

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

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

Кваліфікаційна наукова
праця на правах рукопису

Куник Арсен Андрійович

УДК 621.43.056

ДИСЕРТАЦІЯ

Підвищення рівня ефективності роботи вогнетехнічних об'єктів на основі
струменево-нішевої технології

144 - Теплоенергетика

14- Електрична інженерія

Подається на здобуття наукового ступеня доктора філософії

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



Арсен КУНИК

Науковий керівник Абдулін Михайло Загретдинович д.т.н., професор.

Київ - 2025

АНОТАЦІЯ

Куник А.А. Підвищення рівня ефективності роботи вогнетехнічних об'єктів на основі струменево-нішевої технології – Кваліфікаційна наукова праця на правах рукопису.

Дисертація на здобуття наукового ступеня доктора філософії за спеціальністю 144 «Теплоенергетика». – Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського», Київ, 2025.

Підготовка здійснювалася на кафедрі теплової та альтернативної енергетики Навчально-наукового інституту атомної та теплової енергетики Національного технічного університету України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського».

Перед промисловістю та енергетикою стоїть декілька важливих задач, які потребують якнайшвидшого вирішення. Однією з таких задач є забезпечення надійної та ефективної роботи вогнетехнічних об'єктів на промислових та комунальних підприємствах, особливо в сучасних умовах.

Диверсифікація паливного господарства розглядається як один із пріоритетних напрямків для забезпечення надійності та ефективності функціонування систем. Вона сприяє підвищенню економічності та стійкості технологічних процесів, а також забезпечує гарантії стабільного паливостачання. Зокрема, наявність можливості тимчасового переходу на альтернативні види палива є необхідною умовою для мінімізації ризиків, пов'язаних з перебоями у постачанні основного палива.

У **першому розділі** дисертації описано нинішній стан різних видів вогнетехнічних об'єктів, їх паливну базу в світі та Україні. Проаналізовано тенденції до застосування нових видів палива, а також проблеми, що виникають при використанні сучасних основних видів палив, та підходи до їх вирішень. Проведено аналітичне дослідження технологій спалювання, сформовано список вимог до технологій спалювання для реалізації на ній комбінованих та універсальних пальникових пристроїв.

З точки зору конструкції пальникових пристроїв та вогнетехнічних об'єктів та підприємств в цілому, розглянуто вплив застосування різноманітних видів палив на робочий процес пальникових пристроїв. А також, проведено аналіз відмінностей у фізичних та хімічних властивостях цих палив, можливі змінами у конструкції пальникових пристроїв задля підвищення ефективності спалювання та скорочення викидів шкідливих речовин. Взято у врахування інші серйозні проблеми для організації ефективного спалювання.

Струменево-нишеві системи займають особливе місце серед спалювальних технологій, здатних працювати з різноманітними видами палива у різних станах. Зазначені технології та створені на їх основі пальникові пристрої вирізняються багатьма вигідними властивостями, наприклад, забезпечують стабільне горіння в широкому діапазоні навантажень та мінімізують гідравлічний опір потоку окиснювача. Для успішного розвитку та поширення таких технологій необхідне детальне вивчення закономірностей горіння, що проявляються при їхній реалізації.

Протягом кількох десятиліть на кафедрі теплової та альтернативної енергетики Інституту атомної та теплової енергетики НТУУ «КПІ імені Ігоря Сікорського» ведеться розробка пальникових пристроїв на базі струменево-нишевої технології. Ці розробки відзначаються забезпеченням високої економічної ефективності, екологічної безпеки та стабільної роботи.

В рамках представленої роботи головним способом диверсифікації паливної бази є вивчення, розробка та інтеграція нового покоління комбінованих пальникових пристроїв. Метою цих пристроїв є підвищення ефективності спалювання як основних видів палива, так і запасних та аварійних варіантів, що типово використовуються на більшості об'єктів теплоенергетики.

В першу чергу, розглядається можливість почергового спалювання природного газу та пропан-бутану, без зміни конструкції пальникового пристрою, та тривалої підготовки.

Також проведено аналіз застосування домішок високореакційних палив,

наприклад водню, для приведення різних видів палива до схожих теплофізичних характеристик коефіцієнта Воббе, температури згорання і т.д.

Другий розділ дисертації присвячено опису методологічного підґрунтя та методичних підходів до проведення досліджень, які реалізовувалися як в лабораторних умовах, так і на промислових об'єктах. Детально представлено структуру експериментальних стендів, використані методики випробувань, а також здійснено розрахунок похибок вимірювань. Розроблена комплексна методика дослідження охоплює наступні етапи:

- 1.) Ряд експериментальних досліджень, та комп'ютерних моделей, що виконувалися задля встановлення закономірностей в робочих процесах одиничних пальникових модулів, які виникають при спалюванні різних видів палива.
- 2.) Дослідження, для встановлення закономірностей протікання робочих процесів в струменево-нишевих пальникових пристроях, з використанням різних видів палива, та при їх комбінації.
- 3.) Проведено дослідження, для встановлення з закономірностей протікання робочих процесів в струменево-нишевих пальникових пристроях, при спалюванні сумішей різних видів палив та домішок водню.
- 4.) Формування на основі CFD моделювання попередніх характеристики пальникових пристроїв, призначених для спалюванні двох та більше видів палива.
- 5.) Проведення порівняльних аналізів основних характеристик робочих процесів пальникових пристроїв при різних комбінаціях палив, та при спалюванні водневих сумішей з різною концентрацією водню.

Третій розділ дисертації присвячено результатам комп'ютерного моделювання, завдяки якому встановлено діапазони різноманітних конструкційних та режимних параметрів, які необхідно детальніше дослідити в натурних експериментах.

Основауючись на результатах комп'ютерного моделювання розроблено лабораторний стенд, а також ряд експериментальних струменево-нишевих модулів з різною комбінацією конструкційних параметрів (діаметру паливоподавальних отворів, відносного кроку між ними, глибини та ширини ніші і т.д.)

У **четвертому розділі** дисертаційної роботи представлено результати оригінальних експериментальних досліджень, що охоплюють широкий діапазон варіацій ключових параметрів. Вперше отримано емпіричні дані щодо процесів течії, сумішоутворення, теплообміну, стабілізації полум'я та вигорання палива для комбінованих струменево-нишевих пальників. Ці дослідження демонструють можливість ефективного спалювання палив з різними характеристиками без необхідності модифікації конструкції або режиму роботи пальникового пристрою та вогнетехнічного об'єкту.

Вперше виконано порівняльний аналіз характеристик для струменево-нишевих пальникових при роботі на різних видах палива, підібрані оптимальні конструкційні характеристики для ефективної роботи пальникового пристрою при послідовній роботі на різних видах палива.

Знайдено найбільш ефективні режимні і конструкційні параметри струменево-нишевого модуля, для однаково ефективного спалювання як пропан-бутану так і природнього газу. Підтверджено можливість створення модульних пальникових пристроїв у широкому діапазоні потужностей з використанням нових струменево-нишевих модулів.

В **п'ятому розділі** дисертаційної роботи досліджено вплив домішок водню на спалювання різних видів палив в новому комбінованому струменево-нишевому модулі. Обґрунтовано можливість приведення палив з різною калорійністю завдяки домішкам водню. до більш схожого значення коефіцієнту Воббе.

Досліджено вплив домішок водню на процеси горіння та структуру факела,

доведено підвищення реакційної здатності палив, скорочення викидів CO, а також довжини факелу завдяки застосуванню домішок водню.

За результатами дисертаційних досліджень сформовано ряд висновків:

1. Для диверсифікації паливної бази існуючих ВО ефективним інструментом є встановлення пальникові пристрої на основі струменево-нишевої технології спалювання, яка відповідає всім вимогам економічності, екологічної безпеки та надійної роботи ВО.

2. Струменево-нишева технологія дає змогу зручно підбирати конструктивні параметри та параметри робочого процесу, щоб мати змогу працювати на пересіченні ефективних меж (пересічення концентраційних меж та стехіометричних параметрів) двох і більше видів палива.

3. Сформовано підходи до створення комбінованих пальникових пристроїв, здатних спалювати два та більше види палива без втручання в їх конструкційну частину, з загальними трактами та схожими режимними параметрами.

4. Визначено можливості домішок водню до підвищення реакційної здатності пропан-бутану та природного газу, а також до приведення цих двох палив до більш схожих теплофізичних характеристик.

Ключові слова: *пальник, струменево-нишева технологія, вогнетехнічні об'єкти, водень, енергоресурси, експлуатаційні умови, аеродинаміка спалювання, альтернативна енергетика, пропан-бутан, оксиди азоту, 3-D моделювання, ефективність, втомні пошкодження, теплові та термічні навантаження.*

ANNOTATION

Kunyk A.A. Enhancing the efficiency of combustion facilities based on jet-niche technology - Qualification scientific work on the rights of a manuscript.

Dissertation for the degree of Doctor of Philosophy in Specialty 144 "Thermal Power Engineering". – National Technical University of Ukraine "Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute", Kyiv, 2025.

The research was conducted at the Department of Thermal and Alternative Energy of the Educational and Scientific Institute of Nuclear and Thermal Power Engineering, National Technical University of Ukraine "Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute".

Industry and energy sectors face several critical challenges that require prompt solutions. One of these challenges is ensuring the reliable and efficient operation of combustion-related facilities in industrial and municipal enterprises, especially under modern conditions.

A key strategy for enhancing reliability and efficiency is the diversification of the fuel supply. This approach improves the reliability and economic feasibility of technological processes and ensures fuel availability. The ability to temporarily switch to an alternative fuel source can be crucial, particularly in cases of supply disruptions of the primary fuel.

The first chapter of the dissertation examines the current state of various types of combustion-related facilities and their fuel base worldwide and in Ukraine. It analyzes trends in the adoption of new fuel types, issues associated with the use of conventional fuels, and approaches to addressing these challenges. An analytical review of combustion technologies is conducted, and a list of requirements for combustion technologies is formulated to facilitate the implementation of combined and universal burner devices.

From the perspective of burner device design and combustion-related facilities, the study explores the impact of various fuel types on burner operation. The differences

in the physical and chemical properties of these fuels are analyzed, along with potential modifications to burner designs to improve combustion efficiency and reduce harmful emissions. Other significant challenges in organizing efficient combustion are also considered.

Among technologies capable of combusting various fuel types in different aggregate states, jet-niche systems stand out. These technologies and their corresponding burner devices offer numerous advantages, including a wide range of stable combustion and low hydraulic resistance in the oxidizer pathway. The advancement and widespread implementation of these technologies require a deep understanding of the combustion process dynamics under such conditions.

For several decades, the Department of Thermal and Alternative Energy at the Educational and Scientific Institute of Nuclear and Thermal Power Engineering, National Technical University of Ukraine "Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute", has been developing burner devices based on jet-niche technology, characterized by high economic efficiency, environmental safety, and reliability.

One of the primary approaches to fuel diversification examined in this study is the research, development, and implementation of a new type of combined burner devices. These devices enable more efficient combustion of both various types of primary fuels and reserve or emergency fuels, which are already available at most combustion-related facilities.

A key focus is the capability of sequential combustion of natural gas and propane-butane without modifications to the burner design or extensive preparation. Additionally, the study analyzes the use of high-reactivity fuel additives, such as hydrogen, to align different fuels with similar thermophysical characteristics, including the Wobbe index and combustion temperature.

The second chapter presents the methodology and techniques for conducting research in laboratory conditions and at industrial facilities. The designs and testing methods of experimental setups are described, along with an assessment of measurement errors. The research methodology includes:

1. A set of experimental studies and computational models to establish the patterns of combustion processes in single burner modules operating with various fuel types.
2. Investigations into the dynamics of combustion in jet-niche burner devices using different fuels and their combinations.
3. Studies of the combustion process in jet-niche burners when using fuel mixtures with hydrogen additives.
4. Preliminary characterization of burner devices for multi-fuel combustion based on CFD modeling.
5. Comparative analysis of burner operation characteristics under various fuel combinations, including hydrogen-enriched mixtures with different hydrogen concentrations.

The third chapter is dedicated to the results of computational modeling, which identified the ranges of design and operational parameters that require further detailed investigation through physical experiments. Based on these findings, a laboratory test stand was developed, along with a series of experimental jet-niche modules featuring different design parameter combinations (fuel injection hole diameter, relative spacing, niche depth and width, etc.).

The fourth chapter presents, for the first time, a comprehensive set of experimental data on flow dynamics, mixing, heat transfer, flame stabilization, and fuel burnout in single jet-niche burner modules designed for multi-fuel combustion without modifications to the burner or combustion facility.

A comparative analysis of jet-niche burner characteristics for different fuel types was conducted, and optimal design parameters were identified to ensure efficient operation when switching between different fuels. The most effective operational and design parameters for the jet-niche module were determined for the efficient combustion of both propane-butane and natural gas. The feasibility of developing modular burner devices with a wide power range using new jet-niche modules was confirmed.

The fifth chapter examines the influence of hydrogen additives on the combustion of various fuel types in the new combined jet-niche burner module. The study substantiates the potential for adjusting the calorific value of different fuels using hydrogen additives to achieve a more consistent Wobbe index.

The impact of hydrogen additives on combustion dynamics and flame structure was analyzed, demonstrating an increase in fuel reactivity, a reduction in CO emissions, and a decrease in flame length due to hydrogen supplementation.

Based on the dissertation research, the following conclusions were formulated:

1. The implementation of jet-niche combustion burner devices is an effective tool for diversifying the fuel base of existing combustion facilities, meeting economic, environmental, and reliability requirements.
2. Jet-niche technology allows for the flexible selection of design and operational parameters to ensure combustion stability at the intersection of effective concentration and stoichiometric limits for multiple fuel types.
3. A methodology for developing combined burner devices capable of combusting two or more fuel types without structural modifications, featuring common flow paths and similar operational parameters, was established.
4. The potential for hydrogen additives to enhance the reactivity of propane-butane and natural gas was demonstrated, along with the feasibility of aligning their thermophysical properties.

Keywords: burner, jet-niche technology, combustion facilities, hydrogen, energy resources, operating conditions, combustion aerodynamics, alternative energy, propane-butane, nitrogen oxides, 3-D modeling, efficiency, fatigue damage, heat and thermal loads.

Апробація результатів дисертації. Основні положення дисертації опубліковані у статті, що виходили в наукових фахових виданнях України та не тільки:

1. Черноусенко, О., Бутовський Л., Мороз О., Куник А., Хілімончук Д. (2023). Розробка та дослідження дифузійностабілізаторного пальника з нішею. *Вісник Національного технічного університету «ХПІ». Серія: Енергетичні та теплотехнічні процеси й устаткування*, (1-2), 47–54. <https://doi.org/10.20998/2078-774X.2022.01.08> (Дисертантом проведений огляд літератури за темою публікації.)
2. Куник А., Абдулін М., Шляхи створення універсальних та комбінованих пальникових приладів. *Вчені записки ТНУ імені В.І. Вернадського. Серія: Технічні науки* Том 34 (73) № 5 2023 стр. 289-294 <https://doi.org/10.32782/2663-5941/2023.5/44> (Дисертант брав участь у підготовці проектної документації для виготовлення комбінованого пальникового пристрою на основі струменево-нішевої технології, а також брав безпосередню участь у налагоджувальних експериментальних дослідженнях.)
3. Куник А., Абдулін М., Особливості створення одно- та багатопаливних пальникових приладів. *Вчені записки ТНУ імені В.І. Вернадського. Серія: Технічні науки* Том 36 (76) № 4 2024 стр. 1-5 <https://doi.org/10.32782/2663-5941/2024.5.2/01> (Дисертантом виконано оглядову частину публікації, сформульовано постановку задачі та окреслено основні особливості технічного впровадження багатопаливних пальників у промислове використання.)

У статті в періодичних наукових виданнях проіндексованих у базах WoS або Scopus:

4. Куник А., Абдулін М., Сірій О., Ткаченко С., Куник А., Boilers modernization due to energy-ecological improvement technology of burning. *Journal of the Chemical Institutes of the Bulgarian Academy of Sciences and of the Union of Chemists in Bulgaria. Bulgarian Chemical Communications*, Volume 52, Special Issue F (pp. 14-19) 2020 DOI: 10.34049/bcc.52.F.0002 Google Scholar, Scopus (Дисертант опрацював режимні карти водогрійних котлів КВГМ-20.)

За тематикою статті отримано патенти на корисну модель:

5. Абулін М., Фіалко Н., Тимощенко, Куник А., Пальниковий пристрій UA 143503 U, МПК 2020.01, F23Q 13/02 (2006.01), F23D 14/00 *(При підготовці документів на корисну модель використані результати лабораторних досліджень отриманих за участі дисертанта в лабораторії горіння КПІ ім. Ігоря Сікорського.)*

Також матеріали в дисертації були заслухані на міжнародних конференціях та опубліковані в збірках матеріалів:

6. Сірий О., Абдулін М., Куник А., Зріджені газы. Нові можливості. *«Вугільна теплоенергетика: шляхи реконструкції та розвитку»*. Збірка наукових праць: XVI Міжнародної науково-практичної конференції м. Київ, 20-25 жовт. 2020р./ Інститут вугільних енерготехнологій НАН України м. Київ, 2020. С. 142-146.
7. Абдулін М., Куник А., Кобилянська О., Нові види резервного та аварійного палива. *«Проблеми екології і експлуатації об'єктів енергетики»*. Збірник праць: XXIX Міжнародної конференції м. Чорноморськ 10-14 черв. 2019р. / Інститут промислової екології м.Київ, 2020. С. 137-142.
8. Абдулін М., Куник А., Шелешей Т., Взаємозв'язок втрат теплоти з відхідними газами та емісії NO_x в котлоагрегатах. *«Вугільна теплоенергетика: шляхи реконструкції та розвитку»* Збірка наукових праць: XVII Міжнародної науково-практичної конференції м. Київ, 19-20 жовт. 2021р./ Інститут теплоенергетичних технологій НАНУ м.Київ, 2021. С.206-210.
9. Абдулін М., Куник А., Порхун С., Перспективи використання пропан-бутану в якості палива на вогнетехнічних об'єктах. *«Проблеми екології і експлуатації об'єктів енергетики»* Збірник наукових праць: XXX Міжнародної конференції м.Київ, 19-20 лист. 2020р./ Інститут промислової екології, Київ, 2021р. С.50-55.
10. Сірий О., Абдулін М., Куник А., Підвищення реакційної здатності природного газу та пропан-бутану. *«Проблеми екології і експлуатації об'єктів енергетики»* Збірник праць: XXXII Міжнародної конференції м.Київ, 20-21 вер. 2022р./ Інститут промислової екології, Київ, 2023р. С.57-63.

АНОТАЦІЯ.	2
ЗМІСТ.	13
ПЕРЕЛІК УМОВНИХ ПОЗНАЧЕНЬ, СИМВОЛІВ І СКОРОЧЕНЬ.	16
ВСТУП.	19
Розділ 1. Літературний огляд.	25
Розділ. 1.1. Види палива.	25
Розділ 1.2. Вогнетехнічні об'єкти та обладнання.	33
Розділ 1.3. Паливне господарство вогнетехнічних об'єктів.	41
Розділ 1.4. Технології спалювання.	46
Розділ 1.4.1. Робочий процес пальникових пристроїв.	46
Розділ 1.4.2. Вимоги до пальникових пристроїв.	48
Розділ 1.4.3. Струменево-нишева технологія.	51
Розділ 1.5. Реакційна здатність палива.	55
Розділ 1.6 Воднева енергетика. Загальні характеристики.	58
Розділ 1.6.1. Ринок та застосування водню.	60
Розділ 1.6.2. Виробництво водню.	60
Розділ 1.6.3. Зберігання водневого палива.	61
Розділ 1.6.4. Експлуатація.	62
Розділ 1.6.5. Економічний фактор.	62
Розділ 1.6.6. Воднева енергетика в Україні.	63
Розділ 1.6.7. Водень та струменево-нишева технологія.	63
Розділ 1.7. Проблеми енергетики під час надзвичайних ситуацій.	65
Розділ 1.8. Низькокалорійні та низькореакційні види палив. Біогази, звалищні, металургічні, генераторні і т.п. гази.	68
Розділ 1.9. Задачі дисертаційної роботи.	70
Розділ 1.10. Висновки.	70
Розділ 2. Методологія проведення досліджень.	72
Розділ 2.1. Опис фізичної моделі робочого процесу струменево-нишевої системи.	73
Розділ 2.2. CFD моделювання комбінованого пальникового модуля.	75
Розділ 2.3. Лабораторне дослідження пальникового модуля при почерговому комбінованому спалюванні різних видів палива (пропан-бутан та природній газ).	76
Розділ 2.3.1 Експериментальний стенд.	76
Розділ 2.3.2 Методика проведення дослідження та замірюванні значення.	79
Розділ 2.3.3. Методика обробки експериментальних даних.	81

Розділ 2.3.4. Методики та принципові схеми експериментального стенду для дослідження робочого процесу. Опис експериментального стенду	83
Розділ 2.3.5. Методики дослідження сумішоутворення в струменево-нішовому модулі.	83
Розділ 2.4. Розробка промислової моделі пальникового пристрою при почерговому комбінованому спалюванні різних видів палива (пропан-бутан та природній газ).	84
Розділ 2.5. Експериментальний промисловий об'єкт.	85
Розділ 2.5.1. Методика проведення досліджень.	86
Розділ 2.5.2. Методика обробки експериментальних вимірювань еколого-економічних показників роботи вогнетехнічних об'єктів.	87
Розділ 2.6. Дослідження пальникового модулю, при роботі на паливі з домішками водню.	90
Розділ 2.7. Робота з похибками.	92
Розділ 2.7.1. Похибка вимірювання температури повітря.	92
Розділ 2.7.2. Похибка вимірювання атмосферного тиску.	92
Розділ 2.7.3. Похибка визначення витрати палива.	93
Розділ 2.7.4. Похибка вимірювання температури у факелі.	94
Розділ 2.7.5. Похибка вимірювання екологічних характеристик.	95
Розділ 2.7.6. Оцінка похибки вимірювання в експерименті з пальниковим приладом).	96
Розділ 2.7.7. Похибка визначення температури.	96
Розділ 2.8. Висновки до другого розділу.	97
Розділ 3. Тривимірне комп'ютерне моделювання структури течії та сумішоутворення струменево-нішових комбінованих пальникових модулів.	98
Розділ 3.1. Види струменево-нішових модулів. Конструкційні параметри струменево-нишевого пальникового модуля.	98
Розділ 3.2. Режимні параметри роботи пальникового модуля.	100
Розділ 3.3. Створення експериментальної моделі.	103
Розділ 3.4. Результати комп'ютерного моделювання.	110
Розділ 3.5. Висновки до третього розділу.	112
Розділ 4. Дослідження комбінованих струменево-нішових модулів за допомогою натурного експерименту.	115
Розділ 4.1 Експериментальний стенд.	114
Розділ 4.2. Обробка результатів експериментів.	116

Розділ 4.3. Спалювання пропан-бутану за допомогою струменево-нішевого пальникового модуля.	117
Розділ 4.4. Висновки до четвертого розділу.	124
Розділ 5. Дослідження впливу домішок водню на робочий процес горіння в комбінованих струменево-нішових модулів за допомогою натурного експерименту.	125
Розділ 5.1. Експериментальний стенд.	125
Розділ 5.2. Обробка результатів експерименту.	125
Розділ 5.3. Висновки до п'ятого розділу.	134
ВИСНОВКИ.	135
СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ.	138
ДОДАТОК А.	156
ДОДАТОК Б.	158
ДОДАТОК В.	159
ДОДАТОК Г.	160
ДОДАТОК Д.	161

ПЕРЕЛІК УМОВНИХ ПОЗНАЧЕНЬ, СИМВОЛІВ І СКОРОЧЕНЬ

Q_n^p - нижча теплота спалювання палива, КДж/(м³);

F - площа січення повітряного каналу, м²;

δ – товщина пограничного шару;

K_f - коефіцієнт захаращення повітряного тракту;

P - тиск, Па;

ε - інтенсивність турбулентності потоку, %;

α_{33T} – коеф. надлишку повітря в зоні зворотних токів;

W_{OB} – обтічна швидкість струменів, м/с;

W_B – швидкість потоку повітря, м/с;

W_Γ – швидкість струменів газу, м/с;

V – об'єм, м³;

L ϕ - довжина факелу, м;

N Π - потужність пальникового пристрою, МВт

W – швидкість, м/с;

η - повнота згоряння палива;

α - надлишок повітря;

ζ - коефіцієнт аеродинамічного опору;

T - температура, К;

λ - коефіцієнт теплопровідності, Вт/(м·К);

G – витрати природного газу, г/с;

$\alpha \Sigma$ - коефіцієнт надлишку повітря в стурменево-нішовій системі балансний;

L_0 – коефіцієнт стехіометрії;

L - довжина ніші, мм;

H - глибина ніші, мм;

\bar{S} - відносний крок між отворами паливоподачі;

d - діаметр отворів паливоподачі, мм;

L_1 - відстань від зривної кромки до отворів газоподачі;

q - гідродинамічний параметр;

h_c - далекобійність струменю;

Q - кількість теплоти, Дж;

ρ - густина, кг/м³;

$n_{\text{отв}}$ - кількість паливороздавальних отворів в модулі, шт;

Re - критерій Рейнольдса;

g - гравітаційне прискорення, м/с²

n - коефіцієнт масообміну;

ν - коефіцієнт динамічної в'язкості, м²/с;

c_{pm} – середня вагова теплоємність, Дж/кг;

U_H – швидкість поширення полум'я нормальна;

ζ - коефіцієнт гідравлічного опору.

Основні індекси:

П – паливо;

О - окиснювач

Г - природний газ;

ПБ – пропан-бутан

СМ – суміш палива та повітря;

СС – струменева стабілізація факелу;

К – канал повітроподачі;

Основні скорочення:

ПП - пальниковий пристрій;

ВО - вогнетехнічний об'єкт;

Кр – коеф. робочого регулювання;

НТУУ «КПІ» - Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут».

ККД - коефіцієнт корисної дії;

СНС - струменево-нішова система;

СНТ - струменево-нішова технологія;

ЖКГ - житлово-комунальне господарство;

ЗЗТ - зона зворотних токів;

КЗ - камера згоряння;

Вступ

Актуальність теми. У зв'язку з енергетичною та екологічною кризою у світі стрімко зростає зацікавленість у використанні різноманітних видів палива. Вже існує багато вогнетехнічних об'єктів, які можуть працювати на різних видів палива, а також пальникові пристрої, які можуть спалювати різноманітні види палива. Однак, постає питання про можливість використання цих видів палива без попередньої підготовки та зміни конструкції пальникових пристроїв. Ця обставина визначає актуальність моєї роботи, яка полягає в:

- суттєвій економії витрат підприємства на покупку палива, обслуговування паливного господарства і т.д.;
- підвищення загальної надійності вогнетехнічного об'єкту, та виробничої лінії взагалі, за рахунок розширення номенклатури палив на об'єкті;
- поліпшенні логістичних ланцюгів паливостачання;
- підвищення загальної надійності енергосистеми за рахунок диверсифікації ризиків;

Дослідження топкових процесів вогнетехнічних об'єктів розглядаються в роботах таких учених, як Христич Володимир Олександрович, Абдулін Михайло Загретдинович, Сорока Борис Семенович, Сігал Ісаак Якович, Єрінов Анатолій Веремійович, Фіалко Наталія Михайлівна та інші. Проте проблематиці створення комбінованих пальникових пристроїв останнім часом приділяється недостатньо уваги.

Можливість застосування різноманітних видів палива в рамках одного вогнетехнічного об'єкту є очевидно вигідною. Однак, виникає проблема з раціональними затратами на модернізацію та експлуатацію розширеного паливного господарства, що повинно бути економічно вигідним для власників підприємства. Крім цього, досі жодна технологія спалювання не спромоглася спалювати два і більше види палива з однаковою ефективністю.

В дисертаційній роботі розглянуто методи спалювання різноманітних видів палива, що дозволять пальниковому пристрою працювати по черзі на двох чи більше видах палива без необхідності у тривалій підготовці, та зміні в конструкції пристрою між роботою на різних паливах. Крім цього розглядаються способи зменшити різницю між режимними параметрами при роботі на двох видах палива та знизити екологічне навантаження на навколишнє середовище.

Огляд досліджень різних вогнетехнічних об'єктів вказує на важливість розвитку та впровадження комбінованих пальників на більшість з них. Дослідження паливної бази, робочого процесу пальникових пристроїв, а також досвіду застосування домішок водню свідчить, що одним з потенційних методів створення універсальних пальникових пристроїв є використання високореактивних палив, таких як амоній чи водень, які дозволяють розбавляти інші види палива для регулювання їх коефіцієнтів Воббе, теплоти згорання, реакційної здатності, тощо.

