ефектом

запропонованого проєкту є очистка води в річці Либідь, що відповідає міській програмі очистки води в цьому історичному та легендарному водному джерелі.

З метою скорочення викидів забруднюючих речовин та парникових газів в центральній частині міста Києва, запропоноване поступове переведення потужного теплоджерела СТ-1 у центрі міста на водневе паливо [110]. До 2030 року на СТ-1 також заплановано реконструкцію існуючих застарілих котлів "Фостер-Уиллер" та "ЦКТИ", або заміну їх на нові котли приблизно аналогічної потужності, з можливістю працювати на метано-водневій суміші. Рішення щодо включення цього заходу до перспективної Схеми теплопостачання міста вже погоджено Комісією Мінрегіону з розгляду схем теплопостачання населених пунктів з кількістю жителів більш як 20 тисяч осіб та/або регіональних програм модернізації систем теплопостачання (наказ Мінрегіону від 15.06.2021 № 154) та схвалено Замовником: 10 лютого 2023 року Київська міська рада підтримала проєкт рішення “Про затвердження Схеми теплопостачання Києва на період до 2030 року” (№08/231-1269/ПР від 9 вересня 2022 року).

Опис теплоджерела СТ-1 із встановленим теплогенеруючим обладнанням та його експлуатаційні характеристики і пропозиції щодо його реконструкції наведені в Додатку 3.

Передбачається, що електроенергія отримуватиметься від «зеленої» енергетики і буде використовуватися для електролізу води на СТ-1, до 2030 року в обсязі до 300 МВт, після 2030 року – поступово зростатиме до повного задоволення потреб СТ-1 (в перспективі до 700 Гкал/год). Джерело водопостачання – сира вода річки Либідь, з поверненням чистої води, отриманої в результаті конденсації водяної пари, назад до річки. Кількість корисної енергії, що міститься в отриманому після електролізу водні, сягає до 80 % від витраченої в процес електролізу. Одночасно захід дозволяє долучитись до програми збереження річки Либідь, що регламентується

Проектом Закону України «Про внесення змін до Закону України «Про Загальнодержавну цільову програму розвитку водного господарства та екологічного оздоровлення басейну річки Дніпро»», та громадського проєкту порятунку річки Либідь.

Для виробництва 1 м^3 водню (нижча теплота згорання якого близько 2750 ккал/м^3 , $3,14\text{ кВт}\cdot\text{год}$ або $50,56\text{ кВт}\cdot\text{год/кг H}_2$) у сучасних електролізерах потрібно близько $4,5\text{ кВт}\cdot\text{год}$ електроенергії. Теоретично для виробництва 1 кг H_2 витрачається $8,9\text{ л}$ води та $39\text{ кВт}\cdot\text{год}$ електроенергії при н.у. Варто враховувати також додаткові витрати на доставку і очищення води. Тому об'єм водню, отриманого електролізом води, складає лише невелику частку від всього світового виробництва. Разом з тим для проєкту на СТ-1 буде потрібен електролізер потужністю до 400 МВт (або 100 МВт при використанні 25% суміші) приблизною вартістю 20 млн доларів [111].

Для отримання синтетичного метану з використанням $20\ 000\text{ м}^3/\text{год CO}_2$ необхідно приблизно $80\ 000\text{ м}^3/\text{год H}_2$, для забезпечення цього потрібна потужність електролізерів не менше 500 МВт (враховуючи процеси прокачки і очищення води). На виході з реактора метанізації отримаємо приблизно $20\ 000\text{ м}^3$ метану на годину, що дозволить отримати до 150 Гкал/год (з додатком за рахунок конденсаційного процесу в утилізаторах теплоти димових газів) теплової енергії. Навантаження СТ-1 на цей час становить 426 Гкал/год , в перспективі навантаження зросте до 619 Гкал/год до 2030 та 724 Гкал/год після 2030 року. Тобто описаний процес виробництва синтетичного метану дозволить покрити $27,4\%$ (до 2030 року) і $23,5\%$ (після 2030 року) навантаження теплогерела відповідно.

За умови роботи теплогерела лише на опалення (близько 180 діб або 4320 годин) кількість виробленої енергії таким способом за опалювальний сезон становитиме $150\text{ Гкал/год} \cdot 4320\text{ год} = 648\ 400\text{ Гкал}$. Згідно перспективних тарифів на централізоване опалення в Києві, вартість теплової енергії без урахування витрат на утримання та ремонт центральних теплових пунктів, з урахуванням витрат на утримання та ремонт індивідуальних

теплових пунктів, з урахуванням витрат на оснащення будівель вузлами комерційного обліку для населення становить 2716,56 грн за 1 Гкал (протягом дії військового стану в Україні та 6 місяців після нього тариф 1654,41 грн/Гкал) [112]. Вартість виробленої теплової енергії складе:

$$648\ 000\ \text{Гкал} \cdot 2761,56\ \text{грн/Гкал} = 1,8\ \text{млрд грн.}$$

Незважаючи на значні капітальні вкладення у такий проєкт, запуск саме пілотного проєкту з опрацювання такої технології є цілком обґрунтованим.

Акт впровадження запропонованого способу використання водню на потужному теплоджерелі міста СТ-1 у рамках розробленої Схеми теплопостачання м. Києва на період до 2030 року наведений у Додатку 3.

5.2. Використання водневих технологій при розробленні Схеми теплопостачання м. Одеси на період до 2030 року

Інститутом технічної теплофізики НАН України за участі автора на замовлення КП «Теплопостачання міста Одеси» було розроблено нову Схему теплопостачання м. Одеси. Метою роботи була оптимізація системи централізованого теплопостачання міста Одеси на розрахунковий період до 2030 року з врахуванням існуючого стану джерел генерації теплової енергії, теплових мереж, перспектив розвитку міста та потреби в забезпеченні тепловою енергією існуючого і перспективного будівництва, потреби та можливостей модернізації джерел генерації теплової енергії та теплових мереж, розвитку технологій виробництва теплової енергії для потреб теплопостачання міста, можливостей використання відновлюваних видів палива та альтернативних джерел енергії.

З метою скорочення викидів забруднюючих речовин та парникових газів від СЦТ міста, передбачається створення «водневого ХАБу» на базі РК «Південна-1», з поступовим переведенням котлів РК «Південна-1» на паливо, що містить водень.

Опис теплогенератора РК «Південна-1» із встановленим теплогенеруючим обладнанням та його експлуатаційні характеристики і пропозиції щодо його реконструкції наведені в Додатку Ж.

Електроенергія в цьому проекті отримуватиметься через мережу від загальної енергосистеми від «зеленої» енергетики (з використанням відновлюваних джерел енергії), і використовуватиметься для електролізу води на РК «Південна-1». Використовуватиметься водопровідна вода, з можливістю її відновлення в процесі спалювання воденьвмісного палива, зі створенням практично замкнутого по воді циклу. Ефективність отримання водню сягатиме до 80 % (ККД кращих електролізерів має ККД до 88%).

Отриманий водень подаватиметься у метанізатор, в якому при реакції взаємодії водню з діоксидом вуглецю з димових газів котлів утворюватиметься синтетичний метан; утворена метаново-воднева суміш (з вмістом до 10 % водню) спалюватиметься у збагаченій киснем (від електролізу) атмосфері, зі зниженим рівнем викидів оксидів азоту в навколишнє повітря. Утворений при спалювання такої суміші діоксид вуглецю вже не враховується як викид парникового газу, і повертається в цикл.

Зважаючи на територіальну близькість до важливих громадських і стратегічних об'єктів міста, такий спосіб використання водню дозволить підвищити енергетичну безпеку процесу генерації теплоенергії. До того ж, для запобігання потреби транспортування водню, з огляду на технічну складність та вибухонебезпечність цього процесу, електролізер та метанізатор передбачається виконати в одному спільному корпусі.

Будівництво передбачається у декілька черг. Потужність першої черги установки має забезпечувати потребу в паливі (відповідно близько 6 тис. м³/год) одного котла ПТВМ-50 (до 50 Гкал/год), з можливим наступним тиражуванням до забезпечення потреб котлів ПТВМ-50 РК «Південна-1» в паливі.

Отриманий при електролізі кисень використовуватиметься як окислювач при горінні метано-водневої суміші, що дозволить значно зменшити присутність азоту повітря в зоні горіння, відповідно в значній мірі запобігти утворенню оксидів азоту в процесі горіння, та зменшити концентрації оксидів азоту у димових газах.

З метою зменшення витрат води, конденсат використовуватиметься як сировина для подальшого електролізу, з повторенням цього циклу, що дозволить мінімізувати витрати свіжої води.

Сесія Одеської міської ради прийняла рішення № 982-VIII від 28.09.2022 р. затвердити Схему теплопостачання м. Одеси, розроблену Державним підприємством «Київоблбудінвест» в особі відокремленого підрозділу «Київський обласний експертний центр енергоефективності» за участі ІТТФ НАН України та погоджену наказом Міністерства розвитку громад та територій України від 03 червня 2022 року № 98 [113].

5.4. Висновки до розділу 5

1. Запропоновано спосіб (подано заявку на патентування винаходу), який сприятиме розвитку ВДЕ шляхом створення можливостей накопичування та зберігання енергії з використанням водневих технологій вже в найближчій перспективі. Використання водню, отриманого в процесі електролізу, з утворенням синтетичного метану для заміщення природного газу, дозволить значно збільшити можливості використання електричної енергії, отриманої від джерел сонячної та вітрової генерації.

2. Запропонована практична реалізація використання водню, який може бути отриманий з надлишків електроенергії, що виробляються з ВДЕ, на двох діючих об'єктах комунального енергетики як частини паливно-енергетичного комплексу України. Це потужні теплоджерела, що включені до систем централізованого теплопостачання міст Києва та Одеси (ТД «СТ-1» та РК «Південна-1» відповідно). Ці заходи дозволять знизити використання природного газу, спростити балансування енергосистеми

України, та забезпечать можливість використання водню на наявному встановленому котельному обладнанні.

3. Запропонований спосіб є актуальним з екологічної точки зору, бо не продукує викидів CO₂, але з економічної потребує доопрацювання, задля зниження собівартості.

4. Пропозиції по створенню «Водневих ХАБів», викладені вище, включені до Схем теплопостачання, схвалені Мінрегіоном та затверджені на засіданнях сесій міських рад міст Києва та Одеси; отримані відповідні Акти впровадження.

ЗАГАЛЬНІ ВИСНОВКИ ДО РОБОТИ

В роботі виконано теоретичне і експериментальне дослідження впливу добавок водню в водному розчині при горінні вуглеводневого палива на процес утворення та зміни концентрації оксидів азоту, що генеруються при спалюванні метано-водневих сумішей, в залежності від вмісту водню, задля зниження викидів оксидів азоту до рівня екологічних нормативів. Запропонований в роботі спосіб використання водню з через утворення штучного метану дає змогу забезпечити допустимі концентрації оксидів азоту, визначені Директивою 2010/75/ЄС, на існуючому теплогенеруючому обладнанні.