Цей метод також сприяє покращенню процесу горіння в цілому, оскільки високореакційні палива допомагають допалювати залишки незгорівшого низькорекційного палива на межах факела, тим самим зменшуючи недопал. Крім того, це може призвести до покращення екологічних показників горіння, оскільки недопал часто призводить до збільшення емісії шкідливих речовин.

Зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами. Дисертаційна робота виконувалась відповідно до Закону України «Про енергозбереження», затвердженого Постановою Верховної Ради України № 74 \ 94 01.07.1994 р.; «Основних положень енергетичної стратегії України на період до 2030 р.», прийнятих Кабінетом Міністрів України 15.03.2006 р. Робота є складовою досліджень, проведених в рамках виконання держбюджетних науково-дослідних робіт 4.01 «Розробка методів та засобів підвищення ефективності обладнання теплових електростанцій та газотурбінних установок», Д/р № 0116U005215 (2016 – 2020 рр.).

Мета і завдання дослідження. Мета дослідження полягає у формуванні методів підвищення ефективності різних промислових та енергетичних об'єктів за допомогою встановлення комбінованих струменево-нішових пальникових пристроїв. В процесі аналізу літературних джерел було виявлено два основних підходи до створення комбінованих струменево-нішових пальникових пристроїв:

а) Приведення параметрів робочого процесу горіння та конструкційних характеристик пальникового пристрою до таких значень, що знаходяться на перетині ефективності роботи на двох різних видах палива.

б) Використання різної кількості домішок високоактивних палив, таких як водень або амоній, для досягнення необхідних характеристик суміші палив та підвищення ефективності процесів горіння за рахунок підвищеної реакційної здатності.

Об'єкт дослідження:

- *Робочі процеси в пальникових пристроях;*
- *Організація топкового процесу вогнетехнічних об'єктів при роботі на різних видах палива;*
- *Паливні господарства різних видів вогнетехнічних об'єктів.*

Предмет дослідження:

- *Закономірності процесів роздачі палива, сумішоутворення, якості вигорання та стійкості горіння при почерговій роботі пальникового пристрою на різних видах палива;*
- *Закономірності елементів робочого процесу універсальних пальникових пристроїв змодельованих за різними підходами;*

Методи дослідження. Вирішення поставлених задач було досягнуто завдяки комп'ютерному моделюванню гідродинамічних процесів в пальникових модулях, а саме – якості сумішоутворення, турбулентності потоку то утворень

зон зворотних потоків. Це дозволило підібрати необхідні для проведення дослідів проблем на лабораторних стендах параметри. А досліди в промислових умовах допомогли верифікувати отримані дані.

Достовірність отриманих даних на всіх етапах порівнювалася між собою та окремо враховувалися похиби. Обробка та узагальнення експериментальних, чисельних та промислових результатів проводилася за допомогою відповідного програмного забезпечення.

Наукова новизна отриманих результатів.

1. Вперше за допомогою отриманих даних експериментальних досліджень визначено діапазони основних конструкційних, та режимних параметрів, комбінованих струменево-нішових пальникових модулів (при роботі на пропан-бутані та природному газі), що забезпечують необхідну структуру течії, якість сумішоутворення, теплопереносу, стабілізації полум'я і повноту вигорання палива в зоні стабілізації горіння.
2. Вперше реалізовано спалювання пропан-бутану та природного газу на комбінованих струменево-нишевих пальникових пристроїв нового типу без необхідності у внесенні змін в конструкцію пальника чи в режим;
3. Проведено дослідження впливу масової частки водню (до 50%) в паливній суміші струменево-нишевого комбінованого пальникового модуля, на підвищення реакційної здатності, а також зменшення числа Воббе;
4. На основі комбінованих струменево-нишевих модулів, створено модельний ряд пальникових пристроїв. Такі пальникові пристроїв забезпечують вищий коефіцієнт робочого регулювання (більше 6), коротший факел (на 5-10% при однакових умовах) та здатні пускатися при нижчому тиску палива (в 3-4 рази) в порівнянні з іншими моделями комбінованих пальникових пристроїв, а також забезпечують стабільне горіння при наднизьких значеннях коефіцієнту надлишку повітря ($\alpha \sim 1,02$).

5. Ведуться роботи по встановленню вищезгаданого пальникового пристрою на промисловому об'єкті, для верифікації даних отриманих з дослідження на більш широкому проміжку часу.

Практичне значення одержаних результатів

1. У результаті проведення досліджень на експериментальних стендах та застосування комп'ютерного моделювання створено та успішно випробувано в лабораторних умовах ПП нового типу з конструкційними параметрами, що ефективно дозволяють спалювати паливо з домішками водню. Створений ПП на основі струменево-нішової технології дає можливість удосконалити організацію топкового процесу в різних вогнетехнічних об'єктах.

2. На основі досліджень особливостей комбінованого струменево-нишевого пальника розроблено промислові ПП необхідної потужності для вирішення існуючих проблем в ряді існуючих вогнетехнічних об'єктів різних видів .

3. Розроблений ПП був задіяний при проведенні модернізації газифікаторної установки в м. Калуш.

4. Розроблено та передано документацію в ТОВ «НВК»СНТ» щодо використання комбінованих струменево-нишевих модулів.

5. ТОВ «НВК»СНТ» високо оцінило результати роботи і прийняло їх для подальшого впровадження в різних сферах своєї діяльності.

Особистий внесок здобувача. Усі дані, що стосуються дисертаційної роботи, були зібрані та оброблені здобувачем особисто. Це включало проведення аналізу та обробку експериментальних даних, зокрема щодо струменево-нишевих пальників різних типів. Також здобувач самостійно розробив конструкції універсальних пальників та модулів різних типів.

Усі аспекти, пов'язані з плануванням експериментів, обробкою отриманих результатів та аналізом даних, були виконані здобувачем особисто. Автор брав безпосередню участь у лабораторних випробуваннях, здійснюючи заміри всіх

необхідних параметрів для аналізу кількості та якості продуктів згоряння досліджуваних об'єктів. Всі розрахунки також були виконані автором самостійно.

Аналіз результатів експериментальних досліджень, їх узагальнення та промислові випробування універсальних пальникових пристроїв з врахуванням отриманих результатів дисертації були проведені за безпосередньої участі здобувача.

Апробація результатів дисертації Основні положення дисертації заслуговувались та обговорювались на: XVI та XVII Міжнародних науково-практичних конференціях «Вугільна теплоенергетика: шляхи реконструкції та розвитку» та XXX, XXI, XXII Міжнародних конференцій «Проблеми екології та експлуатації об'єктів енергетики»

Робота складається зі вступу, п'ятих розділів, висновків, списку використаних джерел. Обсяг роботи становить 161 сторінку, у тому числі список використаних джерел з 74 найменувань на 8 сторінках.

Розділ 1. ЛІТЕРАТУРНИЙ ОГЛЯД.

1.1. Види палива.

На сьогоднішній день перед промисловістю, зокрема перед енергетикою, стоїть безліч завдань, що потребують негайного вирішення. Однією з таких нагальних проблем є дослідження та впровадження нових видів палива. Історично кожний етап розвитку людства супроводжувався впровадженням нових джерел енергії. Вугілля витіснило деревину, нафта та газ прийшли на вугілля, а ядерна енергія почала поступово замінювати нафту та газ.

Кожне відкриття та застосування нового виду палива багатократно збільшувало потенціал людства. Проте навіть коли людство освоювало нові джерела енергії, через десятки або сотні років їх використання виявлялося недостатнім для задоволення потреб промисловості. [1]

Промисловість розвивалася надзвичайно швидкими темпами. Під час Індустріальної революції використання парових двигунів з вугіллям, в якості палива дозволило значно збільшити виробництво благ, освоїти нові технології та території. Проте з часом родовища вугілля вичерпувалися, а забруднення атмосфери ставало все більш помітним. Через кілька століть робота у вугільних шахтах стала надзвичайно тяжкою та небезпечною. Метод відкритого видобутку вугілля виявився непрактичним, і довелося перейти на підземний видобуток. Заходячи все глибше, ціна на вугілля зростала, а проблеми з екологічним забрудненням навколишнього середовища набували все більшого значення. [1]

Так, у 1952 році Лондон, один із економічних центрів Європи і столиця Британської імперії, став свідком густого смогу, який спричинив серйозні проблеми. Протягом п'яти днів більше ста тисяч людей захворіли внаслідок цього смогу, а десятки тисяч загинули. (див. рис. 1.1) [2]



Рисунок 1.1. Великий смог. Великобританія, Лондон 1952.

Цей факт спонукав Британію закрити частину вугільних шахт, прийняти більш сурові екологічні закони та розпочати шукати альтернативи. На той момент найочевиднішою заміною став природний газ [2]. Сьогодні природний газ – одне з основних палив, але історично його можна назвати відносно нещодавнім надбанням. Історія вказує, що люди замітили вихід з надр природного газу на Кавказі та в Середній Азії ще в 6000 році до н.е. (див. рис. 1.2) проте лише в середині XIX століття природний газ почали використовувати в побуті. Більш-менше широке використання в промисловості розпочалось лише в 30их роках XX століття. [1]

Використання газу як палива дозволило скоротити працезатрати в промисловості, адже зникла необхідність в більшості процесів підготовки, подрібнення, розморожування, значно спростилося зберігання палива і т.д. [3]



Рисунок 1.2. Природний вихід газу з надр Землі.

Застосування природного газу (і паралельний розвиток електроніки) значно полегшило процес автоматизації технологічних процесів в енергетиці та промисловості. Вогнетехнічний об'єкт що працює на природному газі піддається автоматизації в куди більшій степені та значно легше, чим той де використовують вугілля чи мазут і т.д., так як немає потреби контролювати процеси поставки, перевертання вагонів, розмерзання, подрібнення, розмішування пиловугільної суміші. В той час, як використання газоподібних палив забезпечує стабільну подачу трубопроводом зі сталим тиском, консистенцією, теплотою згорання і т.д., що значно зменшує кількість змінних, якими нам потрібно управляти і по суті весь процес управління до відношення температури і витрати палива.

Адже для того, щоб автоматизувати середньостатистичний котел, необхідні лише засоби зняття показників (датчики, витратоміри, манометри, датчик полум'я), регулююча арматура (клапани та засувки на колектор та на пальники), механізм управління тягодуттьєвих пристроїв та щит управління, який би об'єднував всі ці механізми в одну систему. [4]

Про перевагу газу над іншими викопними видами палива, свідчить те, що саме з ним в якості палива реалізуються одні з найбільш високотехнологічних систем, як наприклад - цикли з парогазовою установкою, газотурбінною установкою, магнітогідродинамічним генератором.

Згідно статистики, останнім часом, надзвичайно стрімко зростає населення Землі (не в останню чергу завдяки відкриттю видів нових палив, що стимулювали технічний прогрес), в 1950их коли почали широко використовувати природний газ населення планети складало близько 2,5 млрд., сьогодні вже близько 8 млрд. Окрім цього значно виросла і якість життя, люди в середньому почали споживати куди більше благ, що означає посилене навантаження на промисловість. І хоча викиди при використанні газу і не настільки критичні як при використанні вугілля, мазуту чи дров, але все ще помітні особливо на фоні багатократного збільшення промислових потужностей.

Незважаючи на те, що родовища газу набагато більші чим очікувані, (якщо читати літературу випущену за останні сто років, то можна помітити прогнози, що газ/вугілля/нафта закінчиться через 50/100/200 років, але як ми бачимо, прогнозовані запаси навпаки зростають, в основному за рахунок відкриття нових родовищ та нових технологій по їх видобутку[5]), хоча при цьому ціна на них стрімко зростає.

Ці причини заставили людство не стояти на місці і звернути увагу на інші джерела енергії. Вже в 1950их людство знайшло здавалось би майже безкінечну ядерну енергію. В рекордні темпи були написані теоретичні роботи, проведені експерименти, побудовані реактори, а згодом і перші електростанції. За що дуже швидко людство поплатилось, як Холодною війною, так і рядом екологічних катастроф. Три Майл-Айленд, Чорнобиль (див.рис.1.3), Фукусіма всього за 50 років заставили частину держав повністю відмовитись від ядерної енергетики, а іншу частину зупинити будівництво нових об'єктів. [6]



Рисунок 1.3. Наслідки Чорнобильської катастрофи.

Це не заважає іншим країнам розвивати свої ядерні електростанції добудовувати нові енергоблоки а то і нові електростанції. Хоча вже понад десятиріччя не відбувалося яких-небудь значних аварій на АЕС, залишається вагома проблема утилізації ядерних відходів, зараженого обладнання, та консервації самих станцій і хоча вже існують технології, які дозволяли би повторно використовувати відпрацьоване ядерне паливо.

Станом на сьогодні звертається увага на куди більш безпечні джерела енергії. Енергія вітру, сонця, води, термічна енергії магматичних пластів землі і т.д. Але й в них є ряд своїх мінусів. Енергія води далеко не безкінечна і ще до початку ХХІ століття гідроелектростанціями були повністю забудовані найбільш придатні річки, що значно нашкодило їх екосистемі. Сонячна енергія та енергія вітру потребують для своїх потреб надзвичайно великі площі землі (див.рис.1.4.), а з кожним роком у зв'язку з постійним зростанням населення, вільного простору стає все менше.

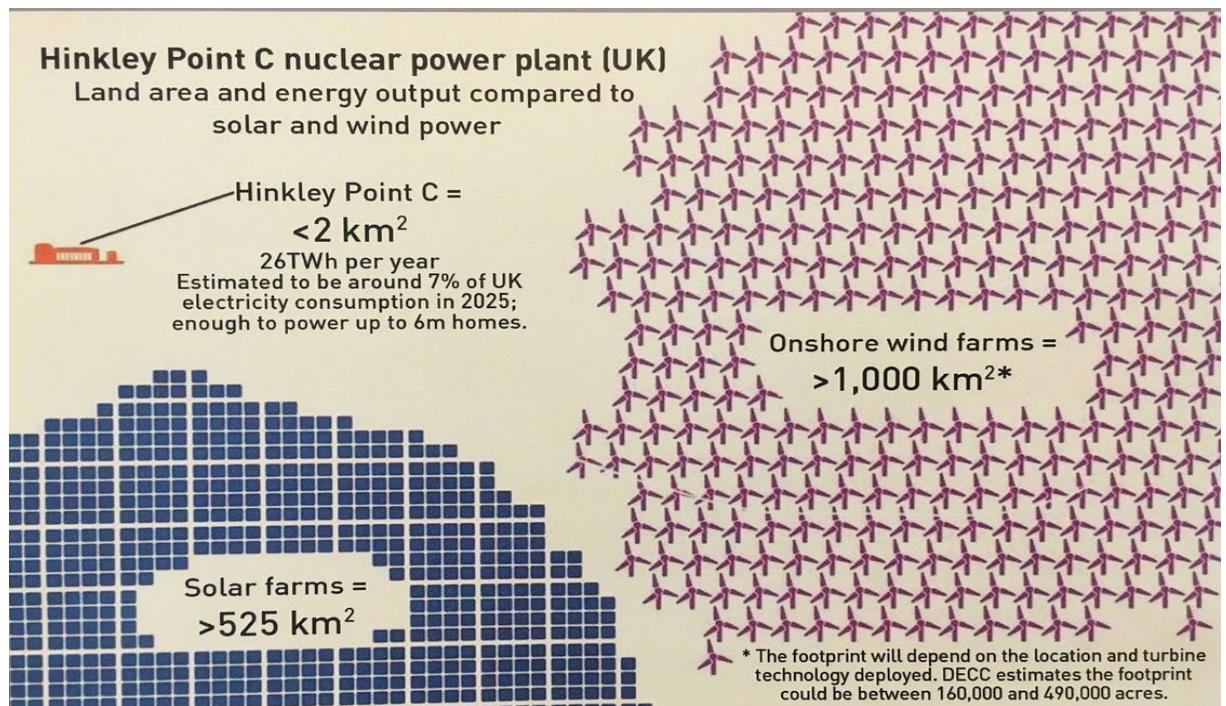


Рисунок 1.4. Порівняння площі, що займають СЕС, ВЕС та АЕС.

На зображенні 1.4. показано атомну електростанцію «Hinkley point C», що знаходиться графстві Сомерсет, Велика Британія. Встановлена потужність такої електростанції – 3200 МВт, згідно даних в рік вона забезпечує Велику Британію 26 ТВт електроенергії, що складає 7% від всього електроспоживання Великої Британії. А по площі же, займає територію менше 2 кв. км. Для того, щоб отримати 26 ТВт електроенергії в рік за допомогою СЕС, що працюють за принципом фотоефекту, необхідно понад 525 кв. км, це більше чим територія всього правобережного Києва (502 кв. км). При використанні морських ВЕС необхідна буде площа більш ніж в 1000 кв.км. (в залежності від місця встановлення і т.д. площа варіюється від 650 кв.км до 2000 кв.км)[7]. А це 3% всієї площі Азовського моря. При цьому ефективно встановлювати морські ВЕС вигідно далеко не всюди.

«Зелена» енергетика по факту виявилася не настільки вже й екологічно чистою, проводиться багато розрахунків, де видно, що відношення емісії шкідливих речовин до кіловата отриманої енергії у СЕС та ВЕС найменші серед всіх електрогенеруючих станцій. Але такі розрахунки не враховують те

забруднення, що відбувається до побудови станції, та після її закриття. Виготовлення електричних батарей, без яких використання індивідуальних сонячних панелей майже неможливе, значно забруднюють навколишнє середовище кобальтом під час свого виготовлення та після утилізації. Приблизно така ж сама ситуація і з лопатями вітрогенераторів, їх майже не переробляють[8], тому згодом біля ВЕС з'являються могильники де закопані сотні лопатей, що відпрацювали свій ресурс. Екологічні організації гостро реагують на проблему захоронення ядерного палива, а ось на захоронення електроніки, батарей а також як не дивно - лопатей вітряків, які рідко переробляються, звертають мало уваги[10]. Крім цього, тварини, комахи та птахи, які масово покидають місця розташування вітряків дають нам зрозуміти, що забруднення це не лише мікрочастинки в повітрі чи відходи, а в тій же мірі - вібрації та шум. [11,12]

Станом на сьогодні, не дивлячись на гігантські інвестиції альтернативні види енергетики виробляють лише невелику кількість енергії [9]. Проте не варто робити неправильних висновків, як те, що всі вище вказані види палива шкідливі, чи що потрібно кидати всі ресурси на відкриття нових видів палива, чи навпаки, якщо всі існуючі палива мають значні мінуси, значить, що «ідеального» палива не існує. Людству, варто й далі вести інтенсивну роботу над дослідженням нових видів палива, як газогідрати (див.рис.1.5) чи енергія термоядерного синтезу (див.рис.1.6). [13,14]



Рисунок 1.5. Газогідрати.



Рисунок 1.6. Термоядерний реактор.

Але, враховуючи обмеженість ресурсів, не можна ігнорувати навіть настільки примітивні види палива, як деревина чи вугілля, а потрібно намагатися знайти для них сфери застосування, в яких ефективність їх використання була б максимальною. Тому поки людство знаходимося в пошуках нових видів палива, потрібно використовувати не тільки традиційні види палива, але й ті, що на даний момент рідко використовуються.

Тобто диверсифікувати паливне господарство. Є сфери де наприклад вугілля не вигідно замінити ні газом, ні ядерним паливом, наприклад – металургія чи КЕС. Є й ті сфери де безумовно лідирує газ – колективне тепло та водопостачання, побутові прилади. Чи ядерна енергія в якості базових електрогенеруючих потужностей. Не варто поки намагатися яке небудь з цих палив повністю замінити на інше.

Зручно, мати змогу ефективно використовувати на одному об'єкті декілька видів палива. Наприклад газ на підприємствах, що традиційно використовують вугілля, в районах де бувають перебої з його постачанням. Чи доменний/конвертерний газ в деяких процесах на металургічних підприємствах. Або пропан-бутан в разі подорожчання/скорочення поставок газу.

Звісно уже сьогодні електростанція може працювати на вугіллі, зимою на природному газі, а у випадку аварії на мазуті. Але зараз при переходах з одного палива на інше, значно страждає ефективність технологічних процесів, адже на сьогодні практика полягає в тому, що всі процеси налаштовані на максимально ефективного використання основного палива, а про ефективність резервного та аварійного палива думають в останню чергу. Ключом до диверсифікації паливної бази є створення комбінованої (універсальної) технології спалювання (див.рис.1.7), та пальникового пристрою[15], який без значних конструктивних змін зміг би спалювати два і більше види палива з майже однаковою ефективністю.



Рисунок 1.7. Газо-мазутний пальник. Один з найбільш поширених видів комбінованих пальників.

1.2. Вогнетехнічні об'єкти та обладнання.

Першим кроком до диверсифікації паливної бази, і розширення номенклатури видів палива в промисловості та енергетиці є використання «нестандартних» видів палива в якості резервного та аварійного палива.

Для уникнення асоціації з терміном «альтернативні», що у більшості випадків вживається тільки у відношенні відновлювальних видів енергії, ми вводимо термін «нестандартні». Під нестандартними видами палива маються на увазі ті види палива які не можна вважати традиційними чи основними (взагалі, або для конкретного виду ВО).

На мою думку, розпочинати широке використання таких видів палива, варто саме в якості аварійних та резервних з наступних причин:

1. Резервне та аварійне паливо менш критичні для функціонування вогнетехнічного об'єкту, чим основне, тому їх впровадженню можна проводити з меншими ризиками для функціонування об'єкту.
2. Таким чином заодно можна дослідити використання універсальної технології для спалювання декількох видів палива за допомогою одного пальникового пристрою без внесення конструктивних змін.
3. Часто, в якості резервного/аварійного палива використовують менш ефективні/екологічно безпечні види палива (наприклад мазут), тому їх модернізація буде мати відносно більш помітний ефект.
4. Резервні та аварійні види палива на даний момент потребують організації кошто- та праце- затратних паливних господарств. А використання деяких нестандартних видів палива прогнозовано може значно зменшити об'єм палива яке буде необхідно зберігати, або полегшити його транспортування і т.д.
5. Багато видів нестандартних палив легко транспортуються, або можуть бути виготовлені безпосередньо на території підприємства.
6. У зв'язку з невеликою масштабованістю виробництва, ціни на більшість нестандартних видів палива недостатньо низькі (тому, що в зв'язку з їх невеликою популярністю ринок та виробництво таких палив не розвинуті, а значить і ціни поки-що завищені), щоб їх на даний момент було вигідно використовувати в якості основного палива.

Існує поширена помилка судження, що аварійне та резервне паливо необхідне лише на великих електростанціях та теплоелектроцентралях. Передусім це зв'язано з тим, що найчастіше резервне та аварійне паливо згадується в нормативних документах, що підносяться саме до котлоагрегатів, як наприклад (ДБН В.2.5-77:2014 «Котельні»[16], СНіП II-35-76 «Котельні

установки»[17]). Але це не означає, що інші вогнетехнічні об'єкти не потребують резервного та аварійного палива.

Резервне чи аварійне паливо необхідно використовувати у разі обмеження або припинення постачання основного палива, чи неможливості його спалювання. Різниця між ними лише в тому, що резервне паливо призначене для більш-менш передбачуваних ситуацій (наприклад, зимою важко розморозити основне паливо - вугілля, тому використовують газ і т.д., чи навпаки після закінчення опалювального сезону необхідно розпочати закачування газу до сховищ, але в наявності є вугілля), а аварійне – для непередбачуваних ситуацій (як наприклад катастрофа на транспортному газопроводі, яка унеможливило постачання газу, чи поїзд, що перевозить вугілля зійшов з рейок і зробив неможливим постачання вугілля).

З цього визначення зрозуміло, що не лише котельні/електростанції потужністю більше 25 Гкал потребують резервного та аварійного паливного господарства (як це вказано в нормативних документах)[16]. Тому, краще передбачити резервне та аварійне паливо на котельних малої та середньої потужності (особливо на тих, що забезпечують опалення в зимовий час), на об'єктах металургічної промисловості, промислових печах, сушарках і т.д.

На даному етапі, важливо розуміти, яке саме обладнання необхідно розглядати. Тому розглянемо різні види вогнетехнічного обладнання (ВО), та їх резервні та аварійні паливні господарства.

До ВО відносяться: котли, печі, сушарки, підігрівачі, камери згорання. Котел (рис.1.4) – ВО призначений для генерації чи підігріву води методом спалювання органічного палива (рідше за допомогою електроенергії). Використовуються для забезпечення гарячою водою, технологічним паром чи для подачі пари на турбіну для виробництва електроенергії. Являється, напевне найпоширенішим видом ВО.



Рис.1.8 Види котлів а.) KBGM-30

б.) PTBM-50

Важливо знати, що на даний момент існує надзвичайна велика кількість різних видів котлоагрегатів (див.рис.1.8). Також потрібно розуміти, що самих котлів в країні існує надзвичайно багато, лише в тепловому господарстві країни знаходиться більше 100 тисяч котлів, а скільки їх ще у власності підприємств, на території житлових комплексів і т.д.

Котли розподіляють:[18]

1. За видом енергоносія на:
 - Твердопаливні (пелетні, дерев'яні, вугільні)
 - Рідкопаливні (дизель, мазут)
 - Газові
 - Електричні
 - Комбіновані
2. За типом теплоносія:
 - Водогрійні
 - Парові
3. За типом переміщення теплоносія:
 - Жаротрубні
 - Водотрубні
 - Комбіновані
4. За потужністю

- Побутові (до 4кВт)
- Малопотужні (від 4 до 65кВт)
- Середньої потужності (від 65 до 1750 кВт)
- Великої потужності (від 1,8 МВт)

5. За видом пальника

- З атмосферним пальником
- З примусовою подачею палива

Парові котли додатково класифікують за тиском пари:

- Низького тиску – до 1 МПа;
- Середнього тиску от 1 до 10 МПа;
- Високого тиску – 14 МПа;
- Надвисокого тиску – 18-20 МПа;
- Надкритичного тиску – 22,5 МПа и вище.

Піч[19] (див. рис.1.9) – споруди для теплової обробки матеріалів у будь-якому технологічному процесі (плавка, обпалення кераміки, випікання або при дослідженні матеріалу (наприклад вологості, зольності), які називають «Печі». В промисловості використовуються наступні види печей :

1. Доменна – шахтна піч для виплавки чавуну з залізрудних матеріалів.
2. Піч кип'ячого слою – піч в якій порошкоподібний, зернистий (гранульований) матеріал взаємодіє з газовим потоком у підвішеному стані «кипить». Відрізняється високою інтенсивністю тепломасообміну.
3. Обертова піч – трубчаста, барабанна або циліндричної форми піч з обертливим рухом навкруг повздожньої осі, призначена для нагріву матеріалів з ціллю їх фізико-хімічної обробки.[20]
4. Плавильна піч – піч для перетворення якого-небудь матеріалу в рідкий стан нагрівом його до температури, що перевищує температури плавлення. Використовується в виробництві сталі чавуну, сталі, кольорових металів.

5. Автогенні печі використовують принцип автогенного спалювання, де тепло, необхідне для процесу, виробляється за рахунок екзотермічних реакцій окиснення елементів, що містяться в оброблюваному матеріалі.
6. Мартенівська піч – полум'яна регенеративна піч для виготовлення сталі з чавуну і металевого лому.[20]
7. Електричні печі.[21]

Окрім металургічної та хімічної промисловості печі широко застосовуються і в харчовій промисловості. Кожен хлібобулочний, кондитерський і т.д. завод обладнано промисловою пічкою, в таких печах, підтримка сталого технічного процесу напевне, ще важливіша, а необхідність часто працювати на значно нижчих температурах, робить підтримку таких процесів значно важчою.



а.)



б.)



в.)



г.)

Рисунок. 1.9 Види печей: а.) доменна, б.) кип'ячого слою, в.) обертова, г.) мартенівська.

Сушарка – установка для видалення рідини з твердих чи рідких речовин та їх сумішей. Як і печі, застосовуються у великій кількості різних галузей. Область застосування сушарок, надзвичайно широка, їх використовують для висушування зерна, бурякового жому, та для зниження вологості руди чи вугілля. Тобто передусім в ключових сферах для України – аграрній, харчовій та металургічній та інших.

Камера згорання — це пристрій із замкненим об’ємом, у якому внаслідок згорання пального відбувається значне підвищення температури робочого тіла. Залежно від режиму роботи камери згорання поділяють на:

- періодичної дії – використовуються в поршневих двигунах внутрішнього згорання (ДВЗ) та пульсуючих повітряно-реактивних двигунах;
- безперервної дії – застосовуються в газотурбінних, турбореактивних і рідинних ракетних двигунах.