Основні наукові результати дослідження полягають у наступному:

1. Вперше показано, що при температурах понад 800 °С ще присутній вагомий вплив кінетичного механізму утворення монооксиду азоту (NO_{prot}), що можна пояснити суттєвою участю водню в утворенні радикалів OH^\cdot і HO_2^\cdot , значним збільшення кількості таких радикалів і процесами окиснення, що ними можуть ініціюватися. Експериментально показано, що у різних перерізах фронту цей вплив різний за характером.

2. Вперше проведене дослідження утворення у полум'ї окремо NO і NO_2 показало, що відбувається процес переходу NO в NO_2 у фронті полум'я шляхом доокиснення. Інтенсивність доокислення NO в NO_2 має свій екстремум, який залежить від концентрації водню у додатковому об'ємі рідини, що вводиться. Максимальне утворення NO_2 в цих експериментах спостерігалось при вмісті H_2 у розчині 10,4%.

3. Вперше показано, що збільшення концентрації розчину H_2O_2 від нуля до 30% призводило до збільшення рівня температур в тому числі за рахунок догорання CO , а також до збільшення сумарного утворення оксидів азоту на 35-45%.

4. Вперше запропоновано коефіцієнт, який характеризує зміну теплотворної здатності одиниці об'єму метано-водневого палива в порівнянні з метаном, що залежить від об'ємної частки вмісту водню у паливній суміші.

5. Вперше процес горіння розглядався в цій роботі як трикомпонентна реакція, що окрім палива та окисника, включає водяну пару, яка наявна у вигляді вологи в атмосферному повітрі. Вірогідно, що водень та його похідні, такі як пероксидний та гідроксильний радикали, – є стартовими і ключовими компонентами, які запускають ланцюгові реакції горіння.

Основні практичні результати дослідження полягають у наступному:

6. Вперше запропоновано спосіб використання водню у вигляді розчинів для отримання синтетичного метану у замкнутій схемі виробництва теплової енергії на існуючих теплоджерелах, що дає змогу експлуатувати котельне обладнання без зміни його конструктивних елементів; спосіб затверджений до впровадження рішеннями сесій відповідних міських рад (отримано Акти впровадження науково-технічних рішень) на двох теплоджерелах м. Києва та м. Одеси.

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

ПЕРЕЛІК ПОСИЛАНЬ

1. Wang, L., Wang, L., Li, Y. (2023). A century-long analysis of global warming and earth temperature using a random walk with drift approach. *Decision Analytics Journal*, V. 7, 100237 <https://doi.org/10.1016/j.dajour.2023.100237>.
2. Karpilov I., Pashchenko D. (2021). Effect of methane reforming before combustion on emission and calorimetric characteristics of its combustion process. *International Journal of Hydrogen Energy* V.46, Issue 76, P. 38106-38118 <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2021.09.043>
3. Paris Climate Agreement. (2015). United Nations Framework Convention on Climate Change, UNFCCC (Паризька кліматична угода. Рамкова конвенція ООН про зміну клімату). URL: https://unfccc.int/files/essential_background/convention/application/pdf/english_paris_agreement.pdf
4. Kyoto protocol to the United Nations Framework Convention on Climate Change. (1998). (Кіотський протокол до Рамкової конвенції Організації об'єднаних націй про зміну клімату) URL: <https://unfccc.int/resource/docs/convkp/kpeng.pdf>
5. I. Dubovkina, O. Sigal, V. Rikhte, N. Nizhnyk. (2021). Toxic substances formation in co-incineration process for food production. *Ukrainian Food Journal*. P. 828-839 Issue 4 <https://nuft.edu.ua/doi/doc/ufj/2021/4/15.pdf>
6. ETIP SNET R&I Roadmap 2020-2030. (Європейська технологічна та інноваційна платформа для інтелектуальних мереж для енергетичного переходу). Дорожня карта досліджень та інновацій на 2020-2030 pp.) (2020) URL: https://smart-networks-energy-transition.ec.europa.eu/sites/default/files/publications/Roadmap-2020-2030_June-UPDT.pdf
7. The European Green Deal. Europe's new growth strategy A climate-neutral EU by 2050. (2019) (Європейський Зелений курс. Нова стратегія

зростання Європи. Кліматично нейтральний ЄС до 2050 року) URL: https://www.unido.org/sites/default/files/files/2020-11/EU_Green_Deal_2020.pdf

8. Directive (EU) 2018/2001 of the European parliament and of the Council of 11 December 2018 on the promotion of the use of energy from renewable sources. (2018) *Директива (єс) 2018/2001 європейського парламенту та ради від 11 грудня 2018 року про сприяння використанню енергії з відновлюваних джерел* URL: <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/EN/TXT/PDF/?uri=CELEX:32018L2001>

9. Hydrogen Strategy. A for a climate neutral Europe (2020) URL: https://ec.europa.eu/commission/presscorner/api/files/attachment/865942/EU_Hydrogen_Strategy.pdf.pdf

10. О.А. Мельник. (2022). Комплексне використання відновлюваних джерел енергії: Курс лекцій: навч. посіб. для студ. спеціальності 141 «Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка». КПІ ім. Ігоря Сікорського ; уклад.: М.П. Кузнецов,. — К. : КПІ ім. Ігоря Сікорського, 304 с. https://ela.kpi.ua/bitstream/123456789/48635/1/Kompleksne_2022.pdf

11. С.О. Кудря, О.О. Рєпкін, Л.В. Яценко, М.Д. Ткаленко, Л.Я. Шинкаренко (2019). Концепція Дорожньої карти розвитку водневої енергетики. ВДЕ України на період до 2035 року. *Відновлювана енергетика..* –№4 (59). – С. 22-28 [https://doi.org/10.36296/1819-8058.2019.4\(59\).22-28](https://doi.org/10.36296/1819-8058.2019.4(59).22-28)

12. Транспортування водню та потенціал оператора ГТС України (2020) URL: <https://tsoua.com/wp-content/uploads/2021/10/Hydrogen-Consultation-paper-v2.pdf>

13. The Future of Hydrogen (2019) URL: <https://www.iea.org/reports/the-future-of-hydrogen>

14. The National Hydrogen Strategy (2020). Federal Ministry for Economic Affairs and Energy of Germany. 32 p. URL: https://www.bmwk.de/Redaktion/EN/Publikationen/Energie/the-national-hydrogen-strategy.pdf?__blob=publicationFile&v=1

15. Polska strategia wodorowa do roku 2030 z perspektywą do 2040 r, (2020). 50 p URL: https://klasterwodorowy.pl/images/zdjecia/1_PSW_publicacja.pdf
16. UK Hydrogen Strategy: Crown copyright (2021). 121 p URL: https://assets.publishing.service.gov.uk/government/uploads/system/uploads/attachment_data/file/1175494/UK-Hydrogen-Strategy_web.pdf
17. Hydrogen strategy for Canada (2021). 141 p. URL: https://natural-resources.canada.ca/sites/nrcan/files/environment/hydrogen/NRCan_Hydrogen-Strategy-Canada-na-en-v3.pdf
18. The Norwegian Government's hydrogen strategy (2021). Norwegian Ministry of Petroleum and Energy and Norwegian Ministry of Climate and Environment. 55 p. URL: <https://www.regjeringen.no/contentassets/40026db2148e41eda8e3792d259efb6b/y-0127e.pdf>
19. Australia's national hydrogen strategy: Commonwealth of Australia. (2019). 136 p URL: <https://www.dccew.gov.au/sites/default/files/documents/australias-national-hydrogen-strategy.pdf>
20. BP preps big green hydrogen project in UK with 60-MW initial phase. (2019). URL: <https://renewablesnow.com/news/bp-prepsbig-green-hydrogen-project-in-uk-with-60-mwinitial-phase-763167/>
21. США почали захоплення європейського ринку: виготовлятимуть в Іспанії зелений водень. (2020). URL: <https://economics.segodnya.ua/economics/enews/ssha-nachali-zahvat-evropeyskogo-rynkabudut-proizvodit-v-ispanii-zelenyy-vodorod-1527728.html>
22. Hydrogen. Power Engineering International. (2023). URL: <https://www.powerengineeringint.com/hydrogen/>
23. Вперше в історії у Нідерландах почали опалювати житловий будинок воднем. (2020). URL: https://glavcom.ua/new_energy/news/vpershe-v-istoriji-u-niderlandah-pochaliopalyuvati-zhitloviy-budinok-vodnem-674764.html

24. ENTSO-E Annual Report. (2023). URL: https://consultations.entsoe.eu/entso-e-general/have-your-say-on-the-entso-es-annual-report-2022/supporting_documents/entsoe_AR2022_230629.pdf
25. Річне споживання газу, вугілля та інших паливних продуктів в Україні. Статистичні дані Міністерства фінансів України. (2022). URL: <https://index.minfin.com.ua/ua/economy/energy/>
26. Л. Міллівірта. (2022). Вплив викидів українських вугільних електростанцій на здоров'я населення. URL: https://ecoaction.org.ua/wp-content/uploads/2021/09/Coal-Health-Impacts-in-Ukraine_UA.pdf
27. Alparslan 2021. (2021). (Turkey). Ukraine and Western Balkan countries compete for top spot in coal power air pollution in Europe. Ember. URL: <https://emberclimate.org/commentary/2021/05/25/coal-power-air-pollution/>
28. Coal power air pollution in Europe. (2022). URL: <https://emberclimate.org/insights/research/coal-power-air-pollution/?fbclid=IwAR1D7cC199EpEKURR7QM7CV-XnqJCidmiGjtw9quBx-uQkbkAeyr5hCevxM>
29. Гелетуха, Г.Г. (2022). Як Україні відмовити від російського газу. *XXXII Міжнародна конференція «Проблеми екології та експлуатації об'єктів енергетики»*. Збірник праць. Київ, с.18 – 20
30. Споживання природного газу в Україні у 2021 році. (2022). Звіт ГТС. Інтернет-портал Українська енергетика URL: <https://ua-energy.org/uk/posts/spozhyvannia-hazu-v-ukraini-u-2021-rotsi-skorotylosia-maizhe-na-7>
30. О. Коваленко. (2015). Стан та перспективи розвитку паливно-енергетичного комплексу в Україні. *Галицький економічний вісник (Економіка та управління національним господарством)*, — Т.: ТНТУ, Том 48. № 1. 18 - 25.
31. Evans, J., Hunt. C. (2015). International Handbook on the Economics of Energy. *Cheltenham: Edward Elgar Publishing Limited*. 831 p

32. Виробництво електроенергії в Україні у 2021 році. URL: <https://vse.energy/news/pek-news/electro/1935-power-generation-202112>.
33. Звіт О. Бугуславець. (Міністерство енергетики України). (2023). Загальне споживання е/е в країні за підсумками 2022 року.
34. Енергетична стратегія України на період до 2035 року. URL: http://mpe.kmu.gov.ua/minugol/control/uk/publish/article?art_id=245239564&cat_id=245239555
35. Support the government of Ukraine on updating its nationally determined contribution (NDC) C40502/8492/47661.(2020) *Report 3. Modeling report*, 138 p. URL: <https://faolex.fao.org/docs/pdf/ukr203478.pdf>
36. Енергетична стратегія України на період до 2050 року (2023). (документ в першому читанні станом на 24 січня 2023 року)
37. О.І. Сігал, Н.А. Ніжник. (2020). Перспективи використання водню у промислових процесах спалювання. *Теплофізика і теплоенергетика*, №3. С.68 – 75. DOI: <https://doi.org/10.31472/ttpe.3.2020.8>
38. H. Averbalk, P. Ingvarsson, U. Persson, M. Gong, S. Werner (2017) Large heat pumps in Swedish district heating systems. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, V. 79, P. 1275–1284. DOI: [10.1016/j.rser.2017.05.135](https://doi.org/10.1016/j.rser.2017.05.135)
39. Н.М. Фіалко, М.П. Тимченко. (2022) Основні функціональні ознаки систем централізованого опалення четвертого та п'ятого поколінь «Проблеми екології та експлуатації об'єктів енергетики». *Збірник праць*. С. 53 – 57
40. The fifth District Heating generation, a solution for the future urban. (2020). URL: <https://www.araner.com/blog/fifth-district-heating-generation>
41. І. М. Карп, Є. Є. Нікітін, К. Є. П'яних, О. І. Сігал, С. В. Дубовський та ін. (2021). Стан та шляхи розвитку СЦТ в Україні. *Кн. 1. Наук. думка*, с. 264.