Камера згорання безперервної дії [22] є критично важливим елементом сучасних енергетичних і транспортних технологій. Вона використовується в авіаційних і космічних двигунах, а також у газотурбінних установках (ГТУ), що знаходять застосування в енергетичній галузі, промисловості та транспорті. Камери цього типу активно використовуються в енергетичних системах, хімічному виробництві, залізничному і водному транспорті (як морському, так і річковому), а також у сфері авіації та космонавтики.

Розробка та модернізація камер згорання є надзвичайно важливою, як для енергетики так і для військово-промислового комплексу. В космічній індустрії поступово відказуються від хімічних двигунів (звісно в першій ступені такі двигуни незамінні і там вони незамінні) і поступово переходять на ядерні, електричні, іонні чи гіпотетичні фотонні. Тим часом в ракетах військового призначення камери згорання (див.рис.1.10) розвиваються, і з кожним роком летять все швидше, далше і з більшим корисним навантаженням, передусім за рахунок модернізації камер згорання.

Також важливим фактором являється те, що ракети повинні бути маневреними і не тільки міняти траєкторію, але при цьому й різко скидати чи набирати швидкість.



Рисунок 1.10. Камера згорання.

Як вказано вище, далеко не всі ці об'єкти мають необхідне аварійне або резервне паливне господарство. Звісно, організація резервного та аварійного паливного господарства є досить затратною, тому виникають питання чи дійсно воно необхідно. Тому, для відповіді на це запитання можна розглянути наступні ситуації:

- 1.) Припинилася подача палива на промислову зерносушарку. В результаті порушено технологічний процес приготування зерна. А згодом він і зовсім зупинився. Більшу частину зерна було утилізовано в зв'язку з його непридатністю.
- 2.) В зв'язку з проблемами на газопроводі, промислова кулінарна піч залишилася без палива на декілька днів. Всі заготовки та тісто були зіпсовані. Фабрика пропрацювала декілька днів в збиток.
- 3.) На металургічну піч, що випікав сталь припинилась подача палива. В результаті заготовка застигла в печі. Піч повністю виведена з ладу і відновленню не підлягає, а також тепер потребує повного демонтажу.

Іншій частині ВО резервне або аварійне паливо дійсно не завжди потрібне. Наприклад на ГТУ що встановлені на кораблях чи літаках. В зв'язку з їх

специфікою на них звісно передбачене додаткове паливо, але його не можна назвати повноцінним аварійним чи резервним паливним господарством.

Інший приклад - свічки допалювання металургічних чи хімічних заводів, вони також підпадають під категорію – вогнетехнічне обладнання, але не потребує резервного чи аварійного паливного господарства (потрібно невеликі запаси, але не повноцінне господарство), адже по суті в якості палива використовується саме газ/рідина, утилізації яких і являється головною задачею такої свічі (в свічі застосовується і звичайне паливо, для розпалу та підтримання факелу).

Кожен підприємець/директор заводу після того, як відбулась така ситуація набагато серйозніше віднісся би організації резервного та аварійного паливного господарства. Але нажаль наразі навіть там де наявність такого господарства передбачена нормативними документами, таке хазяйство часто не лише не модернізується, але й не реставрується й приходить в непридатність.

Саме тому варто звернути увагу на нестандартні види резервного та аварійного палива.[23] Адже наприклад пропан-бутан хоча й дещо дорожчий за газ чи вугілля, але у випадку застосування його в якості резервного чи аварійного палива, дозволяє відчутно зекономити на паливному господарстві. Особливо враховуючи, що ціни на різні види палива різко змінюються залежно від тих чи інших подій на ринку чи в світі, тому завдяки свободі вибору палива, можна накопичувати певний вид палива, по нижчій ціні, а використовувати, при високій, чи взагалі на час відмовлятися від певного виду палива, доки ціна на нього не вернеться на нормальний рівень.

Крім того у зв'язку з тим, що на нафтопереробних заводах постійно бажають збільшити кількість бензину з бареля нафти, то все більшу і більше масову часту мазуту складають, парафіни, асфальтени та інші баласты.

1.3. Паливне господарство вогнетехнічних об'єктів

Використання нестандартних видів палива може дозволити значно зекономити на паливному господарстві. Паливне господарство – комплекс технологічно пов'язаних приладів, обладнання, механізмів та споруд і резервуарів, що забезпечують прийом палива, його зберігання, підготовку та транспортування всередині промислового об'єкту. Структура, схема та технологія в паливних господарствах відрізняються в залежності від видів палива і приймає наступний вид.

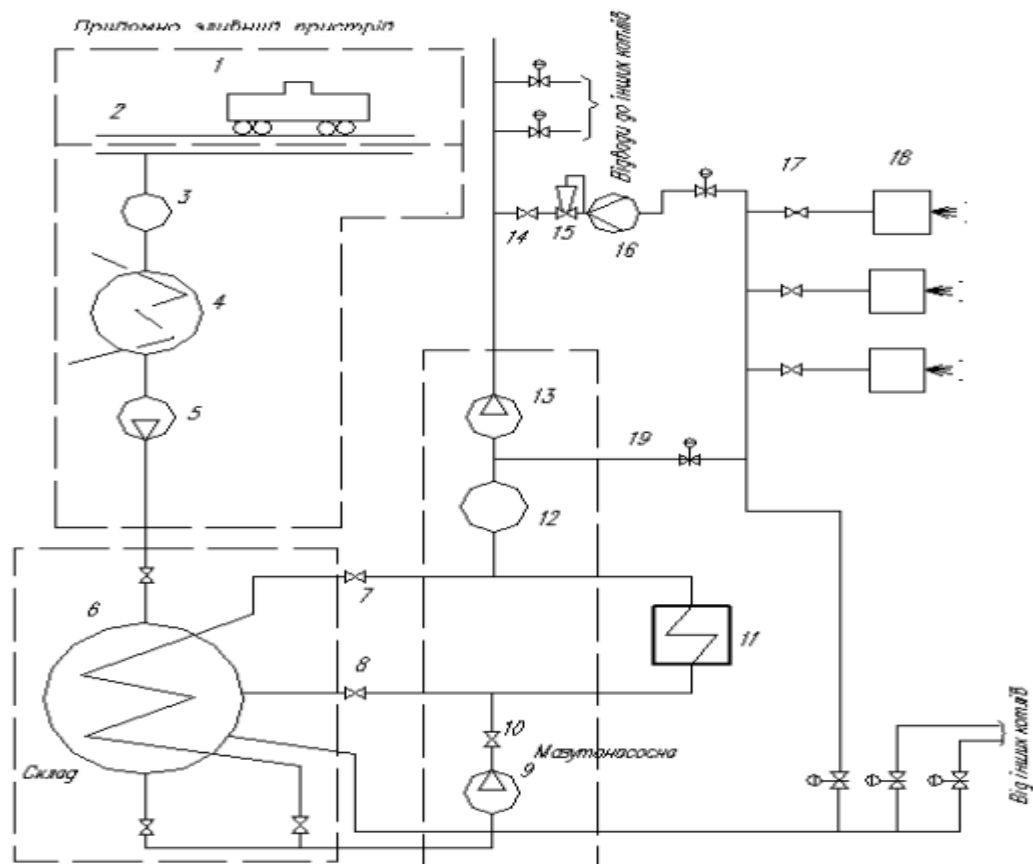


Рисунок 1.11. Технологічна схема мазутного господарства КЕС: 1 – цистерна; 2 – зливний пристрій; 3 – фільтр грубої очистки; 4 – прийомний резервуар; 5 – перекачувальний насос; 6 – основний резервуар; 7, 8, 19 – лінії рециркуляції мазуту; 9 – насос першого підйому; 10 – зворотний клапан; 11 – підігрівач мазуту; 12 – фільтр тонкої очистки; 13 – насос другого підйому; 14 – запірні засувки; 15 – регулятор витрати; 16 – витратомір; 17 – засувка; 18 – форсунка котла.

Одним з найбільш поширених видів резервного палива на сьогодні є мазут, а отже й резервне та аварійне паливне мазутне господарство зустрічається часто. Має воно наступний вигляд (див.рис.1.11.): [24]

Можна замітити, що схема досить складна, включає в себе велику кількість насосів, що означає великі затрати електроенергії (а якщо згадати наскільки в'язкий мазут, то зрозуміло, що насоси будуть доволі потужні). Також присутні зразу декілька систем фільтрації, а фільтри час від часу потрібно обслуговувати й замінювати.

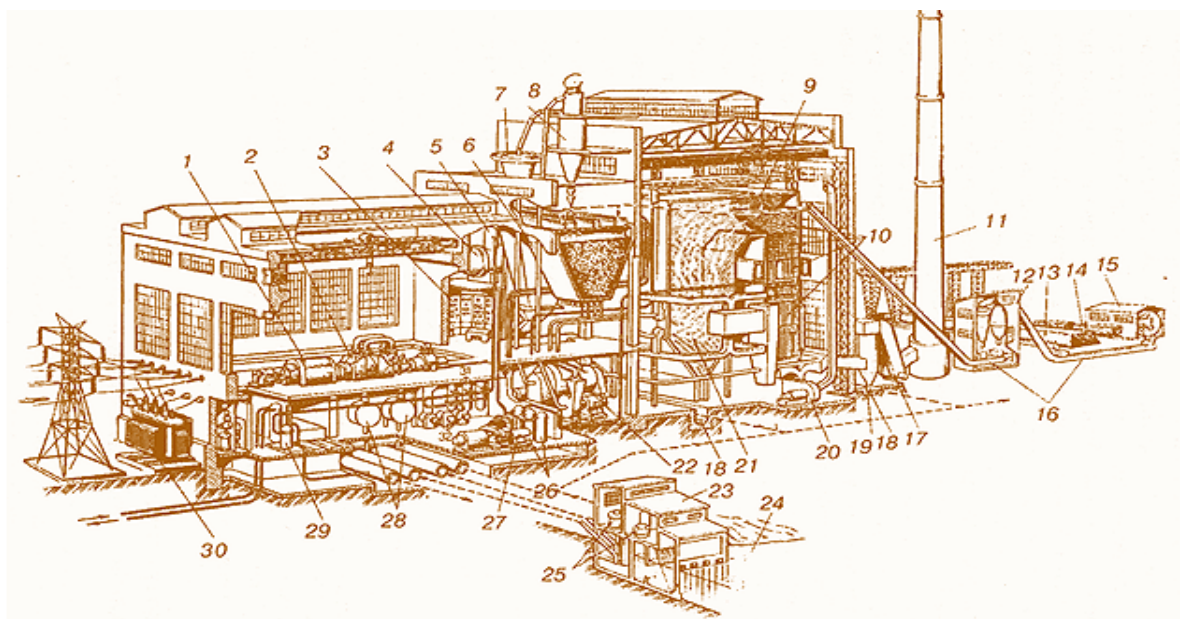


Рисунок 1.12 Схема теплової електростанції, яка працює на твердому паливі: 1 – електричний генератор; 2 – парова турбіна; 3 – пульт управління; 4 і 5 – деаератор; 6 – пиловий бункер; 7 – сепаратор; 8 – циклон; 9 – котел; 10 – поверхні нагріву (теплообмінники); 11 – димова труба; 12 – дробильне приміщення; 13 – склад резервного палива; 14 – вагон; 15 – розвантажувальний пристрій; 16 – конвеєр; 17 – димосос; 18 – канал; 19 – золовловлювач; 20 – вентилятор; 21 – топка; 22 – млин; 23 – насосна станція; 24 – джерело води; 25 – циркуляційний насос; 26 – регенеративний підігрівач високого тиску; 27 – живильний насос; 28 – конденсатор; 29 – пристрій хімічного очищення води; 30 – підвищувальний трансформатор; 31 – регенеративний підігрівач низького тиску; 32 – насос конденсату.

Напевне, складніше і дорожче може бути лише використання твердого палива (наприклад вугілля). Адже як видно на схемі (див.рис.1.12.) [24], тут присутнє не лише стандартне для кожної електростанції обладнання (генератор, турбіна, котел), але й безліч обладнання, що призначене виключно для спалювання, транспортування та підготовки вугілля (пиловий бункер, циклон, дробильні приміщення і т.д.).

Навіть не враховуючи надзвичайно габаритне обладнання/ приміщення/ інфраструктуру: вагоноперевертальні прилади, вугільні бункери і т.д., що знаходиться ззовні головного корпусу вугільної ТЕЦ/ТЕС, навіть у головному корпусі значну кількість простору займає додаткове обладнання, що притаманне лише твердому паливу: пиловий бункер, сепаратор, циклон, конвеєр, золовловлювач і т.д.



Рисунок 1.13. Вугільний склад.

Звісно таке паливно господарство з іншими порівнювати не надто доцільно, адже в зв'язку з такою складною схемою вугілля як резервне паливо використовувати важко, тому в більшості воно використовується як резерв на таких же вугільних електростанціях (див. рис. 1.13) – склад резервного палива).

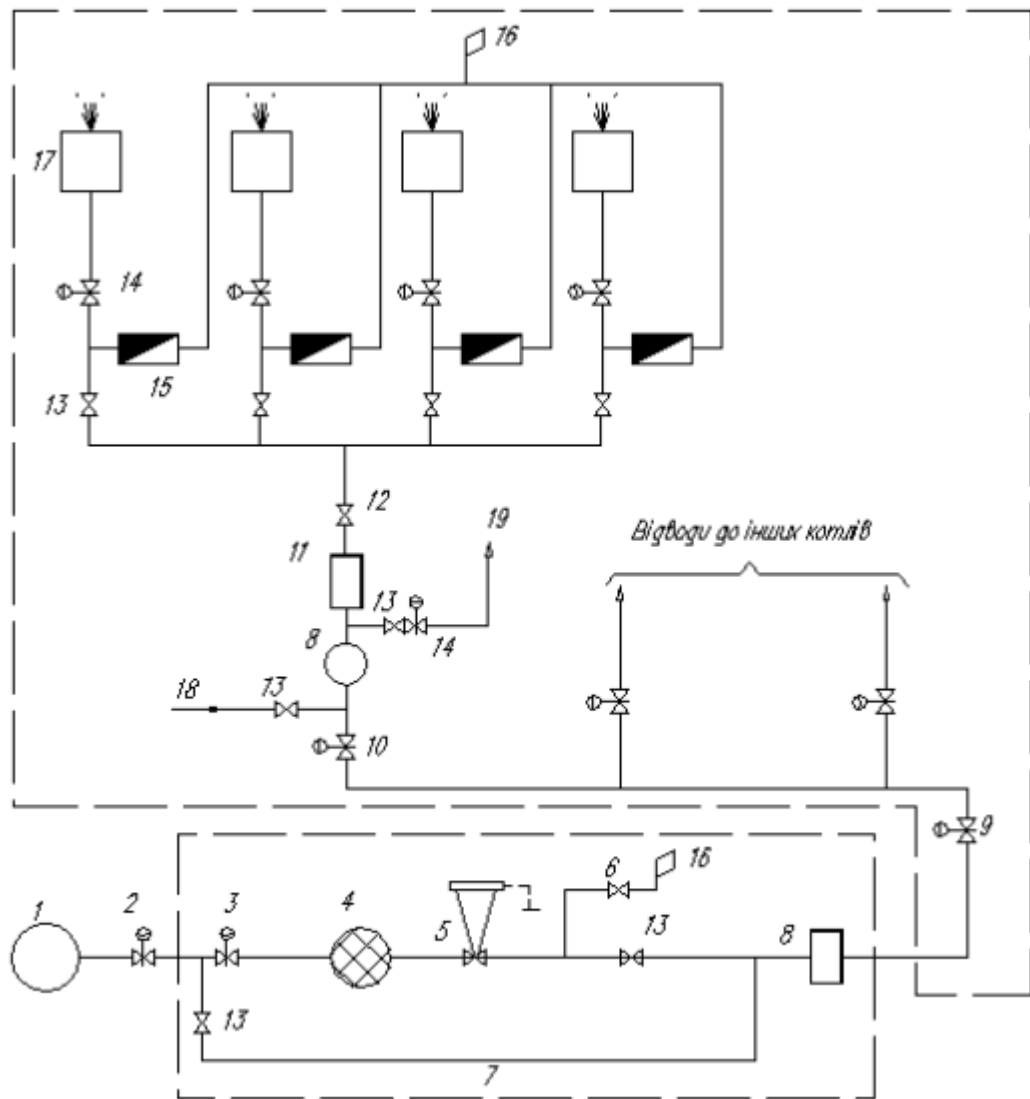


Рисунок 1.14. Технологічна схема газового господарства КЕС: 1 – газова магістраль; 2, 3, 9, 10 – засувки з електроприводом; 4 – фільтр; 5 – регулятор тиску; 6 – запобіжний клапан; 7 – байпасна лінія; 8 - витратомір; 11 – швидкодіючий клапан; 12 – регулюючий клапан; 13, 14 – запірні засувки на лінії до запальника; 15 – пробковий кран; 16 – свічка; 17 – горілки котла; 18 – подача стисненого повітря для продувки газопроводу; 19 – запальник.

Серед всіх інших, найпростіше виглядає паливне господарство газоподібного палива. Хоча на схемі ми можемо бачити досить багато позначок, більшість з них – регулююча та запірна арматура, яке відносно дешева та майже не споживає електроенергії на відміну від попередніх схем. Великим плюсом являється те, що деколи не потрібно взагалі ніяких резервуарів (див.рис.1.14.)

[24], в якості резервного паливного господарства може виступати сам факт підключення паливного господарства до магістрального газопроводу (що не є великою проблемою в нашій країні, яка майже повністю пронизана ними).

1.4. Технології спалювання.

Основним напрямком підвищення ефективності вогнетехнічних об'єктів є використання високоефективних та сучасних технологій спалювання палива.

Створення пальникових систем для реалізації високоефективних технологій спалювання палива становить значний науковий інтерес. Вивчення гідро-термо-хімічних процесів, що відбуваються в пальниках, є надзвичайно важливим для оптимізації їх роботи. [25]

1.4.1. Робочий процес пальникових пристроїв.

Для вибору технології, що підходить для задачі уніфікації основного, резервного та аварійного палива, потрібно сформулювати основні вимоги до такої технології. Для визначення основних вимог до пальникових пристроїв необхідно спершу проаналізувати особливості їхнього робочого процесу. Результативність топкових процесів обумовлена якістю організації роботи пальників, що передбачає виконання ряду важливих етапів:

- сумішоутворення та займання паливно-окиснювальної суміші;
- стабілізація горіння;
- розподіл пального у потоці окиснювача;
- забезпечення умов для повного вигорання пального;
- формування полів швидкості та температури, й необхідних концентрацій продуктів згоряння в топковому просторі.

Сучасні наукові дослідження зосереджені на оптимізації кожного етапу цього процесу, що підтверджується значним обсягом наукової літератури в даній галузі. У пальникових пристроях подача паливної суміші реалізується за

допомогою газових струменів, спрямованих як у поздовжньому, так і в поперечному напрямках відносно потоку окиснювача, з використанням як обмеженої кількості потужних струменів, так і численних дрібнодисперсних струменів

Кількість отворів подачі палива є ключовим фактором, що визначає рівномірність його розподілу та, відповідно, якість сумішоутворення. Для підвищення ефективності процесів масообміну застосовуються турбулентні генератори, включаючи решітки, тіла з високим коефіцієнтом опору та завихрювачі. [25]

Одним із поширених методів інтенсифікації процесу сумішоутворення є завихрювання потоку окиснювача. Завихрювач відіграє роль стабілізатора горіння, оскільки в центрі вихору утворюється зона розрідження, яка підсмоктує гарячі продукти згоряння з топкового простору. Водночас слід враховувати, що при високих швидкостях обертання паливної суміші виникають значні відцентрові сили, що спричиняють розшарування суміші за густиною, ускладнюючи процес її формування. Важливим етапом забезпечення ефективного горіння є попередня підготовка паливної суміші, оскільки від її параметрів залежить подальша організація механізму горіння. [25]

Основу робочого процесу пального пристрою становлять:

- аеродинамічні процеси, які визначаються структурою течії, зокрема розмірами вихрових утворень, рівнем турбулентності, а також полями швидкостей пального, окиснювача та продуктів згоряння;
- процеси сумішоутворення, які характеризуються концентраційними полями та масштабами зон змішування, що забезпечують повну гомогенізацію паливної суміші;

- процеси хімічної кінетики, що включають етапи займання, вигорання пального та формування факела, а також розподіл концентрацій компонентів, що беруть участь у реакції горіння.

Робочий процес пальникового пристрою (ПП) характеризується такими ключовими параметрами:

повнотою вигорання пального;

- об'ємною теплонапруженістю;
- гідравлічним опором системи;
- ступенем нерівномірності горіння.

Фронт полум'я формується в точках струменя пального, де зустрічні потоки реагентів знаходяться у стехіометричному співвідношенні. Інтенсивне протікання хімічних реакцій відбувається саме в областях, де молекули реагентів взаємодіють між собою при підвищених температурах. Стійкість полум'я є критичним фактором, що визначає надійність і безпечність експлуатації вогнетехнічних установок. У разі нестабільного горіння можливі небажані явища, зокрема «проскок» полум'я всередину пальника або його відрив від пристрою.

Варто зазначити, що потік суміші, що виходить із пальникового пристрою, має нерівномірний розподіл швидкостей: у зоні, прилеглій до стінок (де діють сили гальмування), швидкість руху суміші завжди нижча.

Для стабілізації полум'я застосовують різні конструктивні рішення, які можуть бути:

- вбудовані в пальниковий пристрій (наприклад, поганообтічні тіла та кільцеві стабілізатори);
- примикати до пальника (зокрема, керамічні тунелі, стаціонарні запальники);

- розміщуватися в топковому просторі на певній відстані від пальникового пристрою (керамічні гірки, розсікачі, решітки тощо).

1.4.2. Вимоги до пальникових пристроїв.

Проаналізувавши робочий процес пальникових пристроїв, а також переглянувши теоретичні дослідження та значний обсяг практичних даних щодо використання різних вогнетехнічних установок із пальниковими пристроями, можна сформулювати основні вимоги до них, виконання яких сприяє підвищенню їхньої надійності, економічності та мінімізації негативного екологічного впливу.

Конструкція ПП має забезпечувати можливість керування стадіями робочого процесу:

- сумішоутворення пального та окиснювача;
- займання паливної суміші;
- стабілізацію процесу горіння та формування необхідної якості продуктів згоряння.

Багато видів пальникових пристроїв не забезпечують усіх стадій робочого процесу. Наприклад, колись популярні подові пальники фактично виконували лише функцію змішувальних приладів, оскільки стійкість горіння в них забезпечувалася особливостями топкового простору, такими як розпечена цегляна кладка вогнетехнічного пристрою або вихрова течія в топці. У таких випадках пальникові пристрої фактично функціонували як топки з подовим змішувачем, і в більшості випадків вимагали узгодження їхньої роботи з аеродинамікою топкового простору.

Пальникові пристрої новітніх моделей, повинні організовувати стабільне горіння навіть за умови різких коливань тиску та, відповідно, витрат газоподібного палива. Зокрема, пальникові пристрої типу ГМ та ГМГ повинні демонструвати ефективну роботу в доволі широкому діапазоні потужностей при

заданих коефіцієнтах надлишку повітря з коефіцієнтом регулювання $K_p > 5$ ($K_p = N_{\text{опт}} / N_{\text{мін}}$) і коефіцієнті надлишку повітря $\alpha > 10$. До подібних ситуацій можна віднести: [25]

- роботу котлів при змінних режимах генерації пари на техпроцеси;
- зміну температурних режів у печах;
- сушка футерування вогнетехнічного об'єкта під час ремонтних робіт і т.д.

Існуючі конструкції пальникових пристроїв показують недостатню ефективність при глибокому регулюванні. Задля забезпечення найвищої енергетичної ефективності й мінімізації емісії CO, CO₂, NO_x, сучасні пальники повинні забезпечувати повне конвертування паливної суміші в топковому просторі до її охолодження до температур нижчих ніж температура samozаймання в зонах найбільшої тепловіддачі (радіаційній або конвективній).

Необхідні функціональні характеристики пальникових пристроїв включають можливість регулювання довжини та інтенсивності випромінювання факела для оптимізації розподілу теплових радіаційних потоків у топковому просторі, що є критичним для печей різного призначення. Також необхідне управління аеродинамікою та концентраційним профілем продуктів згоряння, що визначається типом вогнетехнічного об'єкта. Серед найважливіших характеристик пальників можна відзначити їх аеродинамічний опір: за шляхом окиснювача та за шляхом палива.

Для того, щоб зменшити витрати на електроенергію для приводу тягових засобів, аеродинамічний опір повітряного тракту слід мінімізувати. У той же час мінімізація опору шляху проходження палива дозволяє пальнику працювати при надзвичайно низьких тисках газу. [25]

Плюсом є коли конструкція пальника здатна забезпечити модульність, це дозволяє забезпечувати необхідну потужність, використовуючи необхідну кількість автономних модулів. Такий підхід спрощує розрахунок ПП та їх

виготовлення, веде до уникнення додаткових витрат за місцем на регулювання пальникових пристроїв різної потужності.

На основі вказаного вище, можна сформулювати висновки, що новітні пальники мусять забезпечувати виконання наступних вимог: [25]

1. Можливість впливу на всі стадії робочого процесу (суміш палива та окиснювача, займання паливної суміші, стабілізація процесу горіння та формування необхідної якості продуктів згоряння);
2. Надійність займання та стабільність горіння при мінімально можливому споживанні газу;
3. Відсутність перевищень дозволених рівнів емісії шкідливих речовин (NO_x , CO , SO_2 та ін.) У всіх діапазонах навантаження об'єкта пожежі;
4. Можливість широкого регулювання довжини та освітленості пальника;
5. Можливість контролю аеродинамічної та концентраційної структури потоку продуктів згоряння;
6. Мінімальний аеродинамічний опір як на шляху окисника, так і на шляху палива;
7. Простота та надійність регулювання всіх робочих параметрів та зміна режимів роботи;
8. Самоохолодження паливних пристроїв потоками палива та окиснювача;
9. Низький рівень шуму, пульсацій та вібрацій;
10. Модульність, технологічність, а також простота виготовлення, низька витрата металу, відсутність потреби в спеціалізованих та рідкісних матеріалах.

1.4.3. Струменево-нишева технологія

Серед вітчизняних технологій спалювання палива, струменево-нишева технологія (СНТ) виділяється своєю ефективністю та здатністю задовольняти необхідні вимоги. Вона забезпечує надійну роботу в широкому діапазоні робочих навантажень. СНТ бере свій початок у лабораторії горіння КПІ,

заснованій Христичем В.А., яка займала провідні позиції серед дослідницьких центрів. На сьогодні, на основі СНТ, було модернізовано близько 1000 вогнетехнічних об'єктів в Україні та за її межами.

Дослідження, проведені Абдуліним М.З., Дворциним Г.Р. та Кулешовим Ю.А., підтвердили, що перпендикулярне розташування струменів палива відносно потоку окислювача, у поєднанні з генерацією вихрових структур за допомогою нішових порожнин або виступів, забезпечує формування стійких вихрових полів з автомобільним розподілом компонентів паливної суміші в зоні стабілізації горіння при заданих швидкостях зносу потоку. [26,27]

Дана конструкція поєднує всі стадії робочого процесу пальників:

- розподілення палива в потоці окиснювача;
- спільна роздача з потрібними рівнями концентрації палива в окиснювачі;
- підготовка палива;
- самоохолодження елементів пальникових пристроїв;

Сьогодні СНТ широко впроваджується в багатьох типах вогнетехнічних об'єктів. Наприкінці 90-х використання та пальникові пристроїв (див. рис. 1.15-16.) запатентовані в Україні та Євразії. На відміну від інших технологій, вивчалася скручування потоку окиснювача та тіла з поганим потоком як стабілізаторів горіння, а також різні варіанти подачі реактивного палива [28].