42. Г. Ковтун, Є. Полункін. (2007). Перспективи водневої енергетики. *Вісн. НАН України, № 4*, С. 12-18 URL: <http://dspace.nbuu.gov.ua/bitstream/handle/123456789/433/a2-4.pdf?sequence=1>
43. За заг. ред. С.О. Кудрі. (2020) Відновлювані джерела енергії. *Монографія*. – Київ: Інститут відновлюваної енергетики НАНУ. 392 с
44. Водень у трубі: як замість природного газу транспортувати синтетичний. (2021). URL: <https://www.epravda.com.ua/projects/greendeal/2020/08/31/664468/>
45. T. Mytrova, Y. Melnikov, D. Chugunov. (2019). The hydrogen economy is the way to low-carbon development. *Center for Energy of School of Management Skolkovo*. 60 p
46. М. Юрженко, М. Ковальчук, В. Кондратенко, В. Демченко, А. Пилипенко, К. Гусакова, Г. Жук, В. Вербовський, О. Гопаченко, І. Гоцик. (2023). Вплив газових сумішей водню з метаном на експлуатаційні та теплофізичні характеристики поліетиленових труб діючих газорозподільних мереж України. *Енерготехнології та ресурсозбереження*, 75(2),с. 96-108. <https://doi.org/10.33070/etars.2.2023.08>
47. Воднева стратегія України. Проєкт. (2021). URL: <https://www.ive.org.ua/wp-content/uploads/Vodneva-Strategia-Cover.pdf>
48. О.І. Сігал. (2022). Нова енергетика та як до неї дожити. *XXXII Міжнародна конференція «Проблеми екології та експлуатації об'єктів енергетики»*. *Збірник праць*. с. 9 – 18.
49. Потенціал виробництва зеленого водню в Україні становить 505 млн кубометрів: що потрібно для розвитку цього напрямку? (2023). URL: <https://uspp.ua/news/novyny-hromadskykh-partneriv/2018/potentsial-vyrobnytstva-zelenoho-vodniu-v-ukraini-stanovyt-505-mln-ton-kubometriv-shcho-potribno-dlia-rozvytku-tsoho-napriamu>
50. Ю.М. Магера. (2019). Підвищення термічної інсінерації твердих побутових відходів. *Канд. дис.: 05.14.06*;с. 161. URL: http://ittf.kiev.ua/wp-content/uploads/2019/12/disser_final_podpis_akt_zashchita.pdf.

51. Communication from the commission to the European parliament, the council, the European economic and social committee and the committee of the regions. A hydrogen strategy for a climate-neutral Europe. (2020). URL: <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/EN/TXT/?uri=CELEX:52020DC0301>

52. О.Г. Мусич, Т.М. Гамалій, О.Г. Лисенченко, О.П. Фесай. (2006). До питання про заліснення сміттєзвалищ. URL: <http://dspace.nbuiv.gov.ua/bitstream/handle/123456789/39695/16-Musich.pdf?sequence=1>

53. Г.О. Сіренко, Т.Р. Татарчук, І.Ю. Старко. (2013). Хронологія відкриттів, пов'язаних із Гідрогеном. Частина 1. Відкриття XVI - XVIII століть. *Вісник прикарпатського національного університету ім. В. Стефаника Серія Хімія. Випуск XVII*, с.106-117

54. І. Карп, Л. Уніговський. (2020). Водень: сучасний стан проблеми та напрями майбутнього використання. *Нафтогазова галузь України №5* с.15-23

55. S. Kudria, O. Riepin, L. Yatsenko, L. Shynkarenko, M. Tkalenko. (2019). The concept of the roadmap for the development of hydrogen energy in Ukraine for the period until 2035. *Scientific and Applied Journal Vidnovluvana energetika*, 4 (59), 22-28. DOI: [https://doi.org/10.36296/1819-8058.2019.4\(59\).22-28](https://doi.org/10.36296/1819-8058.2019.4(59).22-28)

56. Kudria, S., Yatsenko, L., Shynkarenko, L., Tkalenko, M. (2021). Desalination of sea water for production of green hydrogen. *Vidnovluvana Energetika*, 4(67), 6-17. [https://doi.org/10.36296/1819-8058.2021.4\(67\).6-17](https://doi.org/10.36296/1819-8058.2021.4(67).6-17)

57. Damien G., Gianpaolo V. (2021), Hydrogen as a Clean and Sustainable Energy Vector for Global Transition from Fossil-Based to Zero-Carbon, *Clean Technol.*, 3, p. 881–909

58. Furat Dawood, Martin Anda, G.M. (2020). Shafiullah Hydrogen production for energy: An overview. *International Journal of Hydrogen Energy* V. 45, Issue 7, P. 3847-3869 <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2019.12.059> ,

59. Adnan Görgülü, Hüseyin Yağlı Yıldız Koç. (2020). Comprehensive analysis of the effect of water injection on performance and emission parameters of the hydrogen fuelled recuperative and non-recuperative gas turbine system. *International Journal of Hydrogen Energy* V. 45, Issue 58, P. 34254-34267 <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2020.09.038>
60. Zhan Xu Yan, Yan Dongke Sun. (2020). Supply system of cryo-compressed hydrogen for fuel cell stacks on heavy duty trucks. *International Journal of Hydrogen Energy* V. 45, Issue 23, , P. 12921-12931 <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2020.01.034>
61. А.І. Міщенко. (1984). Применение водорода для автомобильных двигателей. К.: Наук. думка, 1984. – 142 с
62. В.Ф. Каменев, Н.А. Хрипач. (2003). Конструкции современных ДВС. Поиски и решения. "Автомобильная промышленность", Изд-во «Машиностроение» № 11, 202 с.
63. Німеччина й Україна узгодили перший проєкт з виробництва водневого палива. (2021). URL: <https://mind.ua/news/20223567-nimechchina-j-ukrayina-uzgodili-pershij-proekt-z-virobnictva-vodneвого-paliva>
64. Українське обладнання для доставки водню: для ЄС чи для своїх? (2020). *Економічна правда*. URL: <https://www.epravda.com.ua/projects/greendeal/2021/11/3/679329/>
65. Yue M., Lambert H., Pahon E., Roche R., Jemei, S., Hissel D. (2021), Hydrogen energy systems: A critical review of technologies, applications, trends and challenges, *Renew. Sustain. Energy Rev.*, 146
66. R. Schutte. (2018). Program Manager Hydrogen Gasunie in a transitioning energy market. Brussel., 7 p
67. Національний план скорочення викидів від великих спалювальних установок. (2017). Розпорядження Кабінету Міністрів України від 08.11.2017 No 796-р. *Урядовий кур'єр* від 30.11.2017 –№ 226.
68. The Energy Community Treaty. (2006). *Official Journal of the European Union*, 198, P.18 37. URL:

https://mzheks.net/repository/docs/treaty_establishing_energy_community_in_the_see.pdf

69. Directive 2010/75/EU of the European Parliament and of the Council of 24 November 2010 on industrial emissions (integrated pollution prevention and control) (Recast) (Text with EEA relevance), *Official Journal of the European Communities*, 17/12/2010, L334, P. 17-119

70. І. А. Вольчин, Л. С. Гапонич. (2021). Стан та перспективи виконання національного плану скорочення викидів забруднюючих речовин від великих спалювальних установок. *Матеріали XXII Міжнародної науково-практичної конференції «Екологія. Людина. Суспільство»* <https://doi.org/10.20535/EHS.2021.232880>

71. Б.С. Сорока, К.Є. П'яних, В.О. Згурський, В.В. Горупа, В.С. Кудрявцев. (2020). Енергетичні та екологічні характеристики побутових газових приладів при використанні метано-водневої суміші як паливного газу. *Нафтогазова галузь України №6*. с.3-13

72. L.M. Das. (1996). Hydrogen-oxygen reaction mechanism and its implication to hydrogen engine combustion. *International Journal of Hydrogen Energy Volume 21, Issue 8, Pages 703-715* [https://doi.org/10.1016/0360-3199\(95\)00138-7](https://doi.org/10.1016/0360-3199(95)00138-7)

73. Yong-hui Duan, Bai-gang Sun, Qian Li. (2023). Combustion characteristics of a turbocharged direct-injection hydrogen engine. *Energy Conversion and Management*. V. 291, <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2023.117267>

74. R.Z. Aminov, A.N. Egorov, A.I. Schastlivtsev. (2023). Investigation on combustion efficiency of the hydrogen–oxygen mixture at various pressures and excess oxidizer based on experimental and theoretical studies. *International Journal of Hydrogen Energy* <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2023.06.057>

75. И.Я. Сигал. (1988). Защита воздушного бассейна при сжигании топлива. *Л.:Недра*. 312 с.

76. Я.Б. Зельдович, П.Я. Садовников, Д.А. Франк-Каменецкий. (1947). Окисление азота при горении. *Л.-Москва*, АН СССР, 145 с
77. C.P. Fenimore. (1979). Formation of nitric oxide in premixed hydrocarbon flames. In.: 13 th Symp. on combust., p. 373-379
78. Varnats Y, Maas U., Dybb R. Burning. (2003). Physical and chemical aspects, modeling, experiments, formation of pollutants. *Fizmatlit*, 301 p
79. А.К. Внуков. (1981). Теплохимические процессы в газовом тракте паровых котлов. - *М.: Энергоиздат*. - 296 с
80. К.А. Гордин (1981). Особенности механизма образования и разложения окислов азота в высокотемпературных процессах сжигания органических топлив: *Дисс.. канд. физ.-мат. наук*. 143 с
81. С.М. Пономаренко. (2016). Основы фізики горіння. – *К.: НТУУ «КПІ»*, 2016. – 85 с
82. Г.І. Ксандопуло, Г.І. Дубинін. (1987). Хімія газофазного горіння. *К. «Хімія»*-240 с.
83. В.М. Клименко, А.І. Мазур, П.П. Сабашук. (2008). Когенераційні системи з тепловими двигунами.- В ч1. Загальні питання когенераційних технологій.- *Київ ІПЦ АЛКОН НАН України*, С. 371-390.
84. A. Sigal, D. Paderno. (2021). Effect of moisture on nitrogen dioxide formation in laminar flame of natural gas. *Journal of Environmental Engineering and Landscape Management*, 2021. DOI: <https://doi.org/10.3846/jeelm.2021.15492>
85. А.И. Сигал, В.Н. Крыжановский. (1977). Исследование образования оксидов азота во фронте пламени.- *Сб.: Повышение качества сжигания топлива и охрана воздушного бассейна от загрязнения вредными выбросами ТЭС. Л.:НТО ЭиЭП*. с.73-74.
86. И.Я. Сигал, А.В. Смихула, А.И. Сигал, О.В. Марасин (2020) Исследование воздействия струй газа при стабилизации фронта пламени на вертикальной поверхности. *Энергетические технологии и*

ресурсосбережение. 2020. № 4. С. 29–38. URL:
<http://nfv.ukrintei.ua/view/5b1925e37847426a2d0ab78a>

87. Б.С. Сорока, К.Є. П'яних, В.О. Згурський, В.В. Горупа, В.С. Кудрявцев.(2020). Енергетичні та екологічні характеристики побутових газових приладів при використанні метано-водневої суміші як паливного газу *Нафтогазова галузь України №6*. с.3-13

88. Ю. Варнатц, У. Маас, Р. Диббл. (2003). Горение. Физические и химические аспекты, моделирование, эксперименты, образование загрязняющих веществ. М– ФИЗМАТЛИТ. 352 с.

89. Lavoie G.A., Heywood Y.B., Keck Y.C. (1970). Experimental and theoretical study of nitric oxide formation in internal combustion engines, - *Combustion Sci. and Technol.*, №.1, p.313-326.

90. Шоу Б. (1973). Уменьшение выбросов окислов азота из газотурбинной камеры в результате модификации топлива. *Труды ASME. Энергетические машины и установки. №4*. С.95-101.

91. А. Сміхула, І. Сігал, О. Марасін, О. Сігал. (2023). Експериментальне дослідження змішування струменів природного газу та повітря під час горіння на вертикальній вогнетривкій поверхні. *Енерготехнології та ресурсозбереження*, 74(1), с. 3-13.
<https://doi.org/10.33070/etars.1.2023.01>

92. А.Ф. Гаврилов, А.Д. Горбаненко, Е.Л. Туркестанова. (1986). Влияние влаги, вводимой в горячий воздух, на содержание окислов азота в продуктах сгорания газа и мазута. *Теплоэнергетика. №9*. С.13 -15

93. П.В. Росляков. (1986). Расчет влияния режимных факторов на образование топливных оксидов азота. *Теплоэнергетика. №9*. С.33 -36.

94. Н.В. Лавров, Н.А. Федоров. (1973). Некоторые особенности высокотемпературного горения газа. *Газовая промышленность №8*. с.35-38.

95. В.И. Головичев, В.И. Димитров, Р.И. Солоухин. (2014). Численный анализ кинетических моделей воспламенения водорода. *Физика*

горения взрыва. №1. с. 95-101. URL: <http://www.journal-itm.dp.ua/docs/P-05-01-2014.pdf>

96. Л.М. Цирульников. (1981). Исследование процессов образования токсичных и агрессивных продуктов горения и разработка путей уменьшения их концентраций в выбросах газомазутных котлов. *Дисс. докт. техн. наук. Ташкент. 1981. 337 с.*

97. Y. Lyu, C. Xing, L. Liu. (2022). Study of turbulent flame characteristics of water vapor diluted hydrogen-air micro-mixing combustion. *Renewable Energy V. 189*, P. 1194-1205 <https://doi.org/10.1016/j.renene.2022.03.093>

98. Cheng Lu, Linyao Zhang Xiye Chen (2023) The effects of steam dilution on flame structure and stability for a H₂/air micromix burner. *Journal of the Energy Institute V. 107*, 101188 <https://doi.org/10.1016/j.joei.2023.101188>

99. Akihiro Ueda, Keiya Nisida, Yukihiko Matsumura. (2020). Effects of hydrogen and carbon dioxide on the laminar burning velocities of methane–air mixtures. *Journal of the Energy Institute V. 99*, P. 178-185 <https://doi.org/10.1016/j.joei.2021.09.007>

100. Dissociation Of Water Molecules (2020) URL: <https://www.ozmo.io/dissociation-of-water-molecules-is-essential-for-regulating-ph-levels/>

101. В.Н. Крижановский, А.И. Сигал. (1977). Динамика образования окиси азота в «низкотемпературной» области нормального фронта.- *В сб.: Распределение и сжигание газа, вып. 3. Саратов: Изд-во Саратовского ПИ*, с. 47-54

102. D. Papp, C. Lazzara, C. Biordid. (1976). US Dept Interior. *Burecen Mines R 18019. 245 p.*

103. А.И. Сигал, А.П. Финягин, А.А. (1985). Володарский Методические указания по расчету выбросов загрязняющих веществ при сжигании топлива в котлах производительностью до 30т/ч. - *М. Гидрометеоиздат. 286 с.*

104. Ю.С. Ходаков (2001). Оксиды азота и теплоэнергетика: проблемы и решения. *М.: «Эст-М». 406 с.*

105. Т. М. Демків, О. І. Конопельник, Я. І. Шопа. (2008). Основи теорії похибок фізичних величин. *Методичні матеріали*. Львів, Видавничий центр ЛНУ ім. І. Франка. 40 с

106. Концепція «зеленого» енергетичного переходу України до 2050 року. [URL:https://mepr.gov.ua/news/34424.html](https://mepr.gov.ua/news/34424.html)

107. Директива 2012/27EU Європейського парламенту та Ради від 25 жовтня 2012 р. про енергоефективність. [URL:https://sae.gov.ua/sites/default/files/UKR_Directive_27_2012_2.doc](https://sae.gov.ua/sites/default/files/UKR_Directive_27_2012_2.doc) 3

108. Закон України «Про енергетичну ефективність» від 27.07.23 [URL:https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/1818-20#Text](https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/1818-20#Text)

109. НАКАЗ МІНІСТЕРСТВА РОЗВИТКУ ГРОМАД ТА ТЕРИТОРІЙ УКРАЇНИ 02.10.2020 № 235 Про затвердження Методики розроблення схем теплопостачання населених пунктів України <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/z1144-20#n14>

110. Документи СЕО проєкту державного планування «Схема теплопостачання м. Києва на період до 2030 року» (2022) [URL:https://dzki.kyivcity.gov.ua/content/zvit-seo-proektu-shemy-teplopostachannya-m-kyieva-do-2030-roku.html](https://dzki.kyivcity.gov.ua/content/zvit-seo-proektu-shemy-teplopostachannya-m-kyieva-do-2030-roku.html)

111. ВКФ «Укрніхром» (компанія постачальник обладнання для виробництва «зеленого» водню) (2023). [URL:https://h2.wutmarc.ua/nashi-produkti-vodorod/](https://h2.wutmarc.ua/nashi-produkti-vodorod/)

112. Тарифи на опалення в Києві у 2023 році [URL:https://index.minfin.com.ua/ua/tariff/kiev/warm/](https://index.minfin.com.ua/ua/tariff/kiev/warm/)

113. Рішення Одеської міської ради № 982-VIII від 28.09.2022 р. Про затвердження Схеми теплопостачання м. Одеси [URL:https://omr.gov.ua/ua/acts/council/192641/](https://omr.gov.ua/ua/acts/council/192641/)

ДОДАТКИ

Додаток А

МПК: H02J 15/00, H02J 3/28, F03D 9/11, F24S 20/00

СПОСІБ УТИЛІЗАЦІЇ НАДЛИШКОВОЇ ЕЛЕКТРИЧНОЇ ЕНЕРГІЇ

Винахід належить до технологій отримання водню, який виробляється з надлишкової електроенергії на відновлюваних джерелах та може бути застосований на об'єктах паливно-енергетичного комплексу України.

Відомий спосіб отримання електроенергії через модульну сонячну електростанцію із сировинних матеріалів, що пристосовані до газифікації (патент України на корисну модель **UA № 27588**, МПК H01M8/06, **C01B3/00** опубл. **15.09.2000**, бюл. № 4), в т.ч. біомаси. Паливний газ одержують з сировинного паливного газу, який в свою чергу одержують в модулі реактора окислення аллотермічно за допомогою водяної пари. Паливний газ, який при цьому утворюється містить до 50% водню.

Недоліками даного способу є негативний екологічний аспект, а саме локальна генерація парникових газів, що утворюються при виробництві водню з біомаси, обмежене застосування та неможливість роботи на існуючих котлах комунальної теплоенергетики, через необхідність заміни конструктивних елементів спалювальних пристроїв, що в свою чергу впливає на збільшення матеріальних витрат.

Найбільш близьким за технічною суттю та результатом, який досягається, вибраним за прототип, є спосіб балансування енергетичної системи з використанням водню (патент України на корисну модель **UA №143548**, МПК H02J 15/00, H02J 3/28, F03D 9/00, F03D 9/19, H02S 10/12, H02K 7/18, F24S 20/00 F24S 90/00 F03B 13/12, опубл. **25.09.2019**, бюл. № **18**), що передбачає генерування газоподібного водню з використанням енергії від установки, що використовує енергію відновлюваних джерел енергії, який після отримання закачують у сховища.

Недоліками даного способу є неможливість використання такого водню шляхом спалювання водневих сумішей або газоподібного чистого водню у сучасних діючих котлах, через конструктивні обмеження агрегату для спалювання, не вирішені проблеми стабілізації факелу, а саме відрив полум'я газо-водневої суміші від форсунки, неможливість транспортування чистого водню у наявній газотранспортній системі через властивість охрупчування металу і швидкої його руйнації, в першу чергу з'єднувальних ділянок.

В основу винаходу поставлена задача вдосконалення способу утилізації надлишкової електричної енергії шляхом одержання синтетичного метану в результаті взаємодії водню з діоксидом вуглецю, що дозволяє створити замкнений процес використання водню без заміни наявної котельної бази або окремих конструктивних елементів спалювальних установок та покращити екологічну ситуацію регіону.