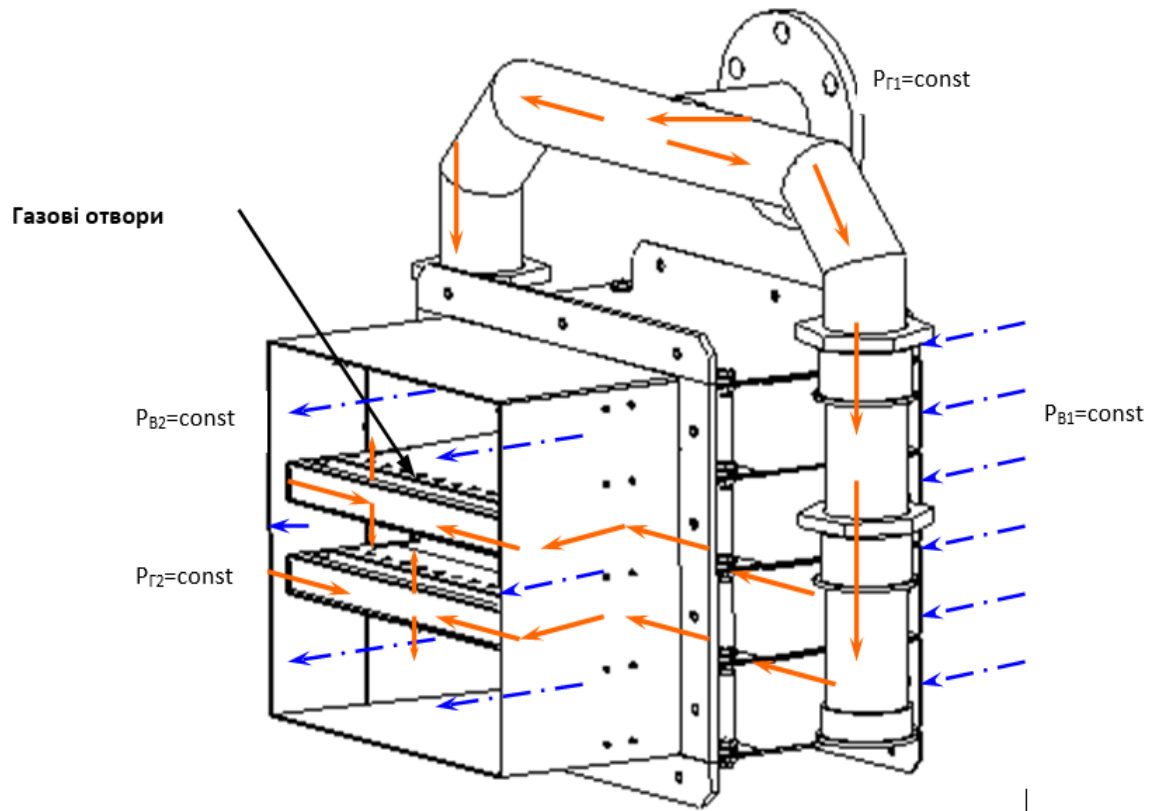


Рис. 1.15 Принципова схема подачі газу і повітря в струменево-нішевому пальнику.



Рис. 1.16 Котел КВГ-6,5 модернізований з використанням струменево-нишевих пальникових пристроїв.

Крім того, всупереч існуючій думці, природний газ доволі важко спалити високоефективно, адже він має високу температуру займання, вузький діапазон горючих об'ємних концентрацій і дуже низькі значення нормальної швидкості поширення полум'я. Це, поряд зі складністю аеро-термо-хімії даного процесу, ускладнило створення універсальної технології спалювання, яка задовольняє всім вимогам економічності, екологічної безпеки і надійності роботи вогнетехнічного об'єкта.

На основі струменево-нишевої системи, яка поєднує в собі систему паливних струменів, що збільшує потік окиснювачів і порожнину ніші, розташованих нижче за течією, вдалося створити ГУ зі стабільною аеродинамічною структурою. На сьогодні СНТ - це єдина універсальна технологія горіння, широко перевірена на всіх типах ВО [29].

Вперше концепцію мікродифузійного механізму горіння сформував Д.А. Франк-Камецький. Мікродифузійний процесом горіння - це такий режим, за якого паливо дисперговане на окремі дрібні об'єми, що є рівномірно розподіленими у потоці повітря. Даний механізм, що є специфічною формою турбулентного горіння, детально розглядається у працях [39-44].

Механізми спалювання газу можна візуально спостерігати, наприклад, у довгій трубі (див. рис. 1.17). При виході газоповітряної суміші з колектора у потік набігаючого повітря відбувається макромасштабне змішування компонентів, що супроводжується вираженою нерівномірністю їхньої густини. У цій зоні стабілізується режим дифузійного горіння, для якого характерне значне перевищення часу дифузії над часом хімічної реакції ($\tau_{\text{диф}} \gg \tau_{\text{х.к}}$). Подальше поширення процесу супроводжується мікродифузійним змішуванням, що сприяє вирівнюванню густини потоку. У цьому випадку часові масштаби дифузії та хімічного перетворення стають порівнянними ($\tau_{\text{диф}} \approx \tau_{\text{х.к}}$). На фінальній стадії горіння газового палива у трубі процес може перейти в

кінетичний режим, коли хімічна реакція відбувається значно повільніше порівняно з процесом дифузії ($\tau_{\text{диф}} \rightarrow 0$).

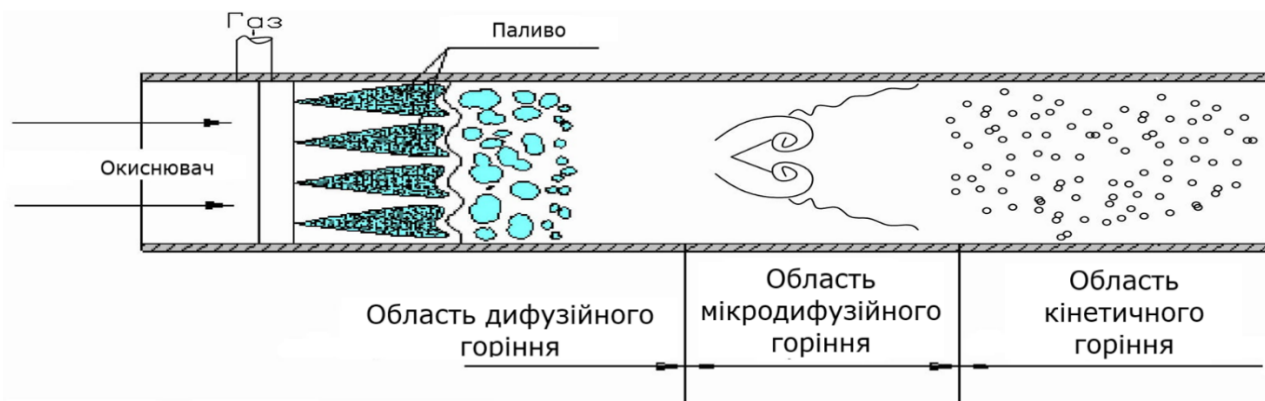


Рис. 1.17 Механізми горіння

Для мікродифузійного горіння визначальним фактором є швидкість мікрозмішування, яка впливає на кінетику хімічної реакції. Тривалість взаємодії горючого компонента з окиснювачем порівнянна з часом досягнення горючих концентрацій. Ключову роль у цьому процесі відіграє масштаб фрагментації (δ), що визначає середній розмір об'ємів, на які диспергується паливо в окиснювальному середовищі. Динаміка потоку формується у вигляді комірчастої структури, що складається з окремих зон горючого та окиснювача, які піддаються впливу турбулентних пульсацій. Фронт полум'я поширюється уздовж поверхні цих комірок.

Реалізація мікродифузійного механізму горіння вимагає контролю співвідношення швидкості дифузійного змішування та швидкості хімічних перетворень. Регулювання цього параметра дозволяє забезпечити горіння у режимах, характерних як для дифузійного, так і для кінетичного процесу, причому у граничному випадку зростання інтенсивності горіння можливий перехід до кінетичної області.

1.5. Реакційна здатність палива.

Коли говоримо про різні види палива, крім основних їх характеристик наприклад теплоти згорання, варто звертати увагу також на не менш важливу особливість - реакційну здатність палив. [30-32]

Властивості палива, що визначають його здатність до реакції, включають хімічний склад, структуру та ступінь окиснення. Палива, багаті на елементи, які легко вступають в хімічні реакції, такі як вуглець (C) та водень (H), зазвичай мають високу реакційну здатність. [33]

Реакційна здатність палива є доволі важливим фактором, який оприділяється фізико-хімічними реакціями, що відбуваються в процесі горіння: [33].

1. Теплотворна здатність: Чим вищою є реакційна здатність палива, тим більше теплоти (відносно маси палива) виділяється в процесі горіння.
2. Швидкість горіння: Реакційна здатність визначає швидкість протікання хімічних реакцій горіння. Палива, що мають вищу реакційною здатністю згоряють швидше, це забезпечує більш стабільне та повне спалювання.
3. Стійкість горіння: Вищий рівень реакційної здатності сприяє підвищенню стійкості процесу горіння.
4. Екологічний вплив: Реакційна здатність палива має прямий вплив на склад продуктів згорання. Високореакційні палива сприяють інтенсифікації окислювальних процесів, що може збільшувати викиди оксидів азоту та інших шкідливих речовин, але водночас знижувати рівень забруднення, пов'язаного з неповним згоранням [33].

Під час експериментів на струменево-нишевих пальникових пристроях було виявлено, що при спалюванні низькореакційних видів палива (див. рис. 1.18) утворюються зони недопалу, тобто області, де паливо не загоряється. Це стало підґрунтям для проведення експериментів, спрямованих на підвищення

реакційної здатності палива шляхом додавання домішок високореакційних компонентів, зокрема водню.

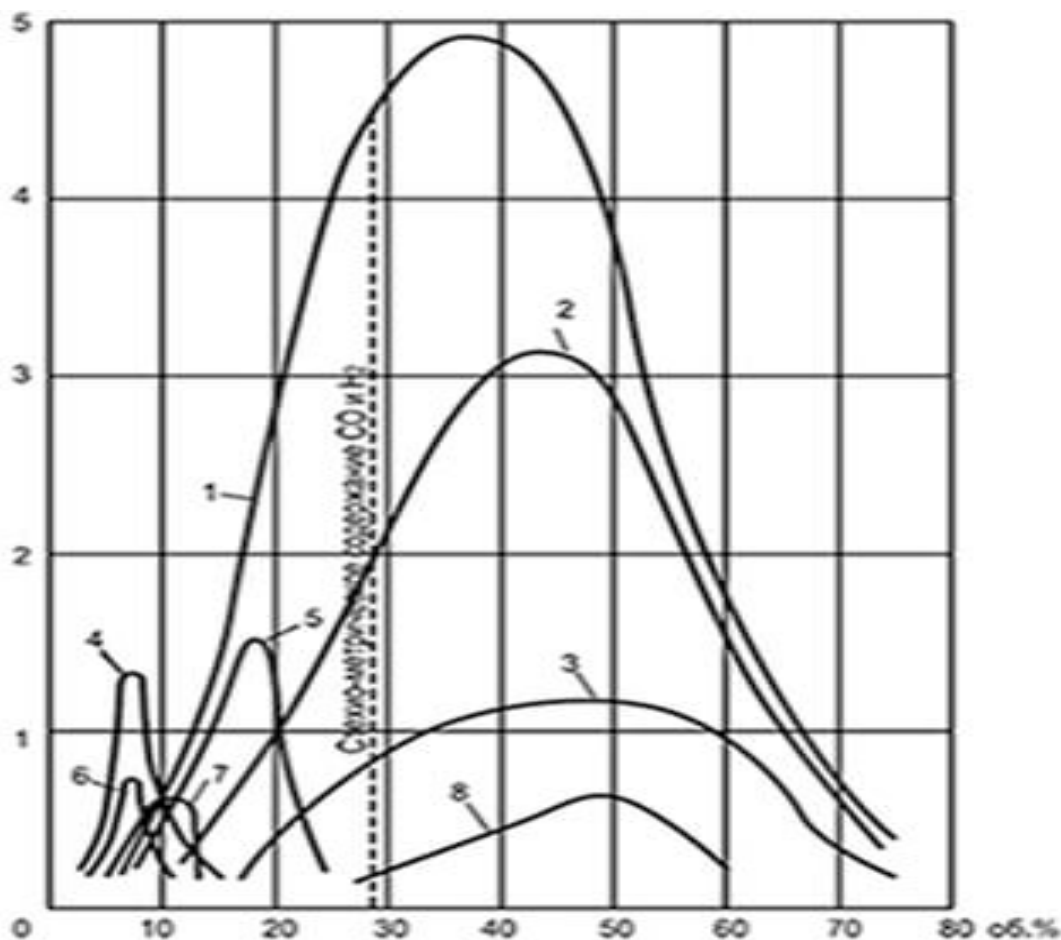


Рис. 1.18 Криві рівномірних швидкостей. 1-водень; 2-водяний газ; 3-оксид вуглецю; 4-етилен; 5-коковий газ; 6-етан; 7-метан; 8-генераторный газ.

Реакційна здатність палива є визначальним фактором при розробці та впровадженні палив, що забезпечують сталий розвиток. Інженери, науковці та промисловість працюють над створенням палив, що мінімізують екологічне навантаження та оптимізують технології згоряння.

Підвищення реакційної здатності палива може бути досягнуто за допомогою різних технологій і методів, що включають: [32]

1. Каталіз: Використання каталізаторів підвищує швидкість хімічних реакцій горіння. Каталізатори знижують енергію активації реакцій, дозволяючи їм відбуватися при нижчих температурах та ефективніше

виділяти енергію, при цьому сам каталізатор не витрачається в ході реакції.

2. Збільшення кисневого вмісту: Збільшення відсоткового вмісту кисню в паливній суміші, або використання окиснювачів, які забезпечують більше кисню для реакцій, може підвищити реакційну здатність.
3. Змішування з іншими паливами: Комбінування палива з іншими більш реактивними паливами може створити синергетичний ефект і підвищити реакційну здатність.
4. Підвищення температури: Збільшення температури палива, за допомогою попереднього підігріву, може підвищити реакційну здатність палива та сприяти повнішому спалюванню.
5. Удосконалення технологій згоряння: Використання високоефективних способів згоряння, таких як ефективніша роздача палива та сумішоутворення, може покращити ефективність процесу спалювання.

Станом на сьогодні, в рамках струменево-нишевої технології проводяться роботи по подальшому покращенню реакційної здібності палива, шляхом змішування основного палива з воднем та іншими високореакційними видами палива. Проведені ретельні дослідження сумішоутворення та стабілізації горіння в струменево-нишевій системі дозволили детально дослідити структуру факелу (див.рис.1.19.) [14]

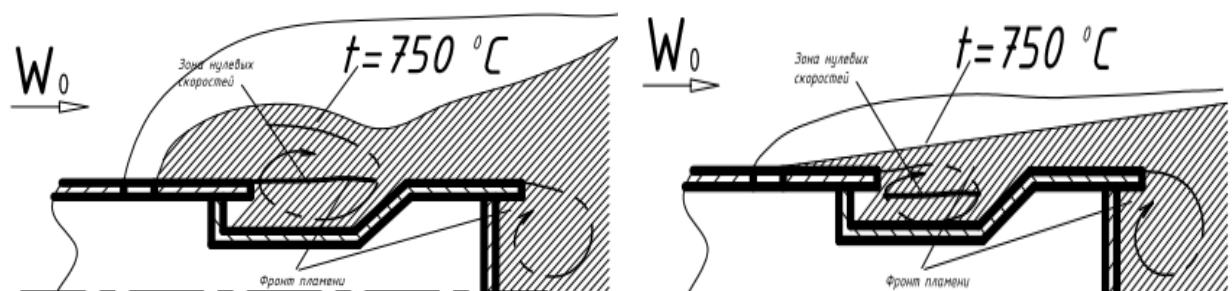


Рисунок 1.19 Розповсюдження полум'я у системі з нішею.

Проблеми горіння, спричинені низькою реакційною здатністю палива, з легкістю вирішуються шляхом утворення сумішей низькорекційних і високореакційних палив, зокрема природного газу та водню. Ключовим аспектом використання таких сумішей є визначення оптимальної частки водню. Це питання часто стає компромісом між підвищенням реакційної здатності палива, забезпеченням необхідної теплоти згоряння та дотриманням вимог безпеки.

1.6. Воднева енергетика. Загальні характеристики

Розробки в сфері водневої енергетики є актуальним напрямом у сучасній науковій діяльності, спрямованим на використання водню як чистого та ефективного джерела енергії для різноманітних потреб. Водень, як відомо, є найпоширенішим хімічним елементом у природі та володіє величезним потенціалом як паливо. Його ефективне спалювання призводить в основному лише до утворення води, що робить його надзвичайно чистим та екологічно безпечним.

Водень може бути використаний для живлення різноманітних видів транспорту та промислових процесів. Однак його знаходження у природі у вільному вигляді є досить рідкісним явищем, тому його потрібно виробляти. Для виробництва водню часто використовують електроліз води, але існують і інші методи, такі як парогазифікація біомаси чи газифікація вугілля. Важливо відзначити, що використання водню, виробленого з використанням відновлювальних джерел енергії, дозволяє уникнути викидів парникових газів. [33] Окрім цього при виробництві водню таким шляхом, де-факто його можна використовувати, як «акумулятор» електроенергії. В часи коли споживання електроенергії споживачами нижче ніж вироблення електроенергії, можна спрямовувати електроенергію вироблену на вітряках та СЕС на електроліз водню, таким чином добавляючи електромережі більше маневреності.

У використанні водню як палива можна виокремити дві ключові стратегії. Перша передбачає його спалювання за аналогією з іншими видами палива, такими як природний газ чи дизельне паливо. Друга стратегія ґрунтується на застосуванні водневих паливних елементів, які функціонують на основі електрохімічної реакції між воднем і киснем, у результаті чого утворюються електроенергія та вода. Такі елементи є екологічно безпечним і високоефективним джерелом енергії, що може знаходити широке застосування в різних сферах промисловості та транспорту. (див.рис.1.20.)

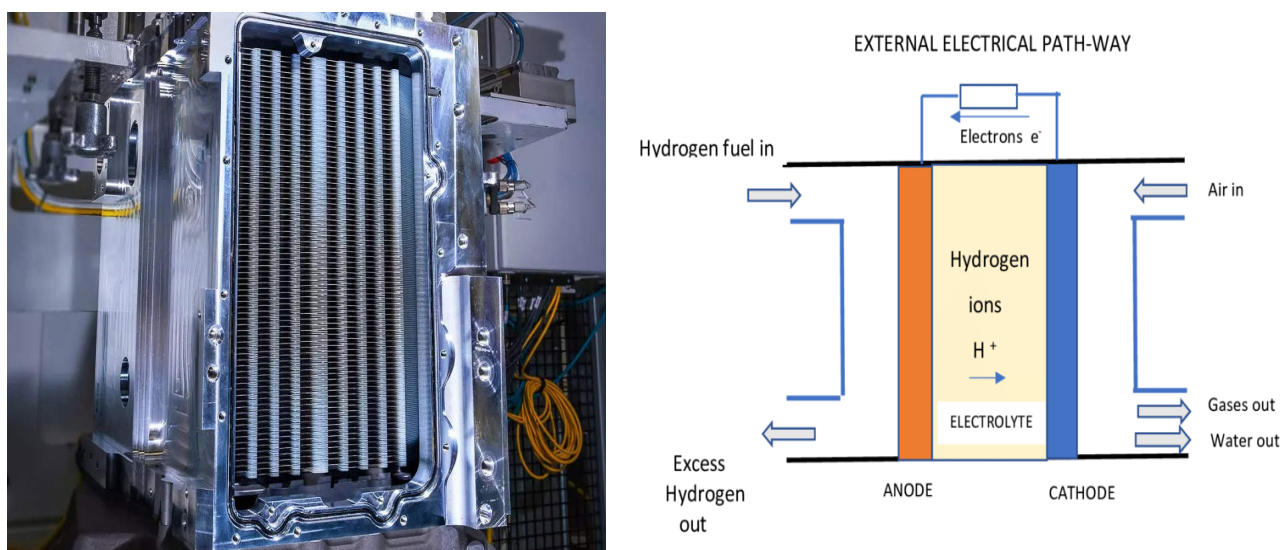


Рисунок 1.20. Водневий паливний елемент та його схема.

Використання водню сприяє підвищенню енергетичної безпеки, оскільки його можливо отримувати з різних первинних джерел енергії, зокрема відновлюваних. Водень має потенціал стати повноцінною альтернативою нафтовим продуктам. Його можна виробляти з різноманітних ресурсів, зокрема природного газу, вугілля, органічних відходів, біопалива та агропромислових залишків [34]. Це забезпечує можливість його виробництва у різних регіонах світу.

Основна перевага водню полягає у його високій енергетичній густині. Зокрема, двигун внутрішнього згоряння, що працює за циклом Отто на водневому паливі, демонструє максимальний коефіцієнт корисної дії на рівні 38

%, що приблизно на 8 % перевищує ефективність аналогічного двигуна, який використовує бензин.

На сьогодні приблизно половина всього виробленого у світі водню отримується з природного газу, проте очікується поступове збільшення частки інших джерел. З огляду на обмеженість економічно вигідних запасів вуглеводневих ресурсів та постійно зростаючий попит на паливо, особливо в країнах, що швидко розвиваються, таких як Китай та Індія, перспективи впровадження альтернативних методів виробництва водню набувають дедалі більшої актуальності.

1.6.1. Ринок та застосування водню.

Виробництво водню — це швидко зростаюча галузь. У 2004 році світове виробництво досягло 50 млн тон, що еквівалентно 170 млн тон нафтового еквівалента, із щорічним зростанням близько 10%. У США на той час вироблялося 11 млн. тон водню, а його річна вартість у 2005 році сягала \$135 млрд.

Сучасне використання водню зосереджене у двох напрямках: близько 50% йде на виробництво аміаку (NH_3) у процесі Габера, що застосовується у сільському господарстві, а решта — для переробки нафти.

Зростання цін на викопне паливо стимулює інтерес до альтернативних методів виробництва водню. Наразі більшість водню виробляється на місці споживання, його вартість становить \$0.7/кг, тоді як рідкий водень, що транспортується, коштує \$2.2–3.1/кг.

1.6.2. Виробництво водню.

На Землі молекулярний водень майже не зустрічається у вільному вигляді, оскільки переважно зв'язаний із киснем у складі води. Його отримують шляхом переробки воднювмісних сполук, що потребує енергії та може супроводжуватися викидами CO_2 . Основними методами виробництва є:

1. Кварнер-процес – розщеплення вуглеводнів, таких як метан і природний газ.[38]
2. Біологічне виробництво – ферментативне утворення водню бактеріями.
3. Електроліз із біокаталізаторами – виробництво водню у мікробних паливних елементах.[35]
4. Електроліз води – поділ H_2O під дією електричного струму, включаючи високотемпературний електроліз.[35]
5. Фотоелектрохімічне розщеплення – виробництво водню за допомогою сонячної енергії.[36]
6. Концентрація сонячної енергії – термічне розкладання води під дією високих температур.
7. Фотоелектрокаталітичний метод – використання наночасток для утворення водню під дією світла.[39]
8. Термохімічні цикли – отримання водню з води за допомогою теплової енергії, без електролізу.

Термохімічні процеси можуть бути ефективнішими за електроліз, але поки не використовуються у промисловості. Дослідження спрямовані на підвищення ефективності та зниження вартості виробництва водню.

1.6.3. Зберігання водневого палива.

Зберігання водню здійснюється у формі стиснутого газу при тиску 350–700 бар або у вигляді хімічних гідридів та твердих матеріалів, що поглинають водень. Для промислових масштабів можливе підземне зберігання в соляних склепіннях або вичерпаних родовищах, що забезпечує довготривале зберігання без значних втрат.[37]

Транспортування водню ускладнене через його високу дифузійність, що спричиняє скрихчення сталевих трубопроводів. Тому необхідні спеціальні покриття або нові матеріали для безпечного транспортування. Хоча водневі

трубопроводи є найдешевшим способом транспортування, витрати на їхню модернізацію значні.

Щороку у світі розповсюджуються мільйони тонн водню, проте його доступність для кінцевих споживачів залишається обмеженою. Майбутнє водневої енергетики передбачає його використання як резерву енергії для промислових секторів, що сприятиме зменшенню викидів парникових газів.[40]

Ефективне виробництво водню з альтернативних джерел (відновлюваних або атомних) вигідніше реалізовувати через локальне виробництво, уникаючи втрат при транспортуванні. Децентралізована модель виробництва водню на місцевих заводах або заправних станціях із використанням електроенергії може стати більш ефективною, ніж централізоване виробництво та транспортування.[41]

1.6.4. Експлуатація.

Побоювання щодо займистості водню є суттєвою перешкодою для його впровадження, хоча дослідження доводять, що за належних умов водень може бути безпечним. Завдяки низькій молекулярній масі він швидко розсіюється в повітрі, що зменшує ризик вибухів у закритих просторах.[44]

Важливу роль у безпеці відіграють відповідні норми та стандарти, зокрема використання детекторів для виявлення витоків. Дослідження, включаючи Канадську програму водневої безпеки, свідчать, що водень може бути не менш безпечним за природний газ.

Європейська комісія наголошує на необхідності освітніх програм і розробки засобів безпеки, щоб водневі технології стали такими ж доступними та безпечними, як традиційні енергетичні рішення.

1.6.5. Економічний фактор.

Порівняння витрат на водень і викопне паливо ускладняється різними аспектами виробництва. Виробництво водню електролізом потребує значних енергетичних витрат — понад 35 кВт/год на кілограм, що підвищує його вартість.

Додаткові витрати спричиняє транспортування та зберігання: трубопроводи для водню дорожчі за електромережі, а його більший об'єм порівняно з природним газом збільшує витрати на інфраструктуру.

1.6.6 Воднева енергетика в Україні.

Воднева енергетика має великий потенціал для зменшення енергетичної залежності України та розвитку внутрішніх ресурсів. Перетворення вугілля, торфу, біомаси та інших ресурсів у водень може задовольнити енергетичні потреби та зменшити викиди парникових газів.

Газифікація вугілля, зокрема підземна, є перспективним методом виробництва водню, оскільки Україна має значні запаси вугілля. Крім того, отримання водню як побічного продукту в хімічних і нафтопереробних процесах підвищує ефективність і екологічність.

Ще одним джерелом водню може бути сірководень у воді Чорного моря, що відкриває нові можливості для розвитку водневої енергетики в Україні.

1.6.7 Водень та струменево-нишева технологія.

Як було зазначено у розділі, присвяченому реакційній здатності палив, експериментальні дослідження в струменево-нишевих модулях показали утворення зон із надлишковою кількістю незгорілого палива на передній частині факела. Це явище пов'язане з низькою реакційною здатністю природного газу, якої недостатньо для підтримання стабільної реакції горіння у віддалених від високотемпературних областях. В таких зонах спостерігається «зрив горіння»,

викликаний високим ступенем аерації паливної суміші та порушенням теплового балансу займання. [33]

Таблиця 1.1. Характеристики сумішей природного газу та водню. [33]

Назва характеристики суміші	Одиниц і	Н ₂ у суміші, % об.		
		10	30	50
Щільність	кг/м ³	0,65	0,52	0,4
Теплота згорання	МДж/м ³	33,38	28,36	23,33
Індекс Воббе	МДж/м ³	46,95	44,37	41,81
Відмінність індексу Воббе суміші від індексу Воббе природного газу (48,22)	%	2,6	8,0	13,2
Межі спалахування:	% об.	4,9	4,6	4,4
- нижня				
- верхня		16,3	19,7	25,0
Швидкість полум'я	м/с	0,19	0,26	0,37
Граничний коеф. надлишку повітря на межі утворення жовтих пробісків полум'я		0,21	0,19	0,17
Потреба у повітрі для повного згорання (стехіометрична кількість повітря)	м ³ /м ³	8,8	7,4	5,9
Об'єм продуктів повного згорання ($\alpha=1,15$)	м ³ /м ³	11,1	9,3	7,6
Склад продуктів повного згорання:	% об.	16,1	18,2	19,8
- водяна пара, H ₂ O				
- азот, N ₂		72,3	71,8	71,2
- кисень, O ₂		2,5	2,4	2,4
- діоксид вуглецю, CO ₂		8,1	7,5	6,6

Зважаючи на це, у випадку струменево-нишевої технології наразі проблему намагаються вирішити шляхом змішування низькорекційного палива з воднем. Основним викликом залишається визначення оптимальної частки водню. Це завдання потребує компромісу між підвищенням реакційної здатності паливної суміші, забезпеченням достатньої теплоти згорання та дотриманням вимог безпеки.

На думку великої кількості дослідників, цілком реальним є застосування сумішей з вмістом водню навіть понад 50% (див.таб.1.1.)

У роботах інших дослідників зазначається, що використання паливних сумішей із вмістом водню понад 20–25% на реальних вогнетехнічних об'єктах ускладняється через ризик переходу горіння в режим де відбувається проскок полум'я в зону сумішоутворення у інжекційних пальникових пристроях.

Водночас, досвід експлуатації струменево-нишевих пальників, які працюють у мікродифузійному режимі горіння, а також результати експериментальних досліджень свідчать про їхню здатність функціонувати стабільно навіть при підвищених концентраціях водню. На рис. 4 представлено фотографії процесу горіння суміші природного газу з воднем у струменево-нишевій системі. Як видно, займання паливної суміші відбувається безпосередньо на виході газоподавальних отворів колектору, що відрізняється від характеру горіння традиційного палива. [33]

1.7. Проблеми енергетики під час надзвичайних ситуацій.