Поставлена задача вирішується тим, що у способі утилізації надлишкової електричної енергії, **який передбачає отримання надлишкової енергії від установок відновлюваних джерел енергії, одержання водню методом електролізу води в електролізерах, що мають швидку динаміку з динамічним відгуком в діапазоні секунд, з використанням надлишкової електроенергії одержаної від установок відновлюваних джерел енергії, згідно з винаходом, водень, одержаний методом електролізу в електролізері, в результаті взаємодії з отриманим в адсорбері діоксидом вуглецю перетворюють на синтетичний метан в метанізаторі, який далі системою газопроводів направляють до сховища або безпосередньо до спалювальних установок ТЕЦ, котелень та інших теплогенераторів.**

Запропонований спосіб утилізації надлишкової енергії шляхом перетворення у синтетичний метан з водню дозволяє у якості сховищ для зберігання синтетичного метану використання традиційних сховищ для

природного газу, тоді як транспортування та зберігання чистого водню в резервуарах можливе лише за наявності спеціально створених проти пожежних жорстких вимог, через його вибухонебезпечні властивості.

Подальший процес перетворення отриманого водню в метанізаторі на синтетичний метан, для його подальшого використання в котлах комунальної теплоенергетики дозволяє створити замкнений процес використання водню без заміни наявної котельної бази або окремих конструктивних елементів спалювальних установок.

Окрім цього застосування способу утилізації надлишкової електричної енергії дозволить знизити екстремуми в пікових значеннях добових графіків електрогенерації та дозволить подальше використання продукту на наявному котельному обладнанні.

Спосіб утилізації надлишкової електричної енергії здійснюється наступним чином.

За допомогою надлишкової електроенергії, отриманої від установок відновлюваних джерел енергії, воду у спеціальних пристроях – електролізерах, розкладають на цільові продукти: водень та кисень. Отриманий в результаті електролізу водень поступає у метанізатор, де з додаванням діоксиду вуглецю з димових газів спалювальних установок перетворюється синтетичний метан. Після метанізатора синтетичний метан поступає у сховища або напряму до споживача для подальшого його використання.

Приклад

Реалізувати запропонований спосіб утилізації надлишкової енергії можливо шляхом створенням т.з «водневого ХАБу». Тут і далі терміном «водневий ХАБ» позначено місце, де наявні всі інгредієнти для виробництва, зберігання та використання водню. Наприклад, до його складу можуть входити установки відновлювальних джерел енергії, електролізер, метанізатор, адсорбер та теплогенератор (котельна установка).

На кресленні наведено схему здійснення способу.

За даною схемою встановлене наступне обладнання: 1– електролізер, 2 – метанізатор, 3 – адсорбер та 4 – теплогерело (котельна установка).

Такий спосіб утилізації надлишкової електричної енергії, шляхом перетворення на синтетичний метан, дозволить реалізувати закриту безвуглецеву схему отримання та спалювання синтетичного метану, без викидів парникових газів.

Таким ХАБом, може бути теплогерело (/ТЕЦ), обладнане електрострумоперетворювачами (електричними мережами). Запланована ефективність отримання водню сягає від 70 до 90 % (втрати енергії «зеленої генерації» відповідно 10-30%.) При витраті 1 ампер-години електроенергії можна отримати 418 см³ водню та відповідно 209 см³ кисню.

Для виробництва 1м³ водню у сучасних електролізерах потрібно близько 4 кВт електроенергії, для виробництва з нього 1м³ синтез-метану використовуватиметься близько 4 м³ водню. При встановленій тепловій потужності теплогерела 600 Гкал/год усереднене річне споживання природного газу становить близько 100 000 м³. Для заміни 10 000 м³ (10% від значення річного споживання) палива необхідно близько 10 000 м³ СО₂ та 40000 м³ Н₂ і відповідно 40 000 кВт або 40 МВт електроенергії. Додаткові енергетичні затрати ще включатимуть процеси прокачки і очищення води.

При реакції взаємодії водню з діоксидом вуглецю з димових газів котлів утворюється синтетичний метан, утворена метаново-воднева суміш (до 10 % водню) спалюється у збагаченій киснем (від електролізу) атмосфері, зі зниженим рівнем викидів оксидів азоту в навколишнє повітря. Утворений при спалюванні такої суміші діоксид вуглецю вже не враховується як викид парникового газу, що позитивно впливає на екологічну ситуацію регіону.

Директор ІТТФ НАН України
академік НАН України

Ю.Ф. Снежкін

ФОРМУЛА ВИНАХОДУ

Спосіб утилізації надлишкової електричної енергії, що передбачає отримання надлишкової енергії від установок відновлюваних джерел енергії, одержання водню методом електролізу води в електролізерах, що мають швидку динаміку з динамічним відгуком в діапазоні секунд, з використанням надлишкової електроенергії одержаної від установок відновлюваних джерел енергії, який *відрізняється тим*, що водень, одержаний методом електролізу в електролізері, в результаті взаємодії з очищеним в адсорбері діоксидом вуглецю перетворюють на синтетичний метан в метанізаторі, який далі системою газопроводів направляють до сховища або безпосередньо до ТЕЦ, котелень та інших спалювальних установок.

Директор ІТТФ НАН України
академік НАН України

Снежкін Ю.Ф.

РЕФЕРАТ

Об'єкт винаходу: спосіб утилізації надлишкової електричної енергії.

Галузь застосування: паливно-енергетичний комплекс України та інші галузі.

Сутність винаходу: Спосіб утилізації надлишкової електричної енергії, **що передбачає отримання надлишкової енергії від установок відновлюваних джерел енергії, одержання водню методом електролізу води в електролізерах, що мають швидку динаміку з динамічним відгуком в діапазоні секунд, з використанням надлишкової електроенергії одержаної від установок відновлюваних джерел енергії, який відрізняється тим, що водень, одержаний методом електролізу в електролізері, в результаті взаємодії з очищеним в адсорбері діоксидом вуглецю перетворюють на синтетичний метан в метанізаторі, який далі системою газопроводів направляють до сховища або безпосередньо до ТЕЦ, котелень та інших спалювальних установок. Технічний результат: зниження екстремумів у пікових значеннях добових графіків електрогенерації, можливість використання водню на наявному котельному обладнанні без заміни його конструктивних елементів.**

Додаток Б

Представлення основних цільових показників Водневої Стратегії Європи

Воднева стратегія ЄС



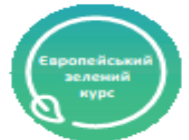
Назва: Воднева стратегія для кліматично нейтральної Європи

Дата, номер документа:

8.07.2020, [COM\(2020\) 301 final](#)

Тип документа: Комюніке Європейської Комісії

Додатки: немає



ОСНОВНІ ЕЛЕМЕНТИ ТА ЗАВДАННЯ СТРАТЕГІЇ

Головний пріоритет стратегії – сприяти використанню відновлюваного водню (водню, що виробляється у процесі електролізу води з використанням електроенергії з відновлюваних джерел, здебільшого сонця та вітру).

Стратегія містить дорожню карту, яка передбачає три фази переходу до повномасштабного виробництва та застосування чистого водню:

2020-2024 рр.:

- планується встановити електролізери чистого водню потужністю 6 ГВт та виробити 1 млн тонн водню;
- декарбонізація наявного виробництва водню з вичерпних джерел;

2025-2030 рр.:

- водень має стати невід'ємною частиною інтегрованої енергетичної системи, виникне потреба у його передачі на відстані;
- встановлена потужність електролізерів чистого водню має досягти 40 ГВт, а його виробництво – 10 млн тонн;

2030-2050 рр.:

- чистий водень має стати самодостатнім та розповсюдженим енергоносієм, що має поєднуватись зі значним розвитком відновлюваних джерел електроенергії.

На першій фазі був запущений так званий Європейський альянс чистого водню, метою якого є посилити партнерство держави, бізнесу та громадянського суспільства для створення інвестиційних пропозицій та ідей.

Окрім дорожньої карти, стратегія містить такі елементи:

- сприяння інвестиціям у водневу сферу, зокрема через використання коштів ЄС та Європейського альянсу чистого водню (лише у сфері виробництва водню очікувана потреба в інвестиціях – 180-470 млрд євро до 2050 року);
- підтримка виробництва та споживання чистого водню, включаючи транспортування та кінцеве споживання (нафтоочистка, сталь, аміак, вантажний авто- та залізничний транспорт, синтетичні види палива), стандартизація та сертифікація;
- розвиток інфраструктури (мереж) та ринкових правил для чистого водню;
- сприяння дослідженням та інноваціям;
- енергетичне міжнародне співробітництво, зокрема й з Україною.

КЛЮЧОВІ ПОКАЗНИКИ, ЯКИХ ЄС ПЛАНУЄ ДОСЯГТИ ДО 2030 РОКУ

- досягнути встановленої потужності електролізерів на рівні 6ГВт у 2024 р. та 40 ГВт у 2030 р.

ЗВ'ЯЗОК З ІНШИМИ ДОКУМЕНТАМИ

- Нова промислова стратегія ЄС;
- Стратегія ЄС з інтеграції енергетичної системи.

КОРИСНІ ПОСИЛАННЯ

- [Короткі факти про стратегію](#)
- [Європейський альянс чистого водню](#)

*Напрями Європейського зеленого курсу



Матеріал підготовлено за підтримки Європейського Союзу та Міжнародного Фонду «Відродження» в межах грантового компоненту проєкту EU4USociety. Матеріал відображає позицію авторів і не обов'язково відображає позицію Міжнародного фонду «Відродження» та Європейського Союзу.



МІЖНАРОДНИЙ
ФОНД
ВІДРОДЖЕННЯ

ПРЯМУЄМО
РАЗОМ

https://www.rac.org.ua/uploads/content/EGDcards/final_00_02_Energetics_2021_ua.pdf

Додаток В

Характеристики вимірювальних приладів

Аналізатор димових газів MRU Optima

Підходить для моніторингу викидів спалювання та промислових процесів. Вимірює CO₂, O₂, NO, NO₂, SO₂, H₂S.