Спираючись на досвід останніх років, за війною, коливаннями на ринку вуглеводнів і т.д. необхідно додатково розібрати ситуацію з точки зору енергетики, та ринку енергоресурсів, та зробити висновки. Насамперед, дуже важливим для енергетики є розуміння того, що надзвичайно країн знаходилися в повній залежності від одного постачальника вуглеводнів (Росії). (див. рис. 1.21.)

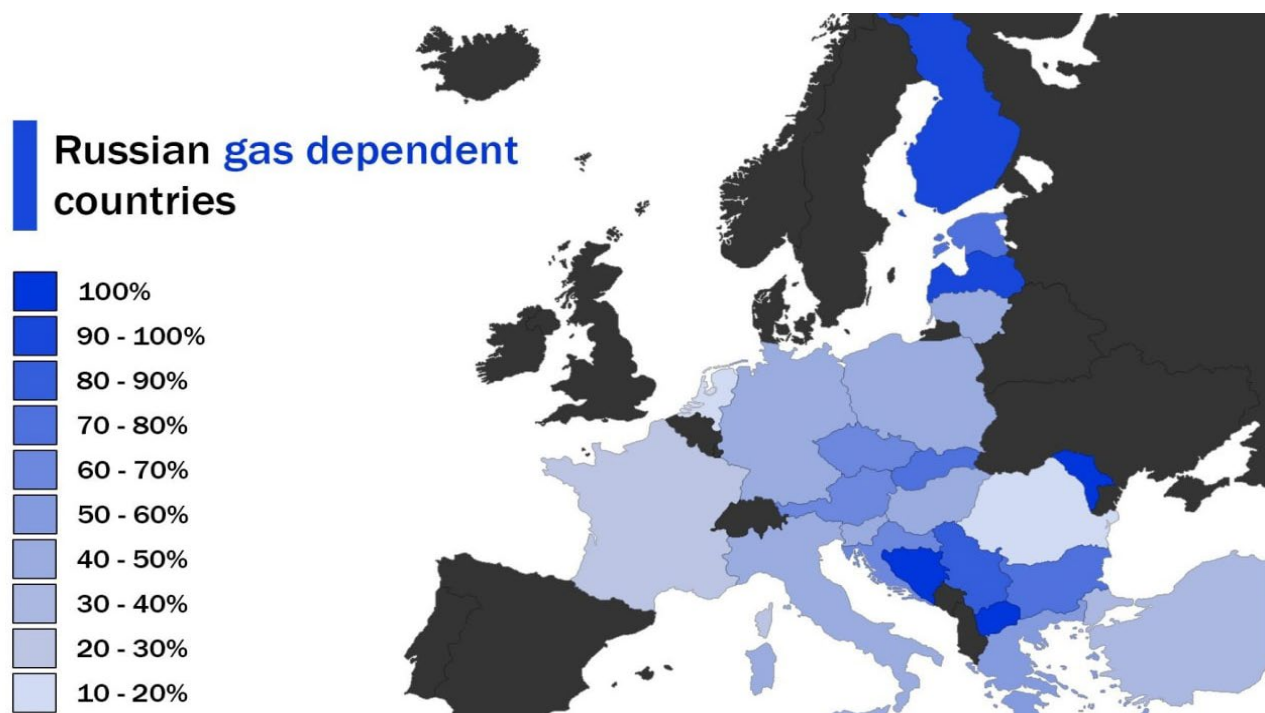


Рисунок. 1.21. Залежність країн Європи від російського газу станом на 2022 рік.

При цьому навіть порушувалися директиви Євросоюз, про недопустимість імпорту більше 30% певного ресурсу від одного постачальника (близько 40% газу на момент початку 2022 року постачалося з Росії).

І здавалося би, що це не єдиний постачальник газу, нафти та вугілля, адже є надзвичайно багато інших країн які експортують надзвичайно багато енергоресурсів. Так звісно доставка з Близького Сходу чи Америки не найдешевша, а частина країн як Іран чи Венесуела попри надзвичайно великі поклади енергоресурсів самі знаходяться під санкціями.

Але проблема в тому, що недостатньо лише знайти постачальника вугілля, нафти чи газу. Для більшості підприємств, комунальних господарств, металургійних заводів і т.д. необхідно газ певної калорійності, нафта потрібної марки і конкретний вид вугілля. Тому, деякі країн, які вже вирішили відмовитися від імпорту цих енергоресурсів заявляють, що повністю відмовитися буде можливо через роки, після модернізації всіх підприємств під нові види палива (або під нові характеристики застосовуваних палив).

Також проблемою є те, що нафтопродукти та природний газ набагато вигідніше постачати трубопроводом, чим будь-яким іншим способом, тому альтернатива в якості пропан-бутану, який постачати морем не набагато дорожче, чим трубопроводом, дозволяє вибирати постачальника з набагато більшого списку.

Більшості проблем удалося б уникнути, якби заздалегідь була передбачена можливість використання різних видів палива (або хоча б різних марок/сортів/калорійності). Диверсифікація паливної бази могла б бути вирішенням цієї проблеми. Адже, якщо неможливо закупляти газ чи нафту по прийнятним цінам у різних постачальників, тоді потрібно задуматися над зниженням споживання таких ресурсів завдяки переводу частини потужності на споживання інших видів палива.

На здивування надзвичайно проблематичною виявилася і ядерна енергетика. Це була перша війна на території держави з настільки великою кількістю ядерних об'єктів, від наукових інститутів з ядерними лабораторіями та єдиної в світі зони ядерної катастрофи, до найпотужнішої в Європі АЕС. В даному випадку, ядерна енергетика показала себе з не найкращої сторони. Можливість екологічної катастрофи у випадку обстрілу енергостанції, змусила відступати з околиць територій.

Іншою проблемою є надлишкова концентрація потужностей. Так наприклад відключення Запорізької АЕС позбавив країну 6000 МВт електроенергії. Що стало надсерйозним ударом по енергетиці країни. В той же час, якщо розділити таку потужність між 2-3 станціями, це дозволить диверсифікувати ризики.

Окрім того події осені-зими 2022 показали, що централізованість енергосистеми також може стати проблемою. Так вихід з ладу енергостанції чи основних ліній електропередач на Заході країни міг спричинити відключення на Сході та навпаки. А при пошкодженні надзвичайно високовольтних ліній від АЕС не було можливості перенаправити повну потужність неушкоджених АЕС в

енергосистему. Чого не було б при розподіленні цієї потужності на виробництво на декількох менших об'єктах. Тому в майбутньому можливість автономної роботи областей/районів від низки малопотужних енергооб'єктів може стати надійною гарантією безпеки енергосистеми.

Не менш небезпечними виявилися ГЕС, адже знищення чи пошкодження дамби може призвести до затоплення міста чи навіть області.

З не найкращої сторони також показало себе газопостачання. Під час ракетних ударів та бомбардувань багато міст було залишено без газопостачання, багато магістралей були виведені з ладу і навіть ГРП всередині міста були під атакою диверсантів.

З усіх цих проблем, можна зробити висновок, що під час форс-мажорних обставин, краще мати якомога більше запасних варіантів, резервів та можливостей влюбий момент змінити вид палива, чи просто, щоб на різних об'єктах були різні види палива (наприклад: одна районна котельня працює на природному газі, а сусідня на пропан-бутані чи генераторному газі і т.д.) це дозволить диверсифікувати ризики.

1.8. Низькокалорійні та низькорекційні види палив. Біогази, звалищні, металургічні, генераторні і т.п. гази.

Важко представити, що дець може існувати дешево, або взагалі практично безкоштовне паливо, яке ми не використовуємо. Але саме така ситуація спостерігається в металургії. Існує багато газів – побічних результатів металургічних процесів, які хоча і є низькокалорійними та забрудненими, проте все ж мають енергетичну цінність.

Серед таких газів: конвертерний, доменний та коксовий та інші.



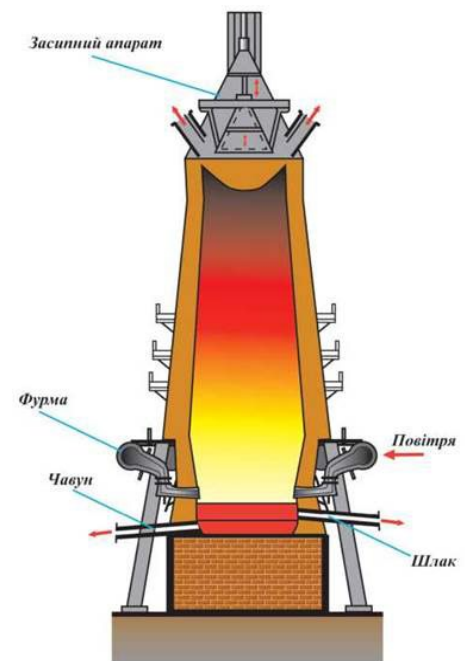
Рисунок 1.22 Конвертерна піч.

На жаль, для того, щоб їх використовувати, необхідно пристосовуватися до складних технологічних процесів заводів, так як деякі з цих газів поступають лише на певних проміжках технічного процесу. [45] Крім цього, якщо навіть пропан-бутан та природний газ вважаються низькорекційними, то такі гази, є надзвичайно низькорекційними, а тим більше низькокалорійними. Все це в свою чергу змушує замислитися над добавками високореактивних домішок до таких палив, для прикладу – водню.

Також досить складно встановити необхідне нове обладнання, трубопроводи та інші пристроїв, на існуючому заводі, що уже під зав'язку заповнений існуючим обладнанням і де по проекту не передбачалося місця під модифікації.



Рисунок 1.23 а.) Коксова піч.



б.) Доменна піч.

Саме тому, зараз, коли металургічна промисловість постраждали, а то й повністю знищене, з'являється шанс, при відбудові впровадити нові технології і модернізувати процеси.[46] Адже набагато простіше передбачити такі зміни в новому проекті (або хоча б закласти таку можливість в проекті для встановлення в майбутньому), чим уже на існуючому обладнанні.

1.9. Задачі дисертаційної роботи.

Тепер, коли нами уже була сформована концепція раціонального використання палива, розглянуті принципи роботи паливних господарств, проаналізовані технології спалювання, розібрано робочий процес пальникових пристроїв, а на основі всього вище сформовано основні вимоги до пальникових пристроїв та вибрана як найбільш підходяща струменево-нишева технологія. З літературного огляду, сформовані задачі дисертаційної роботи. Які виглядають наступним чином:

- Визначити найбільш важливі конструкційні та режимні фактори, необхідні для створення комбінованого пальникового модуля;

- Дослідити всі елементи робочого процесу струменево-нишевого пальникового модуля та пристрою при роботі на пропан-бутані та природному газі;
- Провести дослідження впливу домішок водню на робочі процеси горіння в комбінованому струменево-нишевому пальниковому модулі та пристрої;

1.10. Висновки до першого розділу.

Після проведеного аналізу, досліджень та написання літературного огляду мною були сформовані наступні висновки:

1. Резервне та аварійне паливо потрібне широкому колу вогнетехнічних об'єктів незалежно від їх розмірів;
2. Паливо важливо підбирати оглядаючись на місцеві умови (локальні поклади палива, логістика і т.д.);
3. Перевагу потрібно надавати видам палива, що відповідають наступним вимогам:
 - А. Надійність постачання (наявність палива, логістика і т.д.);
 - Б. Екологічність (низькі викиди та забруднення);
 - В. Економічність (як ринкова вартість палива, так і необхідні капіталовкладення для переведу вогнетехнічного об'єкту на даний вид палива).
4. Найбільш перспективним резервним паливом на даний момент є скраплений пропан-бутан;
5. Природний газ та пропан-бутан мають велику різницю в теплоті згорання, але обидва являються низькорекційними видами палива, що нашоєхує на думку про необхідність добавляти домішки більш високореакційних палив, та при цьому усереднювати теплоту згорання;

6. Сучасні «універсальні» пальникові пристрої мають ряд недоліків:

А. Складну конструкцію;

Б. Роздільні тракти подачі палив;

В. Неефективний робочий процес на одному з палив.

7. Набуває великого значення воднева енергетика. Водень має особливості – невеликий рівень теплоти згорання, але в той же час високу реакційну здатність.

Розділ 2. МЕТОДОЛОГІЯ ПРОВЕДЕННЯ ДОСЛІДЖЕНЬ.

Для вирішення задач сформованих в попередньому розділі, необхідно провести значну роботу по підготовці. Для початку, потрібно чітко сформулювати послідовність кроків, що будуть виконуватися.

Фізичному експерименту передувало CFD моделювання, модулів за допомогою систем SolidWorks (та надбудови SolidWorks Simulations) та Ansys. Оскільки фізичним експериментом просто неможливо охопити настільки широкі діапазони різних параметрів і умов, як при комп'ютерному моделюванні, а також відповідно затрати часу та коштів на CFD моделювання буде меншим ніж при великій кількості фізичних експериментів. За допомогою CFD моделювання простіше у порівнянні з фізичним чи математичним експериментом пройти по широкому діапазоні конструктивних та фізичних характеристик, та визначити взаємозв'язки між різними параметрами, проте важче переконатися у достовірності результатів отриманих за допомогою CFD моделювання ніж у результатах отриманих з фізичного експерименту. Тому CFD моделювання в нашому випадку потрібне в першу чергу, щоб визначити те в яких межах є сенс розглядати проведення ряду фізичних експериментів для підбору ряду необхідних параметрів. [47]

Після проведення CFD моделювання та розбору даних отриманих з нього наступним логічним кроком є почати проведення фізичних експериментів. Почати слід з найбільш низькорівневих – на модулі пальникового приладу. Модуль пальникових пристроїв це одна з складових пальника, основна частина якого складається з системи модулів розташованих в тракті. Тому перед тим, як перейти до дослідження пальникового приладу, варто ретельно дослідити саме пальникові модулі. Для цього підготовано експериментальний стенд, що розрахований саме на роботу з пальниковими модулями, на якому проведено експерименти по спалюванні різних видів палива (природний газ, пропан-бутан, та потенційно інші), визначено пересічення конструктивних характеристик, на

яких ефективно горять обидва палива, та підібрано фізичні характеристики (швидкість потоків палива та окиснювача, коефіцієнт надлишку повітря і т.д.).

Наступним кроком, є перехід до експерименту – використовуючи дані отримані з експериментів на пальникових модулях, вибрати найбільш оптимальні конструктивні розміри, а також фізичні характеристики – уточнення результатів на системі модулів, для найбільш оптимальних комбінацій. Це важливо для розуміння того, як взаємодіють між собою модулі. З його допомогою проведені все ті ж дослідження на різних видах палива, проте уже з відкоригованими відібраними конструктивні та робочими параметрами, з врахування взаємодії в системі з двома (та більше) пальниковими модулями. Крім того, важливим елементом є підбір конструктивних характеристик самого пальникового пристрою – кількість рядів пальникових модулів, коефіцієнт захаращення тракту і т.д.

Наступним дослідженням, після проведення експериментів на модулі та системі модулів, та обробки отриманих результатів, є верифікація досліджень в промислових умовах, на штатному вогнетехнічному об'єкті. Такі досліджень проводяться за тією ж методикою та з використанням точно тієї ж приладової бази.

2.1 Опис фізичної моделі робочого процесу струменево-нишевої системи.

Перед початком моделювання важливо ознайомитися з принципом функціонування струменево-нишевої системи. Вона розташована на плоскій паливоподавальній конструкції, яка також виконує роль пілона, і є основою однойменних паливоподавальних пристроїв (рис. 2.1). На ілюстрації зображені геометричні та режимні параметри цієї системи. [48]

Параметри L та $L1$ відповідають за ефективність сумішоутворення; співвідношення L/H характеризує вихрову структуру процесу аеротермічної стабілізації горіння. Найкращі результати досягаються за умов використання

відкритих прямокутних каверн з параметром L/H у межах 3–4,5. Діаметри отворів, позначені як $d \rightarrow G_r$ визначають теплову потужність системи та обираються відповідно до стехіометрії палива. Параметр S/d визначає гідродинамічну стабільність процесу горіння ($S/d=f(L_0)$); а дальnobійність струменів h_c залежить від величини S/d , діаметра d та кута q . Також h_c визначає кількість пілонів у пальнику та їх просторове розташування [1-3].

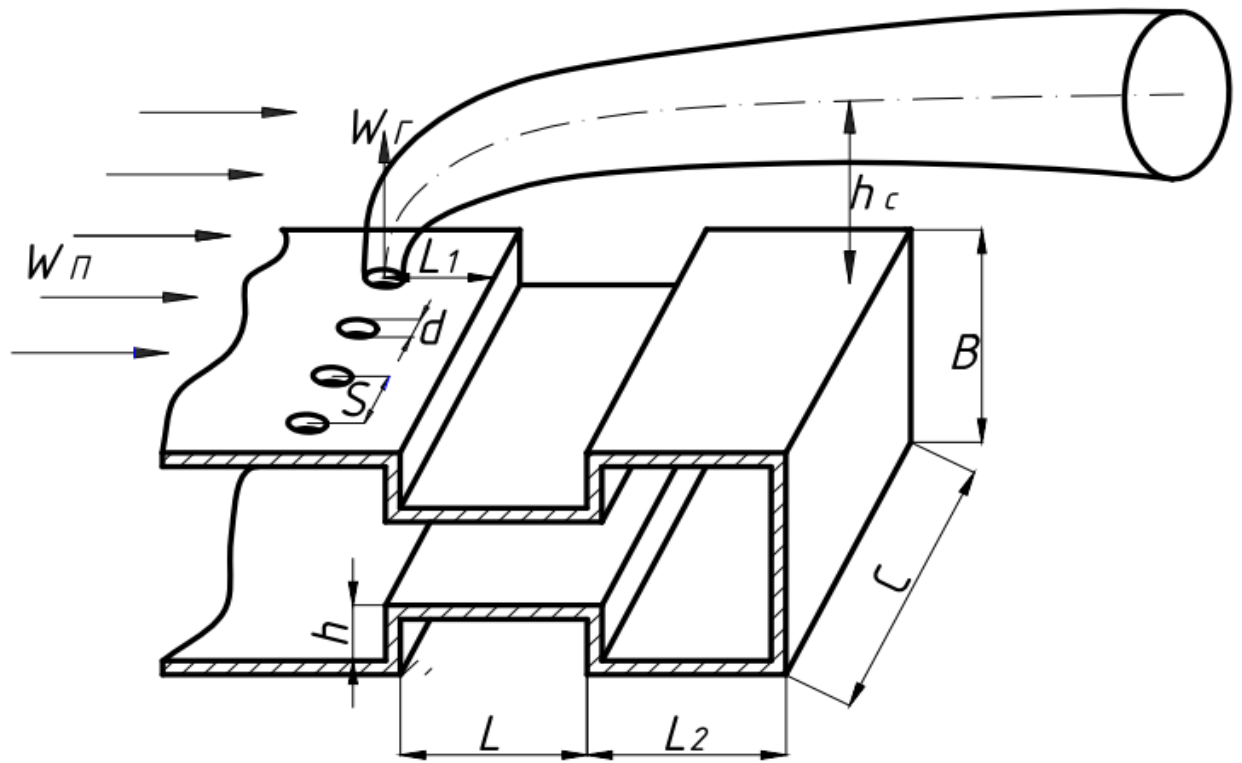


Рис. 2.1 – Струменево нішова система на плоскому стабілізаторі-пілоні.

Оптимальним режимом роботи системи є досягнення $\alpha_{зс} = 1$, що забезпечує стабільність без зривів і проривів полум'я. Критичні режими спостерігаються при крайніх значеннях витрати газу, що визначають межі стійкого горіння. Оцінка надійності роботи системи здійснюється через гідродинамічний параметр, який є універсальним критерієм стабільності.[49]

Попередні дослідження показали, що у струменево-нішевій конфігурації процес сумішоутворення має автомодельний характер у широкому діапазоні значень q . При $q < 1$ проявляється ефект Коанда, що змушує струмінь, виходячи

з отвору, притискатися до стінки. Максимальне значення q залежить від ступеня затінення каналу та фізико-хімічних властивостей палива.[50]

2.2 CFD моделювання комбінованого пальникового модуля.

Для створення першої ітерації моделі пальникового модулю, обрано уже існуючі струменево-нишеві модулі, призначені для спалювання природного газу. Такими ж вибрано і параметри робочого процесу пальникового приладу: швидкість потоку палива, окиснювача, тиск і т.д.. Очікувано що при таких параметрах, процес горіння відбувається правильно, всі параметри підходять, а пальниковий пристрій показує хороший результат, при використанні в моделюванні природного газу, як палива, для якого і створений цей модуль.[51]

Але у випадку моделювання аеродинамічних характеристик в SolidWorks Simulations при пропан-бутані результати видалися куди гіршими. Для того, щоб покращити результати, в першу чергу слід скоригувати деякі параметри, які можливо регулювати при переході з одного виду палива на інше, без необхідності в довготривалому обслуговуванні чи тим більше внесенні коректив в конструкцію модулів. Це такі параметри, як швидкість потоку окиснювача/палива, та відповідного їх кількість і відношення паливо/окиснювач, а також параметри які впливають з цих значень – тиск в трактах окиснювача/палива, і т.д. Перебираючи ці параметри, (залишивши незмінними параметри при роботі на природному газі) можливо підібрати оптимальні, або близькі до них значення.

Після цього, проаналізувавши варто переглянути вже конструктивні параметри, зміна цих параметрів, звісно ж не зможе відобразитися лише на роботі на пропан-бутані, тому ефективність роботи на природному газі незмінно зменшиться, так як при попередніх параметрах вона вже була оптимальною, а будь-які зміни відведуть її від зони оптимуму. [51]

Як було вказано раніше, щоб отримати максимальну достовірність, не можна повністю спиратися на результати комп'ютерного моделювання, тому

отримавши значення параметрів робочого процесу та конструктивних особливостей пальникового модуля, можна перевірити їх, чи справді такі гіпотетичні параметри дозволять працювати на двох видах палива підібравши значення що максимально пересікають в межах ефективної роботи на цих паливах.

Проведення фізичних експериментів, допоможе не лише верифікувати чи дійсно робота на таких параметрах є ефективною, але й перевірити ефективність при мінімальних змінах цих параметрів в різні сторони (збільшити/зменшити діаметри чи крок газоподавальних отворів, запустити вентилятор на більших чи менших обертах і т.д.) [52]

Після того, як було змодельовано пальниковий модуль та його робочий процес, варто зробити паузу та спочатку провести фізичний експеримент з модулем, а лише тоді переходити до комп'ютерного моделювання пальникового приладу, адже в результаті саме фізичного експерименту можна повністю впевнитися, в тому чи вірно був змодельований пальниковий модуль.

2.3 Лабораторне дослідження пальникового модуля при почерговому комбінованому спалюванні різних видів палива (пропан-бутан та природній газ).

Отримавши з комп'ютерного моделювання референтні значення параметрів, як і тих що відносяться до конструкції модуля, так і робочого процесу, переходимо до проведення фізичного експерименту.

2.3.1 Експериментальний стенд.

Дослідження склалися з експериментальних і розрахункових робіт, проведених у лабораторії горіння Національного технічного університету України «Київський політехнічний інститут» ім. І. Сікорського. Вивчення структури факела здійснювали спочатку для окремого струменя, а згодом — для системи струменів.

Для експериментів було розроблено спеціальний газовий колектор, що дозволяв змінювати конфігурацію подачі газу. Досліджувана струменево-нишева система модулів зображена на рисунку 2.2. Витрата повітря вимірювалася анемометрами різних типів, встановленими відповідно до рекомендацій [4,5], тоді як контроль витрати пального здійснювався за допомогою діафрагм. Температурні вимірювання на цих ділянках проводилися термопарами з хромель-алюмелю.[53]

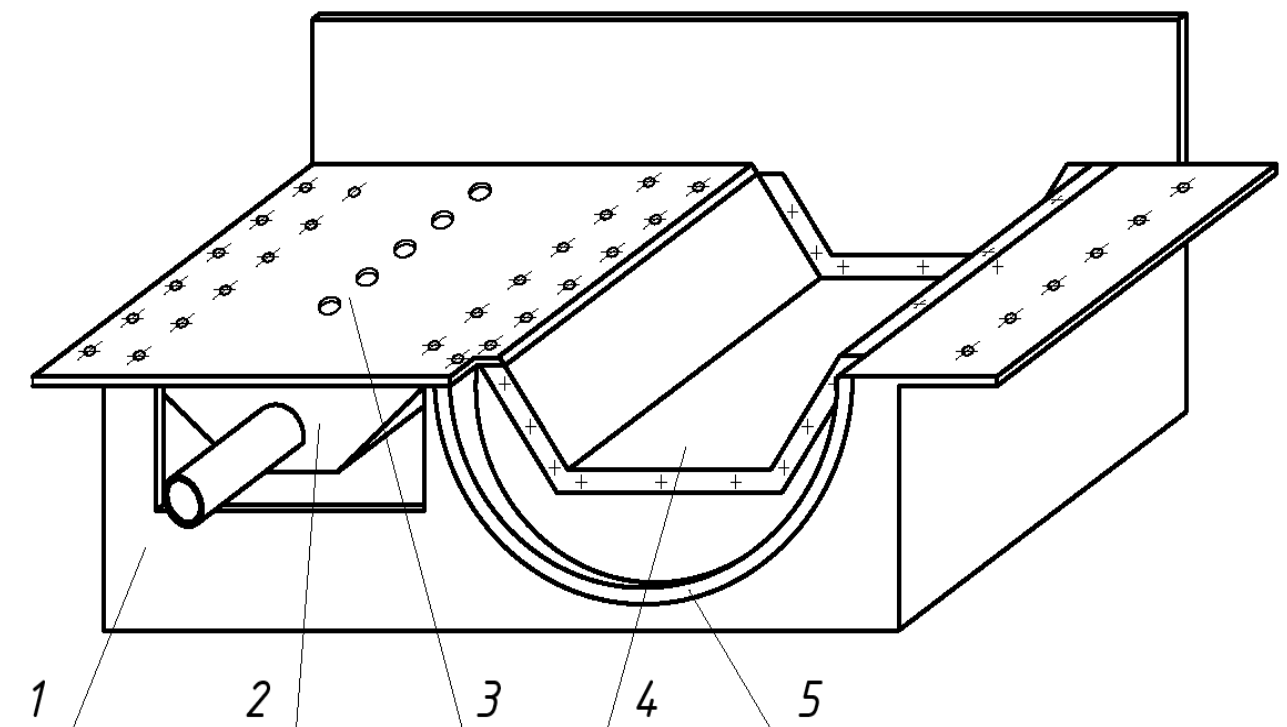


Рис. 2.2 –Блок встановлення елементів струменево-нішевого модуля:
1 – корпус; 2 –швидкозмінний газовий колектор; 3 – система круглих отворів для паливоподачі; 4 – ниша; 5 – напівфланець оглядового скла.

Температурні режими реєстрували за допомогою системи платиново-платинородієвих і хромель-алюмелевих термопар. Газоаналіз на випробувальному стенді та котельному агрегаті здійснювався за допомогою газоаналізатора моделі ОКСИ-5М.

Методика дослідження коригувалася відповідно до типу модуля, з урахуванням меж стабільної роботи пальника, які визначаються коефіцієнтом надлишку повітря при запалюванні факела та критеріями "бідного" й "багатого"

зривів. Ці коефіцієнти залежать від швидкості потоку повітря, наприклад: $\alpha^{zan} = f(W_{\Pi})$, $\alpha^{max(W_{\Pi})}$, $\alpha^{min(W_{\Pi})}$, і визначаються наступним чином:[54]

Етапи визначення:

1. Запуск компресора та встановлення мінімальної витрати повітря через пальник;
2. Запалювання суміші та виконання відповідної програми запалювання;
3. Подача газу до моменту появи полум'я за стабілізаторами і встановлення витрати газу на пальник (α_{zap});
4. Пошук моменту бідного зриву - зменшенням витрати газу до зриву факела (α_{max});
5. Момент багатого зриву, що настає зі збільшенням витрати газу до зриву факела (α_{min}).

Для визначення характеристики багатого зриву (α_{min}), спершу ініціюється запалення основного факела зі стабілізатором, після чого об'єм газу поступово збільшується. Багатий зрив реєструється у випадку повного припинення горіння або виникнення сильних пульсацій із відокремленням полум'я від стабілізатора. Фіксується досягнутий максимальний об'єм поданого газу.

Перевірка характеристик запалювання факела у пальнику здійснювалася за умови стабільної подачі повітря. Після кожного "Багатого" та "бідного" зриву відбувалося обов'язкове провітрюванням стенду протягом щонайменше трьох хвилин. Операції запалювання та контроль зривів досліджувалися шляхом поступового збільшення подачі повітря через модуль.

Коеф. надлишку повітря запалювання (α), «бідного» та «багатого» зривів можуть бути визначеними за наступними формулами: α_{zap} , α_{max} , α_{min} – а також визначається залежність від швидкості повітря даних коефіцієнтів $\alpha^{zan} = f(W_{\Pi})$, $\alpha^{max(W_{\Pi})}$, $\alpha^{min(W_{\Pi})}$.

Сконструйований лабораторний стенд (рис. 2.3) з комплектом необхідного обладнання. В ході фізичного експерименту було досліджено всі етапи робочого процесу горіння (подача палива, сумішоутворення, займання і т.д.) на окремому модулі та системі модулів.

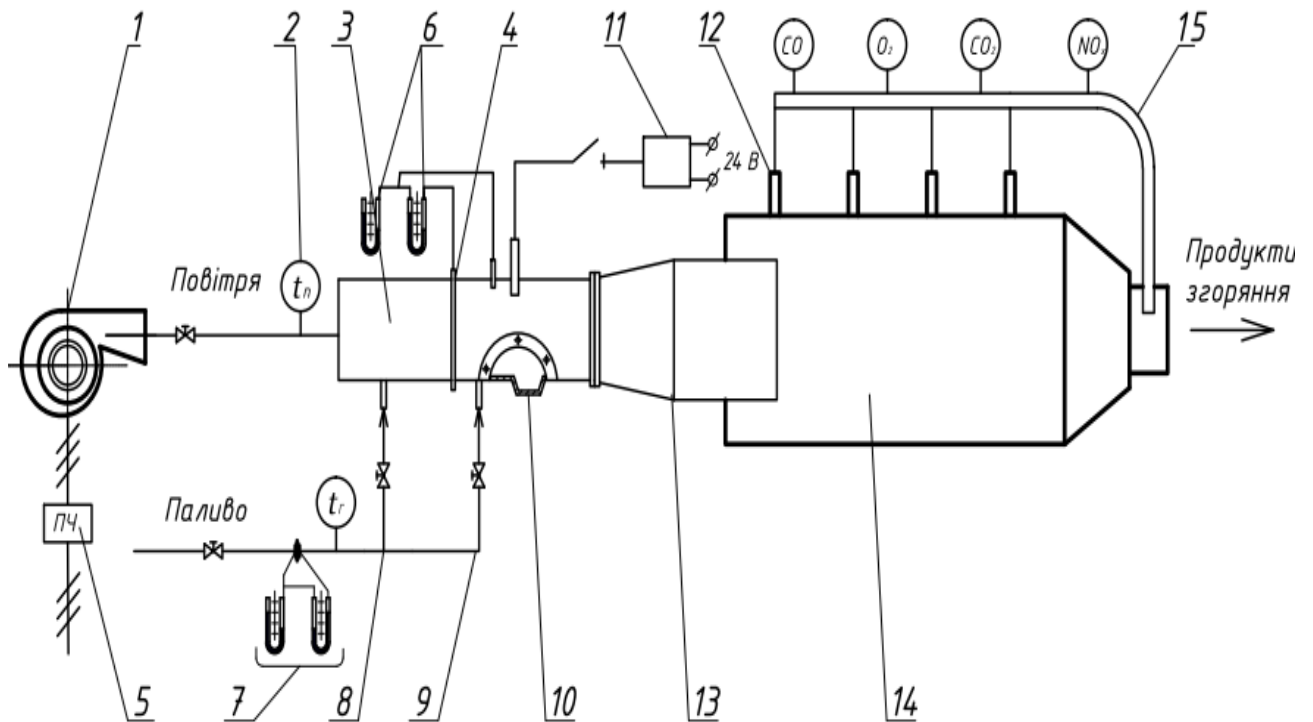


Рисунок 2.3: Схема експериментального стенду:

1 – пристрій подачі повітря (вентилятор); 2 – прилад для вимірювання температури (термометр); 3 – початкова секція стенду; 4 – вимірювальна трубка Піто; 5 – регулюючий частотний перетворювач вентилятора; 6, 7 – прилади для вимірювання тиску (манометри); 8 – система подачі пального для попереднього змішування; 9 – канал подачі палива в основний колектор; 10 – модуль струменево-нишевого типу; 11 – запалювальний пристрій (свіча запалювання); 12 – штуцери для взяття проб і температурного контролю газових потоків; 13 – дифузор для оптимізації потоку; 14 – футерований вогневий відсік; 15 – інтегральний пристрій для відбору проб.

2.3.2 Методика проведення дослідження та замірюванні значення.

Термоанемометри (див.рис.2.4.) з нагрітою ниткою перетворюють електричні сигнали у гідродинамічні параметри потоку, а їхня чутливість визначається конвективним теплообміном між потоком і датчиком. Відповідно, точність вимірювань значною мірою залежить від коректного визначення тарувальної характеристики.



Рис. 2.4 - Аеродинамічний стенд з вимірювальною апаратурою

Попередні дослідження за допомогою анемометра-термометра підтвердили однорідність швидкісного поля у зоні розташування датчиків. Швидкість повітря визначали за допомогою анемометрів. Отримана тарувальна характеристика в лінеаризованих координатах показала лінійний характер у діапазоні 2–12 м/с із максимальним відхиленням не більше 0,01%. Вона стала основою для визначення градувальних констант E_0^2 та B , необхідних для розрахунку швидкості потоку та середньоквадратичної пульсації.

Методика термоанемометричних вимірювань базується на теорії конвективного теплообміну. Вважаючи нитку циліндром нескінченної довжини, теплообмін описують рівняннями подібності, отриманими для поперечного обтікання повітрям. Це виправдано тим, що під час вимірювання поздовжніх компонент пульсацій нитка розташовується перпендикулярно до потоку. [55]

Таблиця 2.1. Засоби вимірювальної техніки, що використовувалися при дослідженні.

Назва параметру, що вимірювався	Вимірювальний прилад			
	Назва, тип, марка, зав.№, інв.№	Діапазон вимірювання	Ціна поділок	Клас точності або допустима похибка
1	2	3	4	5
Атмосферний тиск	Барометр БАММ-1 зав.№6790, інв.№2012	80-106 кПа	100 Па	±200 Па
Вологість повітря	Психрометр МВ-4М, зав.№3415, інв.№2011	30-80%	0,2%	±3%
Час досліду	Секундомір СОПР-20-9-000 зав.№7602, інв.№10.2741	0-30 хв	0,2 с	Кл.2
Витрата газу	Лічильник газовий РЛ-20-2,0 зав.№3986, інв.№10.2677	0,5-20 м³/год	0,2 м³/год	±2,5%
Температура повітря у приміщенні	Термометр ртутний скляний ТЛ-4 інв.№10.3770	0-50 °С	0,1°С	±0,2 °С
Температура газу перед лічильником	Термометр ртутний скляний ТЛ-4 інв.№10.6765	0-50 °С	0,1°С	±0,2 °С
Тиск газу перед лічильником	<u>Тяганапоромір</u> ТДЖ 2х2500 зав. № 43071, інв.№10.1835	0-2500 Па	50 Па	<u>Кл. 1,5</u>

2.3.3. Методика обробки експериментальних даних

Розрахунки виконуються відповідно до формул, наведених у спеціалізованій технічній літературі та нормативних документах [6-10]. В умовах нормального експерименту Нижча теплота згоряння палива, виражена в кДж/м³, визначається за допомогою калориметра або, якщо склад газу відомий, обчислюється за відповідною формулою.[54]

$$\begin{aligned}
 Q_H^P = & 126,4 \cdot CO + 107,9 \cdot H_2 + 358,8 \cdot CH_4 + 643,6 \cdot C_2H_6 + 931,8 \cdot C_3H_8 + \\
 & + 1227,8 \cdot C_4H_{10} + 1566,3 \cdot C_5H_{12} + 594,0 \cdot C_2H_4 + 876,1 \cdot C_3H_6 + \quad (2.1.) \\
 & + 176,2 \cdot C_4H_8 + 1487,4 \cdot C_5H_{10} + 1556,7 \cdot C_6H_6 + 233,7 \cdot H_2S \quad (2.5)
 \end{aligned}$$

Витрата газу V_{Γ} , м³/с, вимірювана за допомогою звужуючого пристрою, та розрахована за наступною формулою:

$$V_{\Gamma} = K_{\partial} \sqrt{\frac{\Delta P_{\Gamma}^{\partial}}{\rho_{\Gamma}^{\partial}}}, \quad (2.2)$$

Розрахована витрата газу V_{Γ}^H , м³/с,:

$$V_{\Gamma}^H = \frac{273 \cdot (P_{\Gamma}^{КОЛ} + P_{\partial})}{101325 \cdot (273 + t_{\Gamma}^{лич})}, \text{ м}^3/\text{с}, \quad (2.3)$$

$t_{\Gamma}^{КОЛ}$ є температурою газу, вимірюваною перед газовим колектором, °С.

$P_{\Gamma}^{КОЛ}$ є - надлишковий тиском газу перед ним же, Па;

K_{Γ} – коеф. геом. характеристик трубки;

ΔP_{Π}^{mp} - динамічна складовою тиску повітря, Па;

ρ_{Π}^{mp} це - густина окиснювача (повітря) в р.у., кг/м³ .:

$$\rho_{\Pi}^{\partial} = \frac{(P_{\partial} + P_{\Pi}^{\partial})}{(t_{\Pi}^{\partial} + 273) R_{\Pi}}, \quad (2.4)$$

t_{Π}^{Tp} - температура повітря заміряна перед трубкою Піто, °С;

R_{Π} - 281,53 Дж/(кг·К) – газова стала для повітря;

де P_{Π}^{Tp} - це тиск повітря перед інтегруючою трубкою, надлишковий Па;

Витрата повітря V_{Π}^H , м³/с :

$$V_{\Pi}^H = V_{\Pi}^{CHC} \cdot \frac{273 \cdot (P_{\Pi}^{CHC} + P_{\partial})}{101325 \cdot (273 + t_{\Pi}^{CHC})}, \quad (2.5)$$

де P_{Π}^{CHC} це - тиск надлишковий повітря перед струменево нішевою системою, Па;

t_{Π}^{Π} є температурою повітря перед СНС, °С.

Теплова потужність N_{Π} , кВт :

$$N_{II} = V_F^H \cdot Q_H^P. \quad (2.6)$$

Коеф. надлишку повітря α може бути розрахований згідно з формулою:

$$\alpha = \frac{V_{II}^H}{L_0 \cdot V_F^H}, \quad (2.7)$$

де L_0 - є стехіометричним об'ємом повітря в процесі горіння природнього газу, м³/м³:

$$V_0 = \frac{1}{21} [0,5H_2 + 0,5CO + 2CH_4 + 3,5C_2H_6 + 5C_3H_8 + 6,5C_4H_{10} + 3C_2H_4 + \\ + 4,5C_3H_6 + 6C_4H_6 - O_2]. \quad (2.8)$$

2.3.4 Методики та принципові схеми експериментального стенду для дослідження робочого процесу. Опис експериментального стенду

Принцип роботи експериментального стенду заснований на подачі повітря вентилятором 1 із частотним регулятором, що забезпечує контроль витрат без шибєрної заслінки.

Потік повітря спрямовується до "заспокоюючої" ділянки 3, оснащеної звужуючим пристроєм 4 для вимірювання витрат, а далі – до робочої зони 7, обкладеної вогнетривким матеріалом. Перепад тиску у струменево-нішевому модулі 6 фіксується дифманометром, а конструкція стенда дозволяє змінювати ці модулі залежно від типу випробувань.

Температура контролюється термопарами 8 для елементів та термометром 2 для повітря. Газовий тракт обладнаний манометром і дифманометром для вимірювання тиску та перепаду тиску. Запалювання суміші здійснюється електричним запальником з напругою 27 В. [56-57]

2.3.5 Методики дослідження сумішоутворення в струменево-нішовому модулі.

Для оцінки ступеня сумішоутворення та аналізу механізму горіння при гомогенізації паливної суміші була розроблена методика та експериментальний стенд. Їхня концепція ґрунтується на зв'язку між рівномірністю сумішоутворення та стійкістю горіння на малих стабілізаторах полум'я, рівномірно розташованих у потоці паливної суміші.[58]

У конструктивному плані це реалізовано наступним чином: після гомогенізатора, далі за потоком повітря, встановлюється пластина з рівномірно розташованими отворами. Якщо відстань між нею та гомогенізатором є достатньою для утворення однорідної паливно-повітряної суміші, процес горіння залишається стабільним, а за отворами формуються рівномірні фронти полум'я у вигляді конусів. Однак, при зменшенні цієї відстані до певного критичного значення починається нерівномірний розподіл складу суміші: у частині отворів полум'я періодично згасає, що негативно впливає на стабільність процесу горіння. Визначена мінімально допустима відстань вважається критично необхідною для повної гомогенізації суміші. [59]

Експериментальні дослідження підтверджували ці результати за допомогою газового аналізу в ізотермічних умовах. Оцінка процесу сумішоутворення здійснювалася шляхом відбору проб метану за допомогою зонда-газоаналізатора «Газохром».

Аналіз масообміну між нішовою порожниною та обтічним потоком проводився за методикою Лефевра, яка передбачає порівняння витрати газу в нішову порожнину при зриві горіння та при рівномірному його розподілі в потоці. Вигорання паливної суміші досліджувалося як на експериментальних стендах, так і на промислових установках із застосуванням газоаналізатора «ОКСИ-5М».[60]

2.4 Розробка промислової моделі пальникового приладу при почерговому комбінованому спалюванні різних видів палива (пропан-бутан та природній газ)

Після проведення розрахунків, та експерименті і визначення підходящих конструктивних параметрів струменево-нишевого модуля, стоїть задача створення на його основі промислової моделі пальникового приладу.

Ця задача значно об'єднується тим, що більшість пальникових приладів сконструйованих на основі струменево-нишевої технології опираються на принцип модульності. Тобто для створення пальникового пристрою на основі пальникового модуля необхідно лише підібрати правильну кількість рядів та стовпців модулів, та переріз січення тракту повітря враховуючи коефіцієнт захарашення потоку. Звісно, ця задача куди важча ніж звучить, адже в умовах реального використання таких пальників на промислових об'єктах, необхідно брати до уваги і автоматизацію, і безпеку, а також проходити сертифікацію та підтверджувати еколого-економічні показники.[61]

Проте на етапі промислових випробувань цим можна знехтувати.

2.5 Експериментальний промисловий об'єкт.

Для дослідження пальникового приладу в умовах близьких до промислових, було обрано промислову установку по газифікації в місті Калуш. Вона підходить для задач такого типу, так як, експериментальний стенд. Пальник було вироблено з урахуванням, підвищеного рівня небезпеки при випробуваннях.

Такі установки все частіше використовуються задля виготовлення альтернативних газів в рамках диверсифікації паливної бази.

В якості пальникового приладу для експерименту в промислових умовах було використано експериментальний стенд з декількох модулів, які були підібрані для максимально ефективної роботи на пропан-бутані та природному газі. Ці модулі були об'єднані в струменево-нишеву систему, в якій були взяті до

уваги, скориговані конструктивні параметри пальникових модулів, а також вибрано відстань між модулями та параметри робочого процесу горіння, як швидкість потоку палива та окиснювача.

Крім цього, експериментальний пальниковий пристрій був споряджений всім необхідним для випробувань – запальником, регулюючими та запірними клапанами, рядом вимірювальних приладів і т.д. (див.рис.2.4)

Заміри більшості параметрів, що стосуються власне установки, а не пальника, проводилися за допомогою штатного обладнання установки.

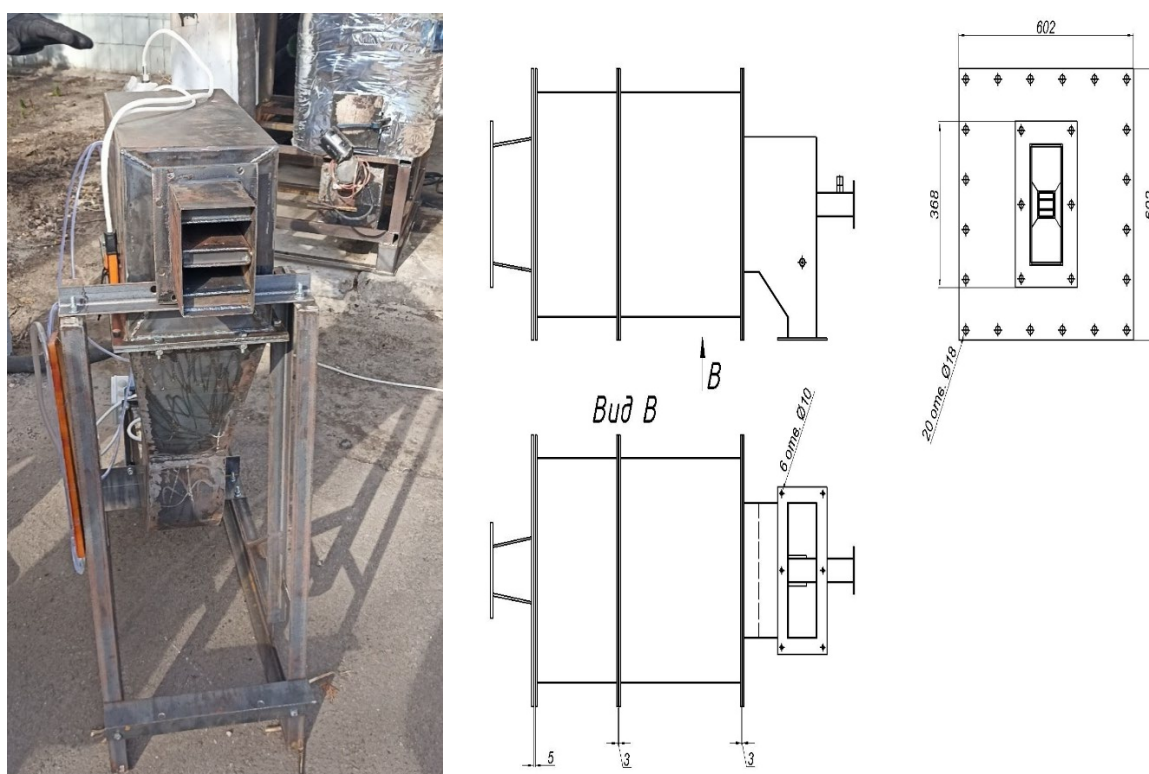


Рис. 2.4. Експериментальна модель комбінованого струменево-нишевого пальникового пристрою.

2.5.1. Методика проведення досліджень

На основі поставлених завдань, проведено ряд дослідів із застосуванням сучасної методології дослідження гідро-термо-хімічних процесів. Основна мета цієї методики полягає в дослідженні сумішоутворення та аеродинаміки в ізотермічних умовах на всіх етапах робочого процесу пальникових пристроїв, що

використовують пропан-бутан та природний газ, в промислових умовах на реальному промисловому об'єкті. Дослідження проводилися у широкому діапазоні змін режимних і конструктивних параметрів.

Особлива увага приділялася вивченню структур течії за системою струменів, особливо в зоні ближнього сліду за поганообтічними тілами, що впливають на рівномірність температурного й швидкісного полів, стійкість горіння та гідравлічний опір робочого процесу. Змінюючи режимні параметри, спостерігали взаємодію структури течії з процесами горіння та теплообміну, що визначало повноту згоряння та стійкість полум'я.

2.5.2 Методика обробки експериментальних вимірювань еколого-економічних показників роботи вогнетехнічних об'єктів

Оцінка техніко-економічних характеристик котла здійснювалася відповідно до загальноприйнятої методики тестування котельних установок [52,62,63]. Значення коефіцієнта корисної дії (ККД) у брутто-форматі розраховувалося шляхом застосування методу зворотного балансу.

$$\eta_{к.бр.} = 100 - q_2 - q_3 - q_5. \quad (2.9)$$

q_2 - втрати теплоти з газами, що відходять %:

$$q_2 = \frac{T_{від.} - L \cdot T_{х.н.}}{T_{max}} [C + (h - 1) \times K \times B], \quad (2.10)$$

де $T_{від}$ - температура газів, що відходять в точці балансу,

$^{\circ}\text{C}$; $T_{х.н.}$ - температура повітря, $^{\circ}\text{C}$; h - коефіцієнт об'єму димових газів, %.

$$q_3 = 3,12 \cdot CO \cdot h, \quad (2.11)$$

CO - концентрація оксиду вуглецю в об'ємі, %.

$$q_5 = q_{5ном} \frac{D_{ном}}{D_{фак}}, \quad (2.12)$$

де $q_{5ном}$ - витрата тепла на номіналі, %;

D_{ϕ} - навантаження котла дійсне.

Екологічна частина виконана згідно методики. [65]

Масова концентрація оксидів азоту в відхідних газах, яка виражена у перерахунку на визначений параметр, обчислюється за наступною формулою:[63]

$$C_M = C_{OB} \cdot 1_{PPM}, \quad (2.13)$$

де C_{OB} - концентрація CO, що визначається за аналізу димових газів.

Масова концентрація шкідливих речовин у відхідних димових газах, приведена до нормальних умов (0 °C, 760 мм рт. ст.), визначається з урахуванням коефіцієнта надлишку повітря. $\alpha = 1$:[62]

$$C_{CO\alpha=1} = 446,4 \cdot M \cdot Y \cdot h, \quad (2.14)$$

де Y — об'ємна концентрація оксиду вуглецю в процентному співвідношенні; h — коефіцієнт розбавлення продуктів горіння; M — молекулярна маса оксиду вуглецю.[63]

Питомі викиди оксидів на одиницю виробленого тепла (1 ГКал) обчислюються за такою формулою:

$$B = \frac{3,6 \cdot C_{\alpha=1} \cdot 100}{a \cdot \eta_{БР}}, \quad (2.15)$$

де $\eta_{БР}$ - ККД котлоагрегата, %; a - відношення калорійності палива до об'єму продуктів згорання, ккал/м³. [54]

Найбільше можливе значення викидів оксидів від агрегату, г/сек:

$$C_{сек} = \frac{B_{MAX} \cdot Q_{Г}}{3600}, \quad (2.16)$$

де $Q_{Г}$ – тепло, що було вироблене котлом, Гкал/год;

B_{MAX} - мак. емісія оксидів, мг/Гкал.

де T_{TP}' - температура димових газів, які виходять з труби, °С;

ΔT_{TP} - зниження температури газів на 1 м димаря, °С/м;

$\Delta T_{ДХ}$ – різниця в падінні температури від димососа до димаря, °С.[63]

Падіння температури газів:

$$T_{mp}' = \frac{B_{T1} \cdot \alpha_{ВИХ1} \cdot T_{ВИХ1} + B_{T2} \cdot \alpha_{ВИХ2} \cdot T_{ВИХ2} \dots}{B_{T1} \cdot \alpha_{ВИХ1} + B_{T2} \cdot \alpha_{ВИХ2} \dots} \quad (2.17)$$

де B_T - витрата натурального палива, м³/год; $\alpha_{ВИХ}$ - надлишок повітря за димососом кожного котла; $T_{ВИХ}$ - температура газів за димососом кожного котла, °С.

Падіння температури від димососа до димаря:

$$\Delta T_{TP} = \Delta t_{TP} \cdot H_{TP}, \quad (2.18)$$

де Δt_{TP} - падіння температури газів по висоті димаря, °С; H_{TP} - висота труби, м.

Падіння температури по висоті димаря розраховується по формулі:

$$\Delta t_{TP} = 0,4 \sqrt{D}, \quad (2.19)$$

де D - еквівалентна величина:

$$\sqrt{D} = \frac{\sqrt{Bm \times Q_{PH}}}{822} \quad (2.20)$$

Визначення об'єму димових газів на виході з гирла димової труби за секунду, м³/с:

$$V_{TP} = \frac{\sum B [V_{Г}^0 + V_{П}^0 (\alpha_{ВИХ}' - 1)] \times \rho_H}{3600} \times \frac{273 + T_{TP}'}{273} \times \frac{760}{P_0}, \quad (2.21)$$

де $V_{Г}^0$, $V_{П}^0$ - об'єми продуктів згорання і об'єми повітря потрібні для спалювання 1 кг палива, нм³/кг; ρ_H - густина природного газу (без вологи) н.у., кг/нм³.

Швидкість емісії шкідливих речовин з димаря :[63]

$$W_{TP}^{//} = \frac{V_{TP}}{f_{ГИР}}, \quad (2.24)$$

де $f_{ГИР}$ «живий» перетину гирла димаря, m^2 .

Концентрацію компонентів CO' та NO'_x у розрахунку на вміст $O_2=a$ (% об.) в продуктах згоряння $X_{(O_2=a)}$ розраховують за формулою (2.24) [54]

$$X_{(O_2=a)} = K \cdot X, \quad (2.25)$$

де замість X підставляють відповідно CO' , NO'_x .

Для продуктів повного горіння

$$K = \frac{21-a}{21-O_2'}. \quad (2.26)$$

Для продуктів неповного горіння [54]

$$K = \frac{21-a}{21-(O_2'-0,5 \cdot CO'-0,5 \cdot H_2'-2 \cdot CH_4')}. \quad (2.27)$$

2.6 Дослідження пальникового модулю, при роботі на паливі з домішками водню.

Для проведення даного експерименту було модернізовано стенд, що передбачує використання водню в ньому. Використання водню супроводжується значним підвищенням вибухонебезпеки в приміщенні, де використовується експериментальний стенд. [65]

Через це було вирішено відмовитися від відповідного експерименту в промислових умовах, а також було прийнято додаткових заходів безпеки в лабораторії, що значно ускладнило лабораторний стенд. (див.рис.2.5-6.) [66]

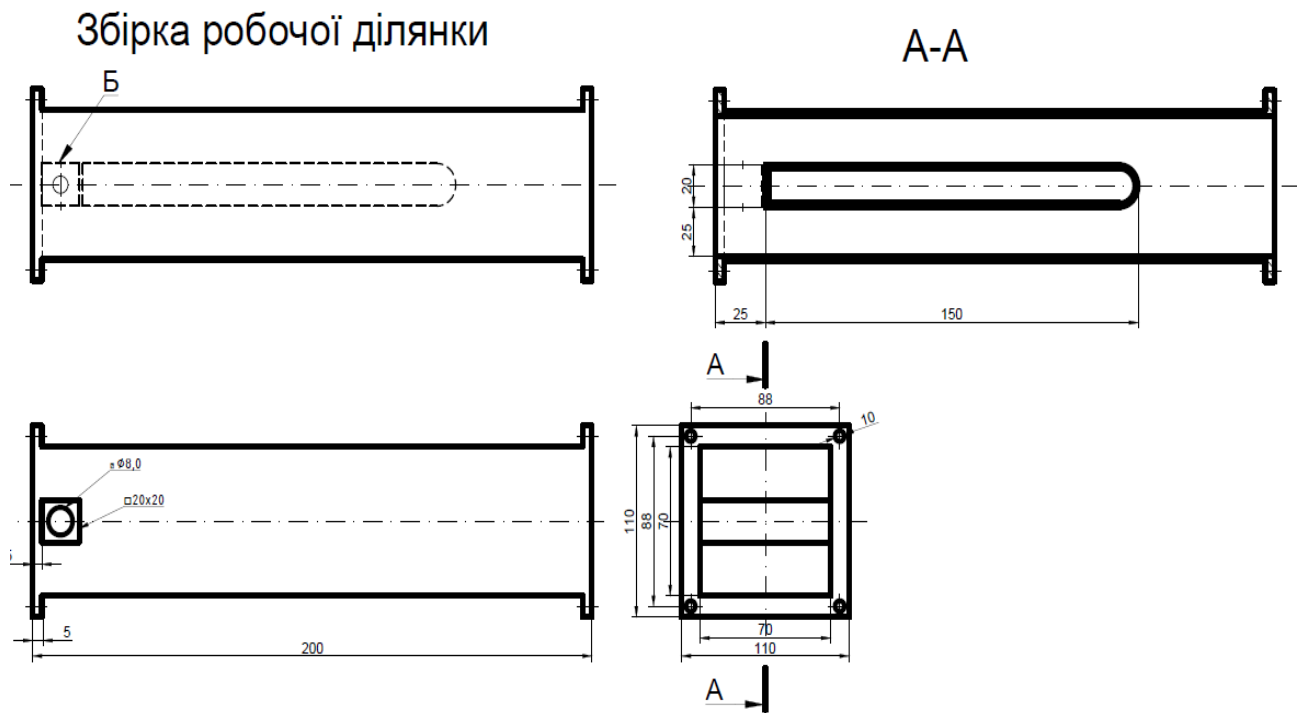


Рис. 2.5 Схема робочої ділянки експериментального стенду зі спалювання палива з домішками водню.