Технічні характеристики MRU Optima

Зберігання даних	до 16 000 вимірювань внутрішньо або SD-карту
Інтерфейси	mini-USB, SD, інфрачервоний порт, Bluetooth™ (передача даних на смартфон, планшет або ПК)
Продувка СО-сенсора (опція)	використання другого насоса для захисту датчика
Дисплей	3,5" TFT
Час роботи від батареї	до 15 годин безперервної роботи з літій-іонним акумулятором
Мережа	джерело живлення від розетки, 100-240 В змінного струму /50 ... 60 Гц
Клас захисту	IP 30
Атестація	TÜV ByRgG 280, VDI 4206-1, EN 50379

Вага	прибл. 750 г
Розміри	110x225x52 мм (ВxШxГ)

Характеристики сенсорів

Компоненти вимірювання	Роздільна здатність діапазону	Точність
Кисень O ₂	0... 25,00 Об.-% 0,01 %	+0,2 об.-% абс.
Вуглекислий газ CO ₂ ndir	0... 40,00 Об.-% 0,01 %	+0,3 % або 5 % від виміряного значення **
Вуглеводень HC ndir	100... 40 000 ppm lOppm	+400 ppm або 5 % показання**
Чадний газ CO	0 ... 1 0,000/20,000 ppm* 0,01 ppm	±10 ppm або 5 % зчитування до 4000 ppm**
		або 10% зчитування до 10 000 ppm**
Окис вуглецю CO низький ***	0... 500 ppm 0,1 ppm	+2 ppm або 5 % показання**
Окис вуглецю CO дуже високий	0. ..40.000/1 00.000 ppm* <9,999 ppm:l ppm>	±0,02 % або 5 % показання до 4,00 %**
	10 000 ppm:10 ppm	або 10% читання до 10,00%**
Окис азоту NO	0... 1.000/5.000 ppm* 1 ppm	±5 ppm або 5 % зчитування до 1 000 ppm**
		або 10 % зчитування до 5000 ppm**
Окис азоту NO низький***	0... 300 ppm 0,1 ppm	+2 ppm або 5 % показання**
Діоксид азоту NO [^]	0...200/1.000 ppm* 1 ppm	+5 ppm або 5 % показання до 200 ppm**

		або 10 % зчитування до 1000 ppm**
Діоксид азоту NO ₂ низький***	0... 100 ppm 0,1 ppm	±2 ppm або 5 % показання**
Діоксид сірки SO ₂ ;	0... 2.000/5.000 ppm 1 ppm	+ 10 ppm або 5 % показання до 2000 ppm**
		або 10 % зчитування до 5000 ppm**
Діоксид сірки SO ₂ ; чб***	0... 300 ppm 0,1 ppm	+2 ppm або 4 % показання**
Сірководень H ₂ S	0... 500/2.000 ppm 1 ppm	+5 ppm або 5 % показання до 500 ppm**
		або 10 % зчитування до 5000 ppm**
Сірководень H ₂ S низький***	0 ... 100 ppm 1 ppm	+2 ppm або 4 % показання**
Метан (CH ₄) ndir	100 ...40 000 ppm 10 ppm	+400 ppm або 5% зчитування*
Температура газу в трубці T.Gas	0... 1.200 °C 0,1 °C	+2 °C ... < 200 °C або 1 % показання до 200 °C**
Температура повітря для горіння T.Air	0... 100°C 0,1 °C	+ 1 °C
температура /	-40 °C ... 1 .200 °C 0,1 °C	+2 °C або 1% показання**
Перепад температур T1/T2	(з термопарою типу K}	
Тяга / Перепад тиску	-300... +300 гПа 0,01 гПа	+0,02 год Па

16.3 Передача данных через Bluetooth (опция)

16.3.1 PDA-интерфейс Bluetooth

Встроенный модуль Bluetooth позволяет передавать измеренные данные от газоанализатора на карманный ПК. Через порт Bluetooth возможно дистанционное управление газоанализатором MRU. При помощи карманного ПК можно управлять многими функциями, например, СТАРТ, СТОП и др.

При поставке газоанализатора с модулем Bluetooth, поставляется программное обеспечение, MRU при помощи которого осуществляется корректная передача данных.

16.4

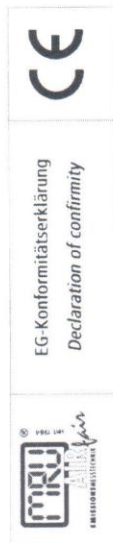
Измеряемые параметры	Размерность
O ₂	[%]
CO	[ppm]
CO	[%]
NO	[ppm]
NO ₂	[ppm]
SO ₂	[ppm]
Температура воздуха (Термоэлемент)	[°C] [°F]
Температура дымовых газов (Термоэлемент)	[°C] [°F]
CO	[ppm]
Тяга	[Па]
Вычисления для CO	CO
[ppm] относительно 0% остатка O ₂ (неразбавленное)	X
[ppm] относительно зависимого от топлива относительного значения O ₂	X
[mg/m ³]	X
[mg/kWh]	X
[mg/MJ]	X
[mg/m ³] относительно зависимого от топлива относительного значения O ₂	X

Расчетные параметры	Размерность
CO ₂	[%]
КПД ETA	[%]
КПД конденсацион.	[%]
Потери	[%]
Потери конденсацион.	[%]
Lambda (коэфф. избытка воздуха)	-
Точка росы	[°C] [°F]
Соотношение CO/CO ₂	[%]

Потери и КПД вычисляются, учитывая теплоту сгорания топлива.

Для конденсационных котлов КПД > 100%

16.5 EG – Декларация



MRU Messgeräte für Rauchgase und Umweltschutz GmbH

Fuchshalde 8 + 12
74172 Neckarsulm-Obereisesheim
Deutschland / Germany
Tel.: +49 (0) 7132 - 99 62 0
Fax: +49 (0) 7132 - 99 62 20
E-Mail / mail: info@mruf.de
Internet / site: www.mru.eu



Bevollmächtigte Person, für die Zusammenstellung der technischen Unterlagen
Person authorized to compile the technical documents

Name / name: Dierrk Altrands
Funktion / function: QM-Beauftragter / QM-Representative
Firmenname / company: Messgeräte für Rauchgase und Umweltschutz GmbH
Straße / street: Fuchshalde 8 + 12
Ort / city: 74172 Neckarsulm
Land / country: Deutschland / Germany

Produkt/Product

Bezeichnung / designation: Gasanalytator
Gas analyser
Produktname / name: OPTIMA7
Funktion / function: Gasanalyse / gas analysis

Hiermit erkläre wir, dass das oben beschriebene Produkt allen einschlägigen Bestimmungen entspricht, es erfüllt die Anforderungen der nachfolgend genannten Richtlinien und Normen:
We declare the conformity of the product with the applicable regulations listed below:

- EMV Richtlinie / EMV directive 2004/108/EG
- Niederspannungsrichtlinie / low voltage directive 2006/95/EG
- RoHS Richtlinie / RoHS directive 2011/65/EC (RoHS II)

Neckarsulm, 22.11.2013

Erwin Hinz, Geschäftsführer / Managing Director

МІНЕКОНОМІКИ
ДЕРЖАВНЕ ПІДПРИЄМСТВО
“ЛЬВІВСЬКИЙ НАУКОВО-ВИРОБНИЧИЙ
ЦЕНТР СТАНДАРТИЗАЦІЇ, МЕТРОЛОГІЇ ТА СЕРТИФІКАЦІЇ”
(ДП “Львівстандартметрологія”)

вул. Князя Романа, 38, м. Львів, 79005, тел.: (032) 261-60-30, факс: (032) 261-66-79
web: http://www.semesta.lviv.ua, e-mail: centr@semesta.lviv.ua, код згідно з ЄДРПОУ 04725912
Свідоцтво про уповноваження № П-14-2019 від 22.03.2019 р.

СВІДОЦТВО

про повірку законодавчо регульованого засобу вимірювальної техніки

№ 02ЧГ-1345 Чинне до “6” 10 2021 р.

Назва та умовне позначення Сенсоризатор
об'єкта 7 Зав. № 0305409
Виробник Німецька

За результатами повірки встановлено, що засіб вимірювальної техніки
(далі – ЗВТ) відповідає вимогам ГОСТ
(назва нормативно-правового акта/нормативного документа,
ДСТУ

що містить вимоги до метрологічних характеристик і значення метрологічних
ДСТУ 265-12-99
характеристик (клас точності, похибки, діапазон вимірювання), особливості застосування ЗВТ)

Додаток: на — стор. у — прим.

Персонал, який виконував
роботи з повірки

(підпис)

(ініціали, прізвище)

Місце відбитка
повірочного тавра



“6” 10 2020 р.



037018

Технічні характеристики регістратора TRITON 6004TC

Модуль TRITON 6004TC - це мікропроцесорний пристрій для реєстрації та перетворення сигналів, отриманих за допомогою термопар або інших датчиків - джерел напруги. Виміряні дані відображаються на вбудованому індикаторі і можуть бути передані до комп'ютера за допомогою інтерфейсу USB. Компенсація температури "холодних"-спаїв термопар (опорний спай) виконується або автоматично зовнішнім датчиком температури, або її задає користувач.

Модуль призначений для створення автоматизованих систем вимірювання (реєстрації) температури і може працювати спільно з іншими модулями серії TRITON.

До модулю можна підключити до 16 термопар або інших джерел напруги. Користувач може записати в пам'ять модуля параметри підключених термопар для правильного розрахунку і відображення температури. Діапазон температур і похибка визначаються типом термопар і точністю апроксимуючої поліноміальної характеристики, що використовується для цієї термопар.

Модуль живиться від інтерфейсу USB. Інтерфейс USB гальванічно розв'язаний від джерел вхідного сигналу. Вбудований індикатор відображає інформацію в форматі 4 рядки по 16 символів і має підсвічування. Діапазон відображуваних значень температури вибирається оператором за допомогою двох кнопок, розташованих на бічній стінці корпусу.

Вбудована в модуль апаратна і програмна фільтрація в поєднанні з диференціальними входами і екранованим корпусом забезпечує відмінну заводо захищеність. У модулі застосований 24-розрядний сигма-дельта АЦП з підсилювачем на вході, що забезпечує високу точність вимірювання температури.

У комплект поставки включена зручна стандартна програма для роботи з модулем і драйвер. Програма дозволяє працювати з модулем в режимі

реального часу, результат вимірювання виводиться на графік і в таблицю, є можливість експортувати його в Excel, роздрукувати, зберегти на диску.

Особливості модуля TRITON 6004ТС:

- багатоканальність - до 16 каналів;
- висока заводо захищеність;
- висока точність вимірювання;
- повна гальванічна розв'язка з інтерфейсом USB;
- корпус промислового стандарту IP 66;
- компенсація температури холодного спаю;
- вбудована індикація;
- вбудоване джерело живлення 220В 50Гц.

Основні технічні характеристики модуля TRITON 6004ТС наведено в таблиці Д.1.