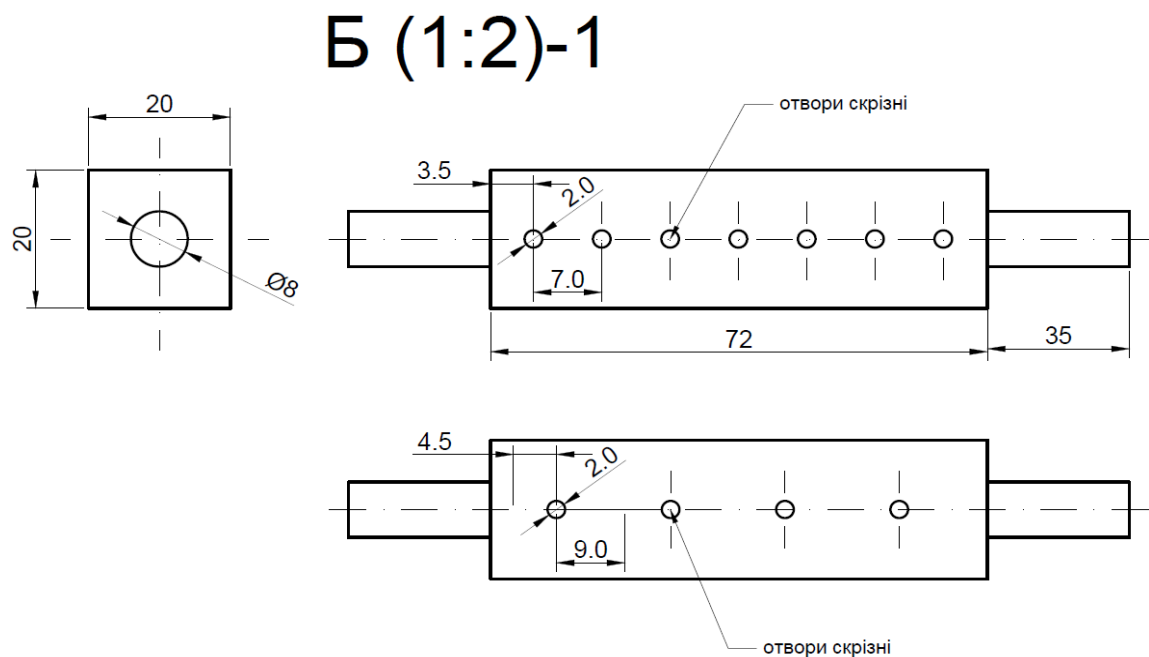


Рис. 2.6 Креслення фізичної моделі модуля пальникового приладу експериментального стенду зі спалювання палива з домішками водню.

В ході експериментів при спалюванні палива з домішками водню, першочерговою задачею є саме визначення процентного відношення суміші. При виборі конструктивних параметрів, а також характеристик робочого процесу, було прийняте рішення опиратися в основному на параметри та характеристики, отримані з попередніх фізичних експериментів та комп'ютерних моделей. Так як перед цим було проведено значну кількість таких експериментів та моделювань, результати будуть більш наближеними до шуканих, навіть враховуючи загальне ускладнення схема функціонування приладу, завдяки окремій системі подачі водневого палива. [66]

2.7 Робота з похибками.

2.7.1 Похибка вимірювання температури повітря

Під час досліджень для окиснення використовувалася атмосферна повітряна суміш, що була доступна в лабораторії. Температура повітря вимірювалася за допомогою рідинного скляного термометра. Точність вимірювання температури визначалася з урахуванням дослідно-інструментальної похибки та похибки зчитування, які обчислювались окремо.

$$\sigma(T) = \sqrt{\left(\frac{\Delta}{3}\right)^2 + \left(\frac{\Delta}{\sqrt{12}}\right)^2 + \theta^2(T)} = \sqrt{7\left(\frac{\Delta}{6}\right)^2 + \theta^2(T)}, \quad (2.28)$$

де, Δ – поділка термометра, яка складає $0,5^\circ\text{C}$; $\theta(T)$ – є випадковою похибкою температури, з врахуванням коефіцієнта Стюдента що складає $0,1$. В такому випадку, похибки вимірювання будуть рівними: $\sigma(T) = 0,26^\circ\text{C}$ з величиною довірчої ймовірності $P=0,95$. [54]

2.7.2 Похибка вимірювання атмосферного тиску

В дослідженні використовувалися барометри БАММ-1, які мають низьку точність ($\delta(P) \leq 500 \text{ Па}$). Через це, правки в розрахунках не внесені. З огляду на те, що приладова похибка цього барометра значно перевищує похибку зчитування, можна писати:

$$\sigma(P) = 500 \text{Па} \quad (2.29)$$

2.7.3 Похибка визначення витрати палива

Розхід рідини пропорційний перепаду тиску та виходить зі співвідношення:

$$m = \alpha \delta F_o \sqrt{2\rho \Delta P}, \frac{\text{кг}}{\text{с}} \quad V = \alpha \delta F_o \sqrt{\frac{2}{\rho \Delta P}}, \frac{\text{м}^3}{\text{с}} \quad (2.30)$$

де m і V , у відповідності до, масової та об'ємної витрати;

ρ - густина; δ - поправочний множник на розширення вимірюваного середовища;

α - коефіцієнт, що залежить від конструкції звужуючого пристрою. [22,23]

В умовах вимірювання, приймається, що величина δ стала. Тому вираз для об'ємної та масової витрат записується:

$$V = c \sqrt{\frac{\Delta P}{\rho}}; m = c' \sqrt{\rho \Delta P} \quad (2.31)$$

Похибка вимірювання витрати включає помилки визначення c , ρ і ΔP .

Значення c вираховується, при проведенні тарувальних дослідів з використанням сопла Вітошинського з похибкою 3-4%.

Густина повітря визначається по рівнянню стану $\rho = \frac{P}{RT}$. Точність визначення густини залежить від точності визначення тиску P , температури T і газової сталої R :

$$\sigma(\rho) = \rho \sqrt{\left[\frac{\sigma(P)}{P}\right]^2 + \left[\frac{\sigma(T)}{T}\right]^2 + \left[\frac{\sigma(R)}{R}\right]^2}, \quad (2.32)$$

це відповідає формулі для дослідно-інструментальної помилки:

$$\delta(\rho) = \rho \sqrt{\left[\frac{\delta(P)}{P}\right]^2 + \left[\frac{\delta(T)}{T}\right]^2 + \left[\frac{\delta(R)}{R}\right]^2}. \quad (2.33)$$

Так як $\frac{\delta(R)}{R} = \frac{\sigma(R)}{R} = 0,0001$, $\delta(P) = 400$ Па для барометра ВР-52 і $\sigma(T) = 0,24$ К (паливо використовувалось з параметрами навколишнього середовища) при використанні ртутного термометра з ціною поділки 0,5 К, то:

$$\frac{\delta(\rho)}{\rho} = \sqrt{(4 \cdot 10^{-3})^2 + (4,8 \cdot 10^{-3})^2 + (1 \cdot 10^{-4})^2} = 6,2 \cdot 10^{-3} \quad (2.34)$$

а повна похибка визначення витрати становитиме:

$$\begin{aligned} \frac{\delta(\bar{V})}{\bar{V}} = \frac{\delta(\bar{m})}{\bar{m}} &= \sqrt{\left[\frac{\delta(c)}{c}\right]^2 + \frac{1}{4} \left[\left(\frac{\delta(\rho)}{\rho}\right)^2 + \left(\frac{\delta(\Delta P)}{P}\right)^2 \right]} = \\ &= \sqrt{0,04^2 + \frac{1}{4} \left[(6,2 \cdot 10^{-3})^2 + \left(\frac{4}{240}\right)^2 \right]} = 0,041. \end{aligned} \quad (2.35)$$

2.7.4 Похибка вимірювання температури у факелі

Під час дослідження температур у факелі та пальників системи застосовувався термопарний елемент (ТЕП) без захисного кожуха та камери для гальмування. Необхідно враховувати всі можливі похибки, що виникають при вимірюванні температури в умовах високошвидкісного газового потоку.[54]

Однією з важливих похибок є вплив теплового випромінювання від спаїв термопари, які розраховується за спеціальною методикою.

$$\Delta T = \frac{\sigma \varepsilon_{men}}{\alpha_{men}} (T_{men}^4 - T_c^4), \quad (2.36)$$

Оскільки вимірювання проводились при режимах з низькою глибиною вигорання палива, вони супроводжують утворенням шару сажі на корольку ТЕП, можна вважати коеф. чорноти спаю $\varepsilon_{men} \approx 1$. Варто зазначити, що в умовах недопалу похибка вимірювань збільшується.

Коефіцієнт тепловіддачі при обтіканні потоком робочого спаю термопари, виконаного у формі сферичного королька діаметром [значення] мм, визначається

за допомогою критеріальних рівнянь теплообміну: $\alpha_{men} = \frac{\lambda}{d_k} Nu$; $Nu = 0,216 Re^{0,62}$, (2.37)

де: число Рейнольдса обчислюється, як $Re = \frac{W d_c}{\nu}$, а всі параметри потоку відносяться до точки вимірювання і визначаються по таблицям.

Адже швидкість потоку є дозвуковою, в той час, як робочий спай термопари розташовано на відстані 25 мм від держака датчика (що відповідає приблизно 55 діаметрам термоелектричних проводів), можна знехтувати похибками, пов'язаними з неповним гальмуванням потоку та втратами тепла через термоелектроди. Ураховуючи похибку калібровки та ті похибки, що виникають через підключення термопари до схеми вимірювань, в то й час як випадкова похибка дорівнює 3 К. Похибка, що занижує температуру, становить 80К, а отже, до 5%, що є допустимим результатом.

2.7.5 Похибка вимірювання екологічних характеристик

Емісійний аналіз струменево-нішевих модулів проводився в лабораторних умовах з використанням газоаналізатора ОКСИ-5М. Метрологічні характеристики похибок визначення концентрацій CO, NOx та O2 відповідають технічній документації приладу.

Похибка вимірювання CO становить 10% в діапазоні 0...200 ppm та 5% в діапазоні 201...2000 ppm, з роздільною здатністю 1 ppm. Похибка вимірювання NOx становить 5% в діапазоні 0...2000 ppm, з роздільною здатністю 1 ppm. Похибка вимірювання O2 становить 0,2% від виміряного значення, з роздільною здатністю 0,1%.

2.7.6. Оцінка похибки вимірювання (експеримент з палинковим приладом)

Метрологічна оцінка похибок вимірювання окремих фізичних величин проводилася з метою визначення достовірності експериментальних даних.

Похибки вимірювання пульсацій напруги ε та напруги моста E склали $\pm 0,5\%$ та $\pm 0,2\%$ відповідно.

Похибка вимірювання опору датчика становила $0,05$ Ом, що відповідає максимальній відносній похибці $\varepsilon_{rw} \pm 0,8\%$.

Значення E_{20} було отримано шляхом побудови калібрувальної кривої насадки з відносною похибкою не більше $\pm 2\%$.

Гідродинамічні характеристики потоку, а саме число Рейнольдса та ступінь турбулентності, були визначені з відносними похибками $\pm 2,7\%$ та $\pm 3,3\%$ відповідно.

Таким чином, відносна похибка вимірювання ступеня турбулентності становила $\pm 3,3\%$, а середньої швидкості – $\pm 2,4\%$

2.7.7. Похибка визначення температури. (пальниковий прилад)

Так, як відстань до гарячого спаю від корпусу термопари L_t є великою ($L_t/d_t > 10$), відвід тепла за допомогою теплопровідності в термоелектроди не враховувався. Показники термопар коректувалися лише на втрати тепла від гарячого спаю за допомогою випромінювання. Температура потоку газу вираховується за формулою [33]:

$$T = T_1 + C(T_2 - T_1), \quad (2.38)$$

де: T_2 і T_1 - температури, що відповідають показникам термопар із діаметрами спаїв d_2 і d_1 , К;

C_t - коефіцієнт, що враховує вплив випромінювання термопар.

C_t визначається:

$$C_t = \frac{1}{1 - (d_1/d_2)^{1-m}}, \quad (2.39)$$

В умовах дослідження m складало $0,04$, а поправки до температури - $70-90$ К.
[33]

Похибка у визначенні температури газового потоку за показниками двох термопар визначається формулою :

$$\Delta T = 2 \cdot C + 1 + 0,4 \cdot (T_2 - T_1), \quad (2.40)$$

і складає для цього методу біля 25К.

2.8 Висновки до другого розділу.

На основі проведеного дослідження можна сформулювати такі висновки:

1. Розроблений метод надає можливість обчислювати параметри робочого процесу пального пристрою в широкому діапазоні режимів, а також аналізувати дані еколого-теплотехнічних випробувань котлів, проведених в промислових умовах.
2. Аналіз похибок експериментальних вимірювань показав, що визначення витрати та температури потоків палива й окислювача, параметрів турбулентності та середньої швидкості в каналі здійснювалося з точністю не менше 95% при довірчій ймовірності $P = 95\%$. Концентрація оксидів у продуктах згоряння вимірювалася з похибкою, що не перевищує 5%, тоді як похибка непрямих розрахунків балансового коефіцієнта надлишку повітря не перевищувала 13%.
3. Методологія побудови регресійних залежностей, що базується на ротабельному центральному композиційному плануванні експерименту, гарантує:
 - Дослідження впливу параметрів на робочі характеристики пального пристрою, з оцінкою внеску кожного параметра за допомогою поліномів.
 - Визначення можливості створення паливних пристроїв із заданими характеристиками в досліджуваному факторному просторі та реалізацію необхідних експлуатаційних вимог.

- Встановлення можливості використання методів планування експерименту для визначення зривних і пускових характеристик газопальникових пристроїв, що сприяє вибору оптимальних геометричних параметрів паливорозподілу.

Розділ 3. ТРИВИМІРНЕ КОМП'ЮТЕРНЕ МОДЕЛЮВАННЯ СТРУКТУРИ ТЕЧІЇ ТА СУМІШОУТВОРЕННЯ СТРУМЕНЕВО-НІШОВИХ КОМБІНОВАНИХ ПАЛЬНИКОВИХ МОДУЛІВ.

Струменево-нішева система, інтегрована у конструкцію плоского паливоподавального колектору-пілона, є базовим елементом однойменних паливних пристроїв (ПП). У попередніх дослідженнях було визначено, що конструктивні характеристики системи суттєво впливають на ключові параметри робочих процесів пальників.

3.1 Види струменево-нішових модулів. Конструкційні параметри струменево-нишевого пальникового модуля.

Перед тим, як приступити до безпосереднього проведення фізичного експерименту, по раніше сформованій методиці, необхідно попередньо провести комп'ютерне моделювання. Це дозволить екстраполювати конструктивні розміри майбутнього стенду а також такі параметри як витрата пропану/природного газу, повітря, їх швидкість і т.д. [68]

За основу для комп'ютерних моделей було взято уже існуючі моделі струменево-нішових пальникових приладів. Найбільший інтерес представляють собою пальникові модулі, які є основною струменево-нишевих пальникових пристроїв.

На рисунку зображено (див.рис.3.1.) один з базових струменево-нишевих модулів. Керуючи цими конструктивними значеннями, можна значно видозмінювати конструкцію модуля, тим самим створюючи нові варіанти, що краще підходять під поставлену задачу. Виходячи з досліджень конструкції

пальникових модулів та робочого процесу струменево-нишевих пальникових пристроїв, проведених Абдуліним М.З. і Сірим О.А. сформовані залежності одних параметрів від інших (див. табл. 3.1)[25,54]

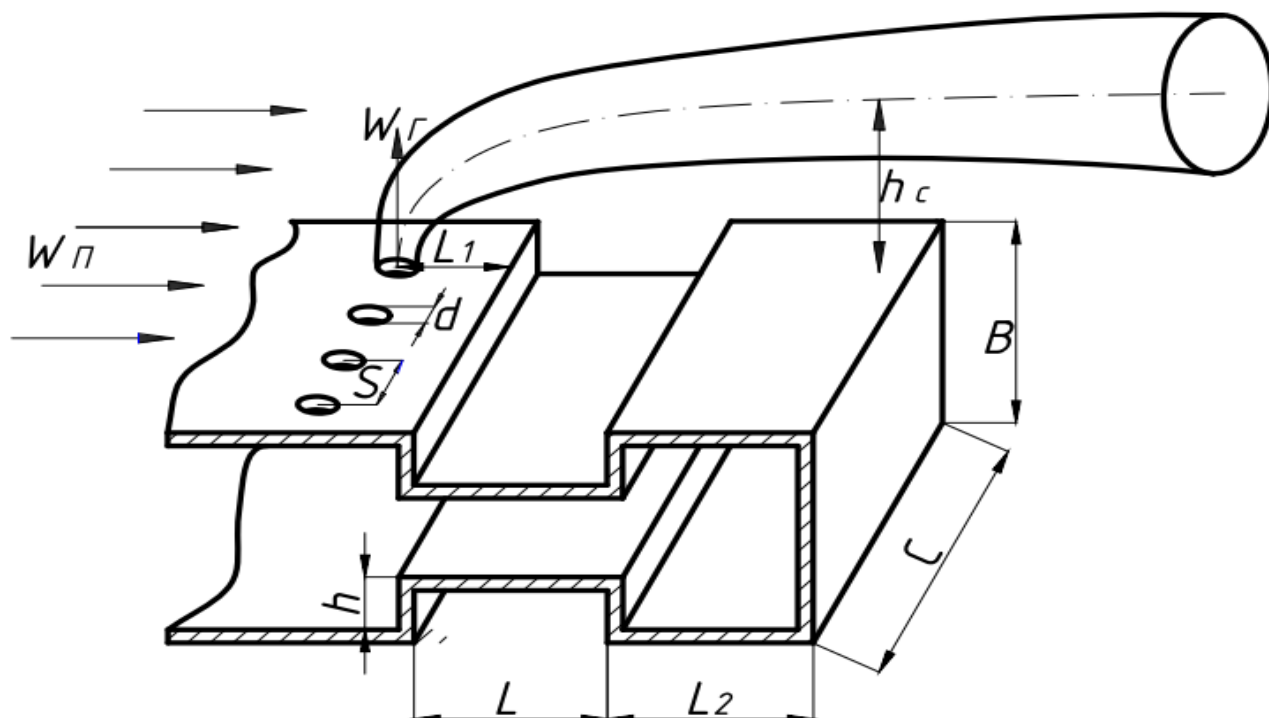


Рисунок 3.1. Схема струменево нішевого модуля, де C – ширина модуля; d – діаметр отвору, що подає паливо, S – крок між отворами, L_1 – відстань між отворами до ниші, L – довжина ниші, h_c – далекобійність модуля, B – висота модуля.

Таблиця 3.1 Найважливіші конструкційні та режимні характеристики струменево-нишевих модулів та їх вплив на решту показників.

$W_{\text{п}}$ - Швидкість окиснювача	$W_{\text{г}}$ - Швидкість палива	L - Ширина ніші
Інтенсивність турбулізації потоку (ϵ)	Далекобійність струменя (h_c), об'єм циркуляційних зон ($V_{\text{ззт}}$)	Розміри зон зворотного току ($L_{\text{ззт}}$)
L_1 - Відстань паливоподавальних отворів до ніші	d - Діаметр отворів паливоподачі	s/d - Відносний крок отворів
Гомогенізації паливної суміші (η_r)	Теплова потужність (Q_T) модуля	Середня масова концентрація палива ($C_{\%}$) в зоні зворотних токів

Конструкція пальникових модулів може значно варіюватися залежно від типу палива, для якого вони призначені, їхньої потужності та інших параметрів. У деяких випадках відмінності між модулями є суттєвими, тоді як в інших вони менш виражені.

З рисунку (див. рис. 3.2) можна побачити, що для зміни аеродинамічних характеристик пальникового модуля не завжди потрібно повністю змінювати його конструкцію. Достатньо модифікувати окремі елементи, наприклад нішу, що може впливати на ефективність самоохолодження модуля або розташування зон зворотних потоків. Ніші можуть мати різну геометрію, що безпосередньо позначається на параметрах роботи системи.

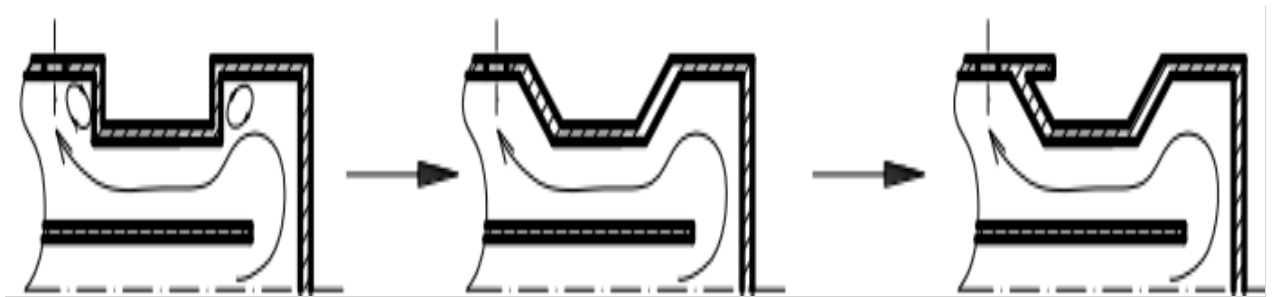


Рисунок 3.2 – Різновиди нішевої порожнини.

Як показали проведені дослідження конструкційні та режимні параметри тісно пов'язані в один складний комплекс і зміна в одному з них призводить до доволі значущих змін в інших.

3.2 Режимні параметри роботи пальникового модуля.

Зміни швидкості (W_o) та витрати окиснювача (G_o), швидкості (W_n) та витрати палива (G_n), тиску (P_n) та температура палив (T_n) й окиснювача (T_o) і т.д. приводять до відчутних змін в режимі роботи пальникового приладу, що також помітно на рівні окремо взятого модуля. (див. рис. 3.3)

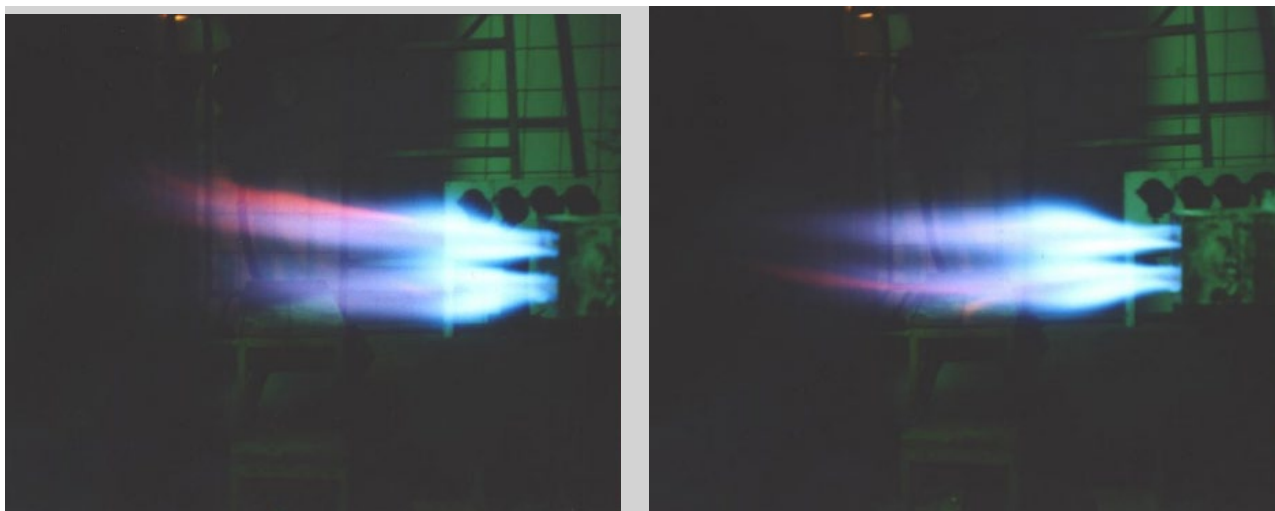


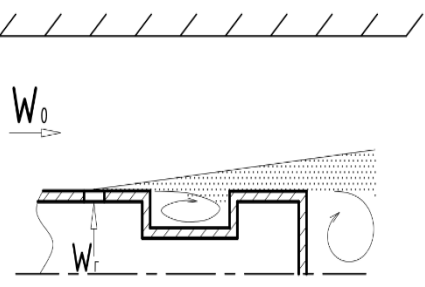
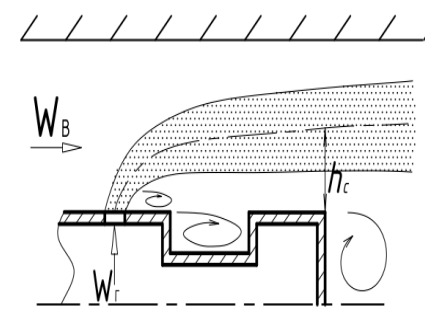
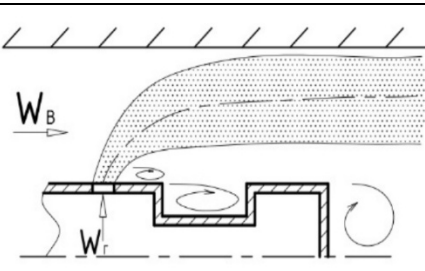
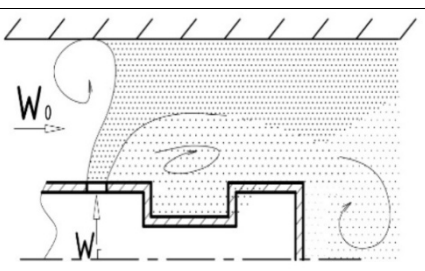
Рис. 3.3 Вигляд факелу струменево-нишевого пальникового приладу при однакових значеннях $\alpha=1,5$, але з різними значеннями швидкості повітря, $W_{\pi}=11,16$ та 25 м/с. [82]

Оптимальним режимом робочого процесу струменево-нишевої системи є стан, за якого досягається $\alpha_{ззс} \approx 1$. Критичні режими виникають при граничних витратах газу, що визначають межі стійкості полум'я для бідних і багатих сумішей. Саме ці межі забезпечують стабільність роботи системи, запобігаючи зриву або проскоку полум'я.

Гідродинамічний параметр $\bar{q} = \frac{\rho_o W_o}{\rho_{\pi} W_{\pi}}$ є універсальним критерієм оцінки стабільності функціонування пристрою. Цей параметр є універсальним критерієм оцінки стабільності функціонування пристрою. Він суттєво впливає на характер течії, оскільки визначає співвідношення імпульсів потоків різних компонентів, таких як паливо та окиснювач в гідродинамічних процесах. [54]

Значення цього параметра визначає режим течії: при надто великому або малому співвідношенні швидкостей і густин можливе виникнення турбулентних зон, нестабільностей або неефективного змішування потоків. Невдале співвідношення може спричинити розшарування компонентів і нестабільне горіння. В аеродинаміці та гідродинаміці цей параметр також впливає на виникнення циркуляційних течій, формування вихорів і стійкість потоків у каналах або соплах.

Таблиця 3.2 – Основні режими роботи струменево-нішевої системи [54]

Режими горіння	Параметри	Характеристики
	$\alpha_{\Sigma} < \alpha_{\text{ном}}$ $G_{\Gamma} \rightarrow G_{\Gamma}^{\text{підпал}}$ $0 < q < q_{\text{кр}}^{\text{I}}$ $\alpha_{\text{ззс}} \approx 1$	Розпалювальний режим. Цей режим описується мінімально допустимою витратою палива, необхідною для запуску випалювального обладнання (ВО). Він дозволяє знизити навантаження на систему до гранично низького рівня без потреби у відключенні окремих пальників.
	$\alpha_{\Sigma} = \alpha_{\text{ном}}$ $G_{\Gamma} = G_{\Gamma}^{\text{ном}}$ $q_{\text{кр}}^{\text{I}} < q < q_{\text{кр}}^{\text{II}}$ $\alpha_{\text{ззс}} = 1$ $h_{\text{с}} = h_{\text{с}}^{\text{ном}}$	Номінальний режим роботи. В цьому режимі функціонування струменево-нішевої системи (СНС) відбувається за умов коефіцієнта надлишку повітря, що дорівнює одиниці. При цьому струмені розвиваються у набігаючому потоці, що забезпечує стабільну вихрову структуру, необхідну для підтримки процесу горіння.
	$\alpha_{\Sigma} < \alpha_{\text{ном}}$ $G_{\Gamma} > G_{\Gamma}^{\text{ном}}$ $q > q_{\text{ном}}$ $\alpha_{\text{ззс}} = 1$	Режим із повною стабілізацією на паливних струменях. У цьому випадку стабілізація процесу горіння повністю переходить із нішової порожнини на паливні струмені. Цей режим супроводжується появою пульсацій полум'я, що є його характерною ознакою.
	$\alpha_{\Sigma} < \alpha_{\text{ном}}$ $G_{\Gamma}^{\text{max}} \gg G_{\Gamma}^{\text{ном}}$ $q^{\text{max}} \gg q_{\text{ном}}$ $\alpha_{\text{ззс}} < 1$	Режим при максимальній витраті палива. Цей режим відзначається тим, що далекобійність струменів значно перевищує напіввисоту повітряного каналу. Зона стабілізації процесу горіння зміщується та має специфічні характеристики залежно від умов роботи системи.