Таблиця Д.1 – Основні технічні характеристики модуля TRITON 6004ТС

Основні характеристики	Значення
Кількість термопар, що підключається	16 (або 8 диференціальних)
Типи термопар, що приміняються	МК, ХА, ХК, ПП, ПР
Діапазони вихідної напруги	±19,5 мВ ±39 мВ ±1,17 В
Термін виміру по одному каналу	0,1 С
Полоса пропускання вихідних ланцюгів	0..25 Гц
Типи датчиків компенсації холодного спаю	РТ100 РТ1000
Інтерфейс обміну даними	USB
Швидкість обміні по інтерфейсу	до 115200 біт/с
Довжина лінії зв'язку	до 5 м
Габаритні розміри	94x160x50 мм
Маса	не більше 300г

Додаток Г

Експериментальні заміри концентрації оксидів азоту по ширині фронту полум'я

	Переріз фронту полум'я при δ , мм							
	$\delta = 0$	$\delta = 0,38$	$\delta = 0,51$	$\delta = 0,75$	$\delta = 1$	$\delta = 1,5$	$\delta = 2$	$\delta = 2,5$
Замір №1	13,94	23,2	35,2	50,4	64,3	75,3	75,2	70,4
Замір №2	14,22	23,23	35,06	50,35	64,2	75,35	75,4	69,9
Замір №3	14,43	23	35,16	50,5	64,35	75,8	75,6	70,2
Замір №4	14,28	23,28	35,21	50,55	64,55	75,2	74,9	70,8
Замір №5	14,25	23,48	35,18	50,5	64,6	75,15	75,6	70,6
Замір №6	14,25	23,05	35,05	50,3	64,15	75,65	75,1	70,85
Замір №7	14,24	23,27	35,14	50,6	64,15	75,2	75,15	70,2
Замір №8	14,25	23	35,08	50,4	64,5	75,1	75,3	70,45
Замір №9	14,23	23,06	35,27	51,3	64,1	75,05	75	70,1
Замір №10	14,33	23,24	35,18	50,2	64,15	75,4	75,05	70,6
Сер. ариф.	14,242	23,181	35,153	50,510	64,305	75,320	75,230	70,410

7% розчин перекису водню								
	Переріз фронту полум'я при δ , мм							
	$\delta = 0$	$\delta = 0,38$	$\delta = 0,51$	$\delta = 0,75$	$\delta = 1$	$\delta = 1,5$	$\delta = 2$	$\delta = 2,5$
Замір №1	20,4	29,4	41,2	53,4	66,4	80,2	80,5	80,4
Замір №2	20,3	29,1	41,25	53,2	64,2	75,35	75,4	69,9
Замір №3	20,25	29,55	41	53,65	64,35	75,8	75,6	70,2
Замір №4	20,15	29,6	41,3	53,55	64,55	75,2	74,9	70,8
Замір №5	20,6	29,85	41,5	53,25	64,5	75,15	75,6	70,6
Замір №6	20,3	29,75	41,05	53,5	64,05	75,65	75,1	70,85
Замір №7	20,45	29,5	41,05	53,15	64,15	75,2	75,15	70,2
Замір №8	20,14	29,4	41,3	53,4	64,3	75,1	75,3	70,45
Замір №9	20,5	29	41,5	53,6	64,45	75,05	75	70,1
Замір №10	20,6	29,25	41,25	53,2	64,25	75,4	75,05	70,6
Сер. ариф.	20,37	29,440	41,240	53,390	64,520	75,810	75,760	71,410

15% розчин перекису водню						
	Переріз фронту полум'я при δ , мм					
	$\delta = 0$	$\delta = 0,5$	$\delta = 0,75$	$\delta = 1,35$	$\delta = 2$	$\delta = 2,5$
Замір №1	20,1	46,3	58,3	85,4	86	85,9
Замір №2	20,3	46,25	58,35	85,3	85,9	85,85
Замір №3	20,25	46,65	58,6	85,45	85,8	85,7
Замір №4	20,15	46,55	58,2	85,1	86,15	85,6
Замір №5	20,3	46,25	58,15	85,9	86,2	85,9
Замір №6	20,3	46,5	57,95	85,35	85,75	86,2
Замір №7	19,9	46,6	57,95	85,5	86,7	85,95
Замір №8	20,14	46,15	58,3	85,8	86,2	86,15
Замір №9	19,8	46,1	58,5	85,2	86,1	86,25
Замір №10	20,2	46	58,45	85,1	86,15	86,1
Сер. ариф.	20,14	46,33	58,28	85,41	86,1	85,96

30% розчин перекису водню							
	Переріз фронту полум'я при δ , мм						
	$\delta = 0$	$\delta = 0,38$	$\delta = 0,5$	$\delta = 1$	$\delta = 1,5$	$\delta = 2$	$\delta = 2,5$
Замір №1	30,2	46,1	52,2	79,3	93,1	92,8	92,7
Замір №2	30,15	46,2	52,5	79,65	92,85	92,8	92,8
Замір №3	30,5	46,5	51,9	79,5	92,9	92,9	92,5
Замір №4	30,25	45,85	51,95	79,1	93,5	93,05	92,8
Замір №5	30,55	45,9	51,8	78,75	93,15	92,6	93
Замір №6	30,4	45,95	52,6	79,2	93,45	92,8	93,1
Замір №7	30,05	46,25	52,7	79,5	93,15	92,5	92,8
Замір №8	30	46	52,3	79,45	92,95	92,4	92,5
Замір №9	30,05	46,2	52,4	79,6	93	92,9	92,6
Замір №10	30,05	46,3	51,9	79	93,05	92,95	92,4
Сер. ариф.	30,220	46,125	52,225	79,305	93,110	92,770	92,720

Вода								
	Переріз фронту полум'я при δ, мм							
	$\delta = 0$	$\delta = 0,38$	$\delta = 0,51$	$\delta = 0,75$	$\delta = 1$	$\delta = 1,5$	$\delta = 2$	$\delta = 2,5$
Замір №1	9	18,1	31	47,2	60	70	70,5	65,1
Замір №2	8,95	18,2	30,95	47,25	60,2	70,1	70,55	65,15
Замір №3	8,9	18,5	30,95	47,35	60,25	70,15	70,45	65,2
Замір №4	9,15	18,3	31,25	47,15	59,8	69,5	70,55	65,4
Замір №5	8,95	17,95	31	46,95	59,7	69,8	70,35	65,2
Замір №6	8,9	17,9	31,5	46,85	60,5	69,95	70,6	65,25
Замір №7	9,15	18	31,25	46,9	60,25	70,2	70,7	65,25
Замір №8	9,15	18,35	30,85	47,1	60,15	70,25	70,6	65
Замір №9	9,1	18,2	30,95	47,6	60,05	70,3	70,4	64,95
Замір №10	8,9	17,9	31,4	47,55	59,8	70	70,4	64,95
Сер. ариф.	9,015	18,140	31,110	47,190	60,070	70,025	70,510	65,145

Експериментальні заміри температури та оксидів азоту по ширині фронту полум'я при введенні крапель води

С (NO), мг/м ³ (Без введення вологи)							
Дельта, мм	0	0,5	1	1,5	2	2,5	3
Замір №1	17,8	28,3	107,6	112,9	110,8	104,8	103,0
Замір №2	16,5	27,6	107,9	114,6	110,6	104,9	103,4
Замір №3	19,5	28,0	108,4	114,5	110,7	104,1	103,6
Замір №4	18,0	28,1	108,6	113,8	111,6	105,6	102,7
Замір №5	18,2	27,6	108,5	114,2	111,4	105,5	102,5
Замір №6	19,3	28,0	108,2	114,0	111,5	104,0	102,6
Замір №7	19,6	28,0	107,5	114,6	111,3	105,1	103,4
Замір №8	18,3	28,2	107,6	114,5	111,2	105,1	103,4
Замір №9	17,6	28,1	107,9	113,7	110,9	105,2	103,0
Замір №10	17,9	28,0	108,2	114,1	110,6	104,6	103,4
Сер. ариф.	18,0	28,0	108,0	114,0	111,0	105,0	103,0

С (NO), мг/м ³ (З введенням 1 каплі)							
Дельта, мм	0	0,5	1	1,5	2	2,5	3
Замір №1	18,2	23,6	58,6	74,2	76,5	74,1	67,9
Замір №2	18,3	23,4	59,6	74,1	76,4	74,0	68,2
Замір №3	17,9	22,8	59,8	74,6	76,2	73,8	68,2
Замір №4	17,7	22,7	60,4	73,8	75,8	73,9	68,4
Замір №5	18,3	22,7	60,0	74,0	75,8	74,2	68,3
Замір №6	18,0	22,9	60,2	74,1	75,7	74,1	67,6
Замір №7	18,1	23,0	60,4	73,8	75,9	73,0	67,6
Замір №8	17,8	23,1	60,3	73,7	76,0	73,9	67,9
Замір №9	17,6	23,2	60,4	73,6	75,9	73,6	68,0
Замір №10	18,2	23,0	60,1	74,1	75,6	74,3	68,2
Сер. ариф.	18,0	23,0	60,0	74,0	76,1	74,0	68,0

С (NO), мг/м ³ (З введенням 2-х крапель)							
Дельта, мм	0	0,5	1	1,5	2	2,5	3
Замір №1	18,2	22,4	47,6	70,5	69,7	69,6	63,4
Замір №2	18,3	23,0	47,9	70,2	69,6	69,6	63,7
Замір №3	18,0	22,1	47,9	69,8	69,5	69,7	62,8
Замір №4	17,6	22,6	48,2	69,5	69,9	70,4	63,0
Замір №5	17,6	22,4	48,0	69,6	70,0	70,6	63,5
Замір №6	17,9	21,0	48,3	69,9	70,3	70,5	62,9
Замір №7	18,1	21,8	48,0	70,1	70,2	70,1	62,5
Замір №8	18,3	21,4	47,8	70,0	69,0	70,2	62,8
Замір №9	18,0	22,0	48,2	70,3	70,3	70,0	63,1
Замір №10	17,8	22,2	48,1	70,2	70,3	70,2	63,0
Сер. ариф.	18,0	22,0	48,0	70,0	70,0	70,0	63,0

Т, К (Без введення вологи)								
Дельта, мм	-0,5	0	0,5	1	1,5	2	2,5	3
Замір №1	475,0	1273,0	1615,0	1620,0	1621,0	1624,0	1616,0	1475,0
Замір №2	476,0	1276,0	1612,0	1619,0	1625,0	1625,0	1619,0	1480,0
Замір №3	470,0	1280,0	1610,0	1615,0	1618,0	1623,0	1621,0	1473,0
Замір №4	476,0	1275,0	1608,0	1614,0	1615,0	1624,0	1624,0	1480,0
Замір №5	470,0	1273,0	1612,0	1618,0	1616,0	1616,0	1615,0	1470,0
Замір №6	473,0	1269,0	1608,0	1619,0	1618,0	1615,0	1614,0	1473,0
Замір №7	473,0	1268,0	1617,0	1621,0	1619,0	1618,0	1610,0	1470,0
Замір №8	475,0	1270,0	1620,0	1622,0	1614,0	1620,0	1609,0	1472,0
Замір №9	473,0	1272,0	1605,0	1616,0	1612,0	1622,0	1614,0	1468,0
Замір №10	470,0	1275,0	1609,0	1617,0	1613,0	1614,0	1618,0	1469,0
Сер. ариф.	473,0	1273,0	1612,0	1618,0	1617,0	1620,0	1616,0	1473,0

Т, К (З введенням 1 каплі)								
Дельта, мм	-0,5	0	0,5	1	1,5	2	2,5	3
Замір №1	475	1078	1376	1372	1370	1372	1330	1260
Замір №2	479	1090	1378	1375	1372	1375	1329	1262
Замір №3	478	1089	1372	1379	1373	1369	1339	1268
Замір №4	475	1090	1378	1370	1374	1368	1327	1258
Замір №5	470	1085	1374	1372	1368	1365	1329	1254
Замір №6	476	1078	1376	1368	1364	1376	1334	1255
Замір №7	470	1084	1376	1369	1369	1372	1332	1256
Замір №8	469	1089	1380	1367	1370	1373	1328	1257
Замір №9	467	1086	1370	1366	1372	1368	1327	1260
Замір №10	478	1084	1371	1378	1371	1375	1326	1258
Сер. ариф.	474	1085	1375	1372	1370	1371	1330	1259

Т, К (З введенням 2-х капель)								
Дельта, мм	-0,5	0	0,5	1	1,5	2	2,5	3
Замір №1	476	1070	1324	1323	1317	1318	1296	1205
Замір №2	478	1068	1320	1325	1315	1317	1298	1209
Замір №3	480	1065	1322	1326	1325	1316	1301	1206
Замір №4	470	1064	1323	1320	1329	1318	1294	1219
Замір №5	472	1075	1325	1326	1314	1316	1287	1216
Замір №6	473	1078	1330	1326	1319	1314	1289	1208
Замір №7	476	1079	1319	1327	1325	1310	1294	1216
Замір №8	476	1079	1326	1321	1326	1326	1299	1214
Замір №9	473	1072	1328	1320	1320	1324	1299	1213
Замір №10	476	1070	1329	1320	1314	1326	1295	1207
Сер. ариф.	475	1072	1325	1323	1320	1319	1295	1211

Додаток 3

Опис теплоджерела СТ-1

Станція теплопостачання №1 (СТ-1) розташована по вул. Жилянська, 85, у Солом'янському районі м. Києва. СТ-1 працює на опалення, ГВП та вентиляцію в опалювальний та неопалювальний періоди. Паливо – природний газ. Загальний вид СТ-1 наведений на рисунку Ж1.



Рис. Ж1 - Загальний вид СТ-1

Встановлене теплогенеруюче обладнання:

Тип котлів	Рік введ. в експл. котла	Ст. № котла	Встановлена потужність, Гкал/год	Наявна потужність, Гкал/год
ПТВМ-100	1961	1	100	93,00
ПТВМ-100	1962	2	100	97,50
ПТВМ-100	1968	3	100	97,50
Фостер-Уиллер (рек.)	1948	4	80	63,00
Фостер-Уиллер (рек.)	1949	5	80	58,20
ЦКТИ 75-39-ф (рек.)	1953	6	55	54,29
ЦКТИ 75-39-ф (рек.)	1954	7	55	55,40

Сумарна встановлена теплова потужність станції теплопостачання СТ-1 складає 570 Гкал/год.

Котли ПТВМ-100 використовуються як пікові. Котли Фостер-Уиллер та ЦКТИ 75-39-ф переведені у водогрійний режим. Слід відмітити зношений стан повітряпідігрівачів за котлами Фостер-Уиллер.

Всі котли працюють на індивідуальні димові труби.

Наявна потужність котлів СТ-1 складає 518,89 Гкал/год. З урахуванням власних потреб – 7,4 Гкал/год, корисна потужність на виводах СТ-1 становить 511,49 Гкал/год.

Сумарна максимальна потужність згідно режимних карт котлів складає 425,49 Гкал/год.

Запланована реконструкція з заміною застарілого котельного обладнання та збільшенням теплової.

Загальна прогнозна встановлена тепла потужність: 770 – 800 Гкал/год.

Ці заходи дозволять забезпечити можливість планованого переведення на СТ-1 теплового навантаження існуючих споживачів інших котелень, та забезпечити теплотребни майбутніх споживачів відповідно до виданих ТУ та ДПТ-11. Перспективне додаткове переведення навантаження після реконструкції: 200 Гкал/год – на СТ-1 від ТЕЦ-5 (перерозподіл подачі теплоносія від ТЕЦ-5 до ТМ-6 СТ-1).

Перспектива: з метою скорочення викидів забруднюючих речовин та парникових газів в центральній частині міста, пропонується поступове переведення СТ-1 на водневе паливо.

Електроенергія отримується від «зеленої» енергетики і використовується для електролізу води на СТ-1: до 2030 року – до 300 МВт, після 2030 року – до повного задовільнення потреб СТ-1. Використовується сира вода річки Либідь з метою її очищення.

Електроенергія для електролізу води отримуватиметься від ОЕС країни, в тому числі з використанням «зеленої» енергетики, в часові періоди існування її надлишку, що сприятиме балансуванню енергосистеми.

Отриманий водень подаватиметься у метанізатор, в якому при реакції взаємодії водню з діоксидом вуглецю з димових газів котлів утворюватиметься синтетичний метан; утворена метаново-воднева суміш (з вмістом приблизно до 11 % водню) подаватиметься в топкову камеру котла.

Утворений в такому процесі спалювання діоксид вуглецю вже не враховується як викид парникового газу, і повертається в цикл.

Для запобігання потреби транспортування водню, з огляду на технічну складність та вибухонебезпечність цього процесу, електролізер та метанізатор передбачається виконати в одному загальному корпусі.

Терміни реконструкції:

До 2025: Встановлення 2 котлів потужністю по 100 Гкал/год. Реконструкція 3 водогрійних котлів (ПТВ-100 ст. №1, ПТВМ-100 ст. №2 та ПТВМ-100 ст. №3) з заміною пального устаткування на низькоемісійне. Переведення на СТ-1 навантаження 200 Гкал/год від ТЕЦ-5. Реконструкція водопідготовчих установок зі збільшенням їх потужності.

До 2030: Реконструкція всіх котлів "Фостер-Уиллер" та "ЦКТИ 75-39-ф", або заміна їх на 4 нових котла, з можливістю працювати на метано-водневій суміші.

АКТ

впровадження науково-технічних рішень

Цей Акт складений у тому, що науково-технічні рішення Інституту технічної теплофізики НАН України впроваджені при розробленні «Схеми теплопостачання м. Києва на період до 2030 року», виконаної на замовлення Департаменту житлово-комунальної інфраструктури виконавчого органу Київської міської ради (Київської міської державної адміністрації), погодженою Міністерством розвитку громад та територій України та прийнятою Замовником.

До розробленої «Схеми теплопостачання м. Києва на період до 2030 року» ввійшли наступні науково-технічні рішення та напрацювання ІТТФ НАН України:

Впровадження технології використання «зеленого» водню для виробництва синтетичного метану: створення водневого хабу на СТ-1, з отриманням водню шляхом електролізу сирової води річки Либідь з використанням електроенергії від «зеленої» енергетики, та наступною його метанізацією з отриманням синтетичного «зеленого» метану і подальшим спалюванням в котлоагрегатах СТ-1.

Від ІТТФ НАН України
Директор, академік НАНУ

Снежкін Ю.Ф.
26.08.21р.
Науковий керівник роботи

Сігал О.І.

Від Департаменту ЖКІ КМДА
Директор

Науменко Д.В.

Додаток Ж

Опис теплоджерела РК «Південна-1»

Районна котельня «Південна-1» по пр.-ту Ак. Глушко, 11, відноситься до Експлуатаційно-ремонтного району (ЕРР) № 4, окремостояча. Котельня працює на опалення. Паливо – природний газ. Температурний графік роботи котельні 95-53 °С.

Загальний вид РК «Південна-1» наведений на рисунку Ж1.



Рис. Ж1 - Загальний вид РК «Південна-1»

В котельні встановлено 4 водогрійних котла типу ПТВМ-50. Детальна інформація наведена у таблиці нижче.

Назва теплоджерела	Адреса теплоджерела	Тип котлів	Рік введ. в експл. котла	Станц. номер	Реєстр. номер	Встановлена потужність, Гкал/год
Південна-1	пр-т Ак. Глушко, 11	ПТВМ-50-4	1975	1	3820	50
		ПТВМ-50-4	1975	2	3820	50
		ПТВМ-50-4	1976	3	3876	50
		ПТВМ-50-4	1981	4	4305	50

Котли працюють на димову трубу висотою 100 м. та діаметром 3500 мм.

Загальна встановлена теплова потужність котельні складає 200 Гкал/год. Всі котли знаходяться в робочому стані, наявна встановлена теплова потужність котельні відповідає загальній.

Витрати теплової енергії на власні потреби котельні згідно наданій інформації складають 2,2 %.

Марка котла	Станц. номер	Середній ККД котла, %	Макс. теплопродуктивність за РК, Гкал/год
ПТВМ-50	1	92,36	30,52
ПТВМ-50	2	92,85	31,005
ПТВМ-50	3	92,67	29,64
ПТВМ-50	4	92,6	32,45
Всього			123,615

Наявна теплова потужність котельні на відпуск теплової енергії споживачам визначається сумациєю максимальних теплових потужностей котлів згідно їх режимних карт, яка складає 123,62 Гкал/год, за вирахуванням витрат теплової енергії на власні потреби, і становить 120,9 Гкал/год

Оціночне навантаження теплоджерела при розрахунковій зовнішній температурі повітря -18°C становить 72,953 Гкал/год. Резерв потужності на цей час становить 47,94 Гкал/год.

Перспективне навантаження на теплоджерело з урахуванням ТУ, ДПТ та додаткового переведеного навантаження становитиме **80,77** Гкал/год, відповідно перспективний резерв становитиме **40,13** Гкал/год.

З метою скорочення викидів забруднюючих речовин та парникових газів від СЦТ міста, передбачається також будівництво на РК «Південна-1» «водневого хабу», з поступовим переведенням котлів РК «Південна-1» на воденьвмісне паливо.

Електроенергія для електролізу води отримуватиметься від ОЕС країни, в тому числі з використанням «зеленої» енергетики, в часові періоди існування її надлишку, що сприятиме балансуванню енергосистеми.

Отриманий водень подаватиметься у метанізатор, в якому при реакції взаємодії водню з діоксидом вуглецю з димових газів котлів утворюватиметься синтетичний метан; утворена метаново-воднева суміш (з вмістом приблизно до 11 % водню) подаватиметься в топкову камеру котла.

Утворений в такому процесі спалювання діоксид вуглецю вже не враховується як викид парникового газу, і повертається в цикл.

Для запобігання потреби транспортування водню, з огляду на технічну складність та вибухонебезпечність цього процесу, електролізер та метанізатор передбачається виконати в одному загальному корпусі.

Після впровадження вказаних заходів, передбачається перерозподіл навантаження на РК «Південна-1» від РК «Південна-2», в обсязі близько 85 Гкал/год.

Теплової потужності РК «Південна-1» достатньо для забезпечення існуючого та перспективного теплового навантаження.

ЗАТВЕРДЖУЮ

Директор КП «Теплопостачання міста
Одеси»

Позднякова Г.І.

02.06.2022р.

АКТ

впровадження науково-технічних рішень

Цей Акт складений у тому, що науково-технічні рішення Інституту технічної теплофізики НАН України впроваджені при розробленні «Схеми теплопостачання м. Одеси», виконаної на замовлення КП «Теплопостачання міста Одеси», погодженою Міністерством розвитку громад та територій України та прийнятою Замовником.

При розробленні «Схеми теплопостачання м. Одеси» використані наступні науково-технічні рішення та напрацювання ІТТФ НАН України:

- Впровадження використання водню від електролізу з використанням «зеленої» електроенергії, для формування синтетичної метано-водневої паливної суміші (створення водневого хабу на РК «Південна-1»).

Від ІТТФ НАН України

Директор, академік НАНУ

Снежкін Ю.Ф.

Науковий керівник роботи

Сігал О.І.

Від КП «Теплопостачання міста Одеси»

Директор

Позднякова Г.І.