Таким чином, правильний вибір і контроль параметра \bar{q} є важливим для забезпечення ефективної роботи систем, оптимізації витратних характеристик і запобігання небажаним динамічним явищам. Дослідження підтверджують, що струменево-нішова система (СНС) зберігає автомодельність процесів сумішоутворення в широкому діапазоні значень \bar{q} .

При $\bar{q} < 1$ спостерігається ефект Коанда — явище, за якого струмінь після виходу з отвору прилягає до стінки. Граничне значення q визначається рівнем затінення прохідного перерізу каналу та властивостями використовуваного палива (див. табл. 3.2).

Процес технічного горіння є одним із найскладніших для математичного моделювання. Під час згоряння органічного палива відбувається взаємодія низки фізичних і хімічних процесів, що протікають одночасно, що значно ускладнює їхній аналітичний опис. У зв'язку з цим проведення натурних експериментів на різних етапах циклу паливних пристроїв може суттєво збільшувати витрати на їх розробку та виробництво.

3.3 Створення експериментальної моделі.

Сучасний розвиток обчислювальних технологій у поєднанні з накопиченням великого масиву експериментальних даних створив передумови для високоточного чисельного моделювання комплексних систем відповідно до інженерних стандартів. Таке моделювання можливе як у двовимірній, так і у тривимірній постановці. Його основу становить математичний опис фізичних процесів, які протікають в досліджуваних об'єктах (наприклад, паливних пристроях), через систему рівнянь, які характеризують газодинаміку, тепло- та масообмін, а також хімічну кінетику.

Розрахунок параметрів робочих процесів здійснюється чисельними методами. Найновіші спеціалізовані програмні комплекси, дають змогу моделювати не лише газодинамічні процеси та теплообмін, але й хімічні реакції в ламінарних і турбулентних потоках. Серед найбільш розповсюджених програмних рішень можна віднести «Fluent», «Ansys», «TASKflow», «FlowVision» та інші.[51]

Метою моделювання в першу чергу було перевірити визначальні аеродинамічні параметри системи, якість сумішоутворення та наявність зон

зворотних потоків в різних варіантів модулів, та прорахувати можливі діапазони різних параметрів для подальшого дослідження в умовах натурного експерименту. В першу чергу досліджувалися аеродинамічні процеси при «холодному пуску», тобто без процесу горіння. Як раніше згадувалося, комп'ютерне моделювання процесів горіння є доволі вимогливим до обладнання та займає велику кількість часу. [68]

Саме тому, в комп'ютерному моделюванні (див.рис.3.4) визначаються діапазони конструкційних та режимних параметрів пальникового модуля зважаючи увагу лише на процеси сумішоутворення, утворення зон зворотних потоків та концентраційні межі палива, їх наявність в необхідних межах сигналізує про те, що моделлю є адекватною та може бути перевіреною детальніше вже під час натурного експерименту.

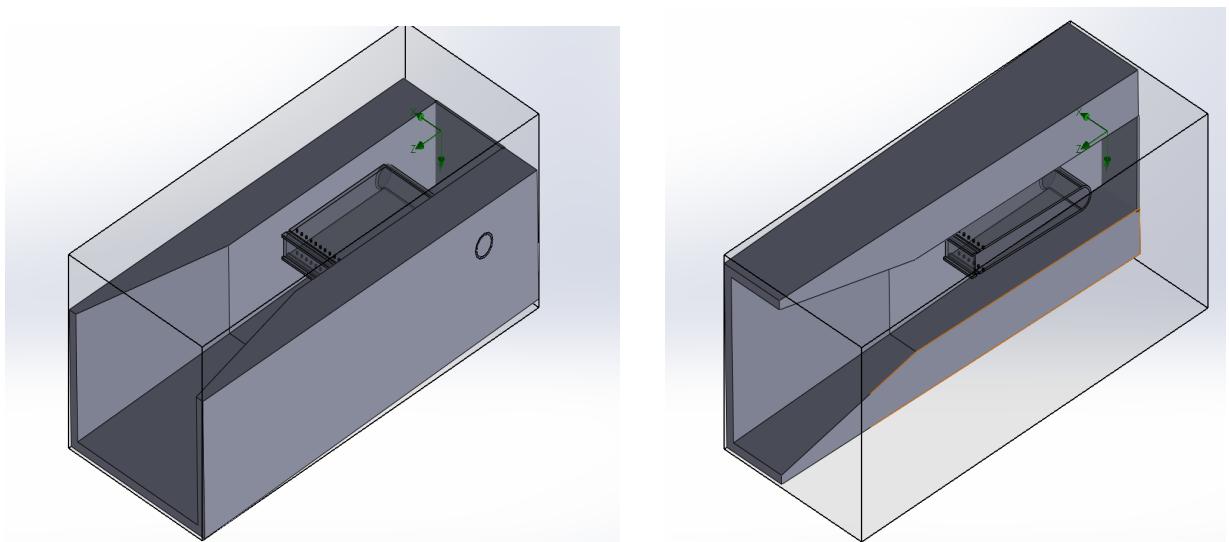


Рисунок 3.4 Комп'ютерна модель пальникового приладу з одним струменево-нішовим модулем.

Лабораторні дослідження детально охоплювали аналіз швидкісних, концентраційних і температурних полів у струменево-нішових системах (СНС) та при обтіканні плоских пілонів. В умовах повітряного потоку, що огинає стабілізатор, утворюється циркуляційна зона зі зворотними течіями в її

центральної частині. На межі прямого та зворотного потоків формується прикордонний шар із високими градієнтами швидкостей, що сприяє значному посиленню турбулентного обміну внаслідок високого рівня інтенсивності турбулентності $\varepsilon = \sqrt{\frac{w'}{w}}$. Висока турбулентність у цій зоні обумовлює інтенсивне перемішування потоків, що значно впливає на процеси переносу імпульсу, тепла та маси. Турбулентні вихори різного масштабу сприяють швидкому вирівнюванню параметрів потоку, однак при цьому можуть виникати значні локальні флуктуації швидкості та тиску. Коефіцієнт турбулентного переносу може перевищувати аналогічний показник у зоні зворотного струму до десяти разів.

В ході серій моделювань, досліджувалися багато варіантів модулів. В основному відрізнялися їх діаметри паливоподавальних отворів, їх кількість та відносний крок між ними, не менш важливим було вибрати необхідну відстань від отворів до ніші, а також геометричні розміри ніші. Що стосується режимних параметрів, то найважливішими є швидкість та витрата окиснювача і палива.

У виборі як режимних так і конструктивних параметрів в першу чергу відштовхувалися від уже існуючих пальникових модулів призначених для спалювання природного газу. Конструктивні параметри мають бути схожими на ті, що потрібні для спалювання природного газу, щоб не понизити рівень ефективності його спалювання, а ось режимні можуть значно відрізнятися в залежності від видів палива.

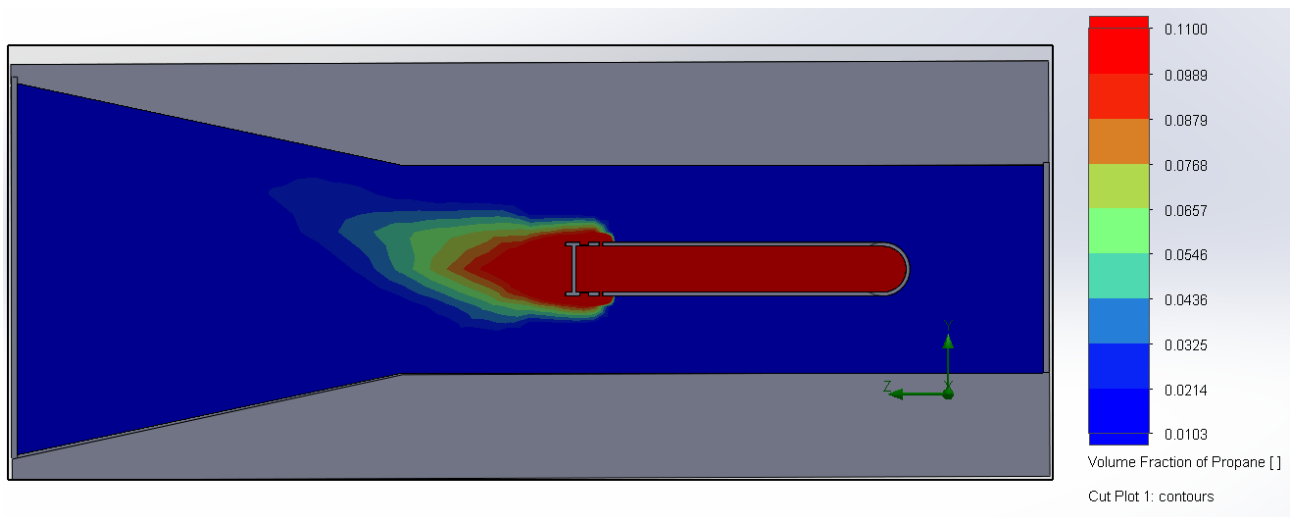


Рисунок 3.5 Концентраційні межі палива.

Одною з найважливіших характеристик при підборі, як режимних так і конструктивних параметрів є концентраційні межі займання пропан-бутанової суміші (див.рис.3.5) в залежності від її складу та зовнішніх умов 1,5-10%, наявність таких концентрацій в безпосередній близькості до модуля, легко замітити при моделюванні. Через це, розміщення концентраційних меж та зони зворотних потоків в безпосередній близькості до пального модуля є першим признаком правильного напрямку при підборі параметрів модуля.

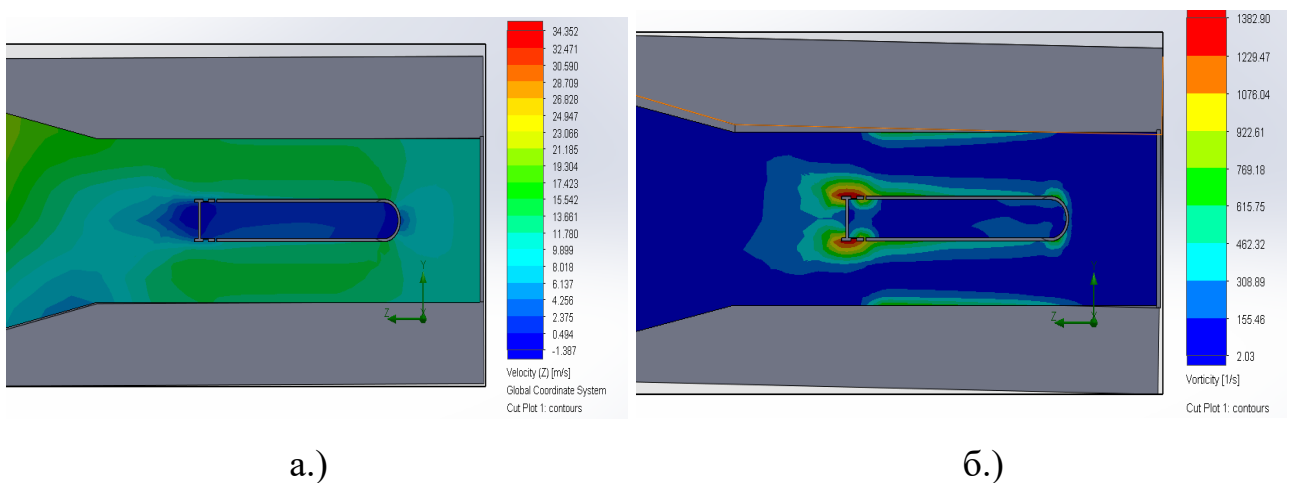


Рис. 3.6 Утворення зон зворотних потоків – а.) зі значень швидкостей та б.) безпосередньо виходячи зі значень завихренності.

Іншим обов'язковим аспектом стабільного процесу горіння в струменево-нишевих пальникових приладах є наявність зон зворотного току в нішах, та за модулем. На рисунку 3.6 а.) видно значення де швидкість по вісі z є близькою до нуля (а то і від'ємною), що свідчить про наявність процесів закручування потоку на торцевій ніші (за модулем), а на рис.3.6 б.) видно великі значення вихроутворення в нішах.

Виходячи з досвіду проведення експериментальних досліджень, при «гарячих» пусках місцезорозташування зон зворотних потоків не змінюється, крім цього вони додатково стабілізуються через розрідження, що виникає в їх центрах в процесі горіння. Тим самим забезпечується стабілізація горіння за рахунок стійких високотемпературних зон, що складаються з нагрітих димових газів, повітря та палива.

Після розгляду етапів, забезпечення яких є обов'язковим для процесу стійкого горіння розглядається решта параметрів. Шляхом їх порівняння з існуючими нормами і показниками звичайних струменево-нишевих модулів верифікується адекватність моделі, а також можливість роботи на таких параметрах в реальних умовах.

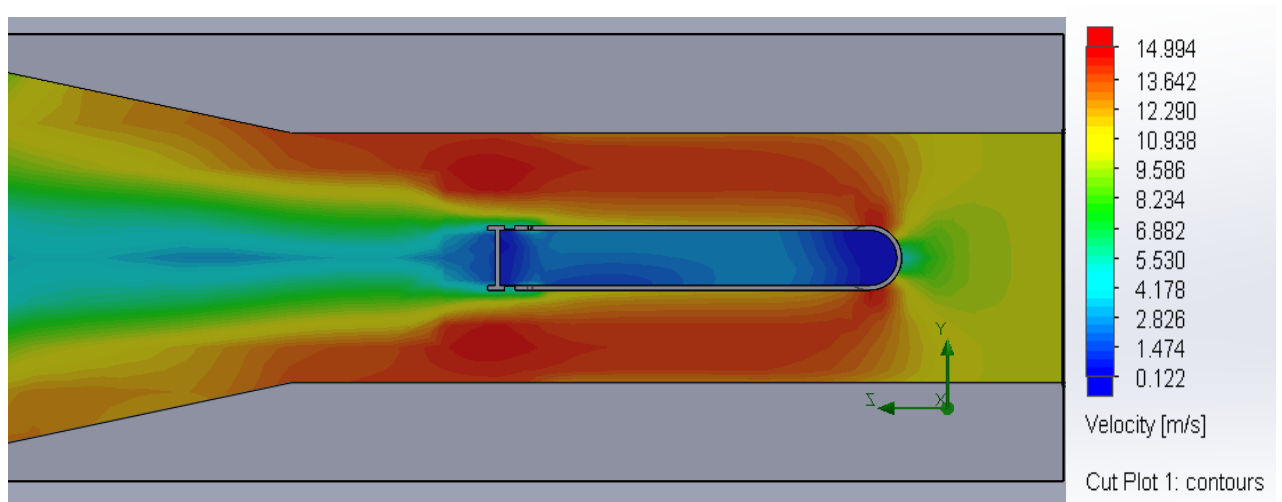


Рис. 3.7 Моделювання швидкості потоку в системі з одним комбінованим струменево-нишевим модулем.

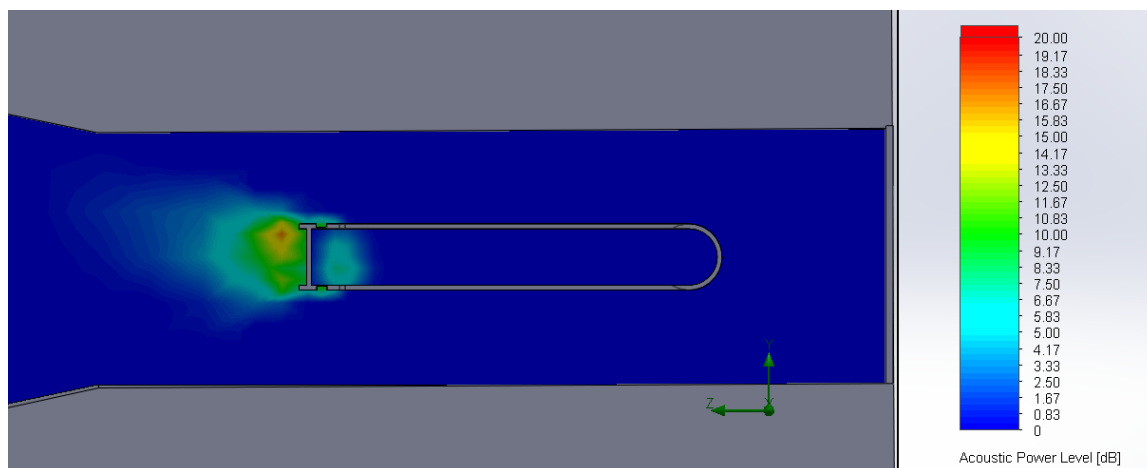


Рис. 3.8 Значення акустичного рівня шуму при сумішоутворенні в комбінованому струменево-нишевому модулі.

Одним з завершальних етапів, є аналіз взаємозв'язків між процесами та параметрами, що протікають в струменево-нишевих модулях. Як уже згадувалося раніше процес горіння, це надзвичайно складний аеро-термо-хімічний процес, найменші зміни в одному аспекті якого можуть призвести до більш значущих змін в інших. Для цього потрібно розглядати їх значення одночасно (див. рис. 3.9) та порівнювати зміни похідних параметрів від початкових параметрів заданих при моделюванні.

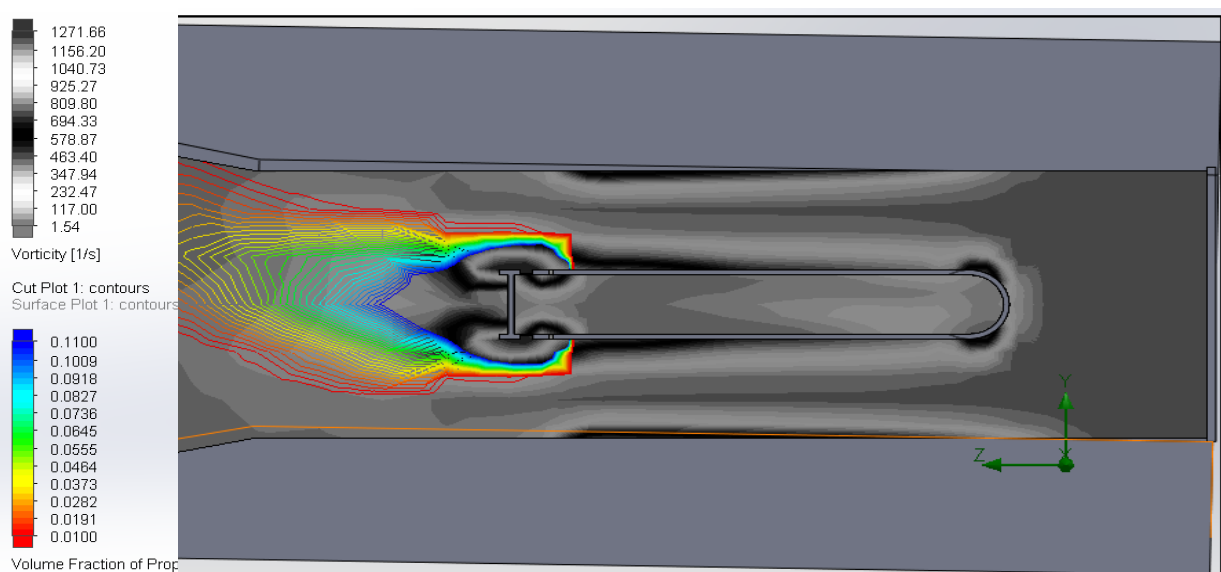


Рис. 3.9 Взаємозв'язок місцезнаходження зон зворотних токів та зон високої концентрації паливної суміші.

Після опрацювання більшості отриманих серії моделювань даних та визначено найбільш підходящі для задач комбінованого спалювання пропан-бутану та природного газу варіанти струменево-нишевих модулів необхідно перевірити, як працюватимуть ці модулі в струменево-нишевій системі. При створенні струменево-нишевого пальникових приладів застосовується принцип модульності, так для створення пальників різної потужності в одну систему з'єднуються від 4 до 90 струменево-нишевих модулів (зазвичай в рівну кількість рядків то стовпців). [69]

Саме тому важливо досліджувати, як впливатимуть один на одного два модулі з'єднані в систему. При цьому важливим параметром є далекобійність струменю пального. Важливо, щоб струмені з різних пальникових модулів не перетиналися і не руйнували структуру один одного. Тому всі найбільш ефективні варіанти модулів отриманих під час дослідження також додатково перевіряли на ефективність роботи в системі модулів. (див.рис.3.10)

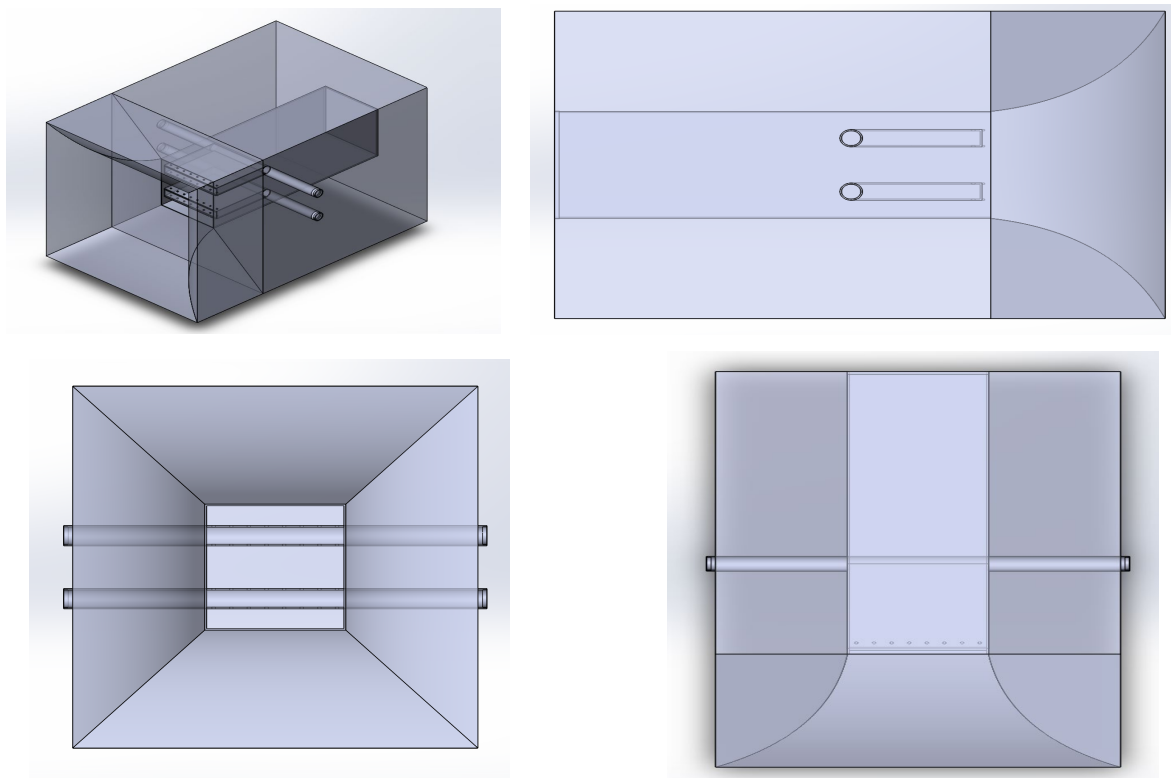


Рис. 3.10 Комп'ютерна модель пальникового приладу з системою з двох струменево-нішових модулів.

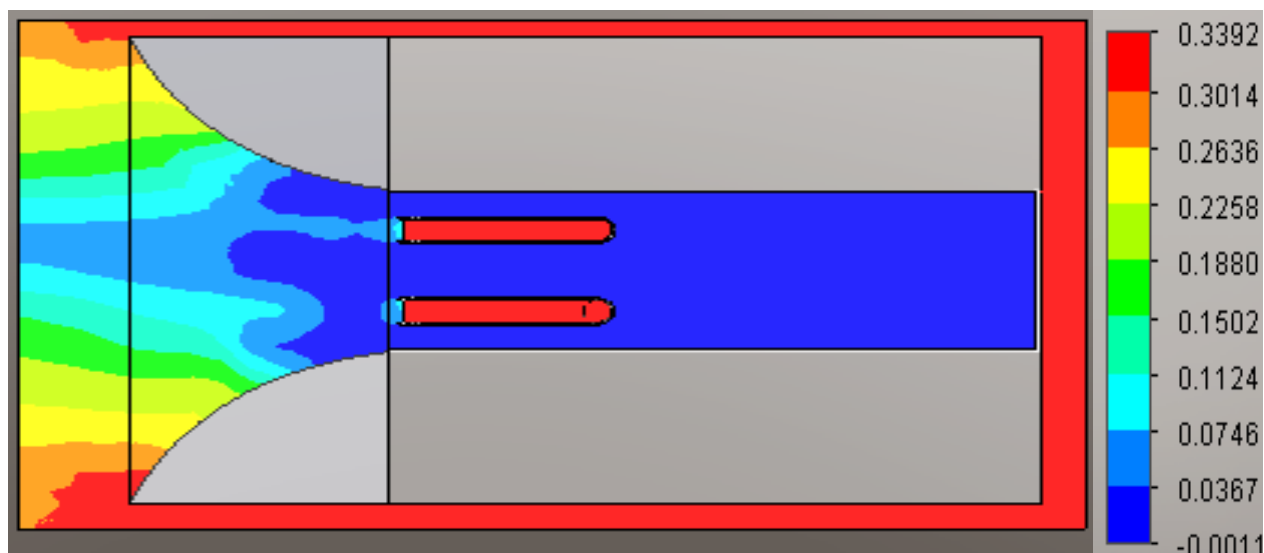


Рис.3.11 Масова концентрація пропану в змодельованій системі з двох пальникових модулів.

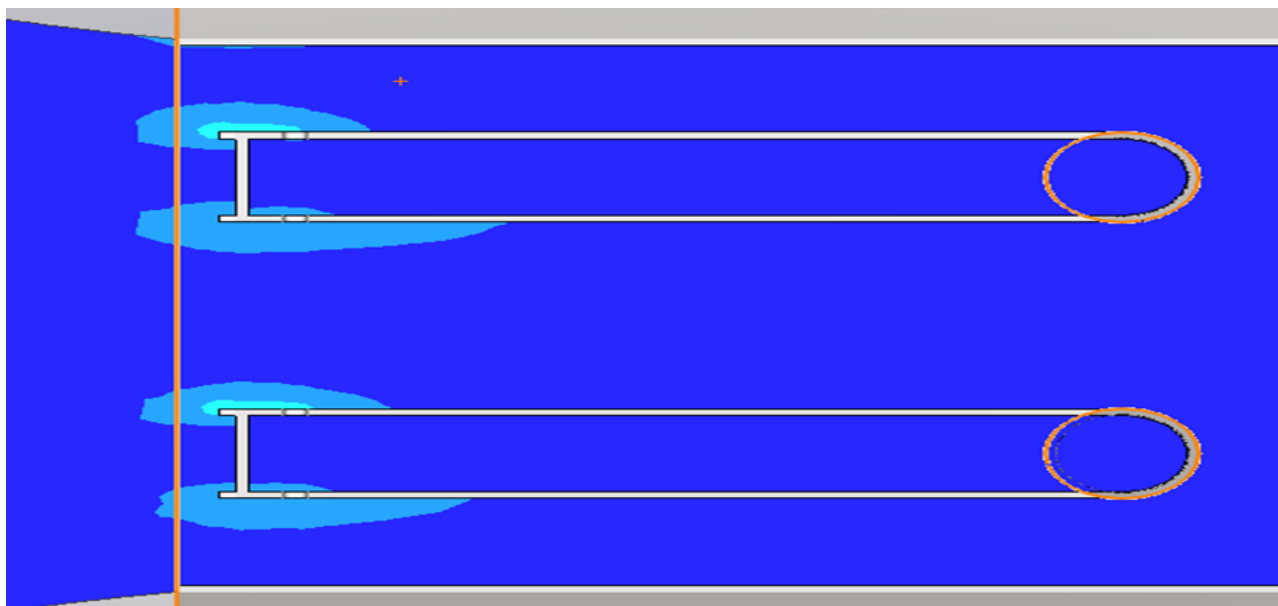


Рис.3.12 Зони завихрення в змодельованій системі з двох пальникових модулів.

3.4. Результати комп'ютерного моделювання .

В результаті серій проведених моделювань отримано результати (див.рис.3.11-13), що свідчать, що у випадку комбінованого струменево-нишевого модуля, що ефективно працюватиме на пропан-бутані та природньому газі при збереженні всіх конструкційних характеристик на рівні не надто відріняється від стандартного модуля, що працює на природному газі.

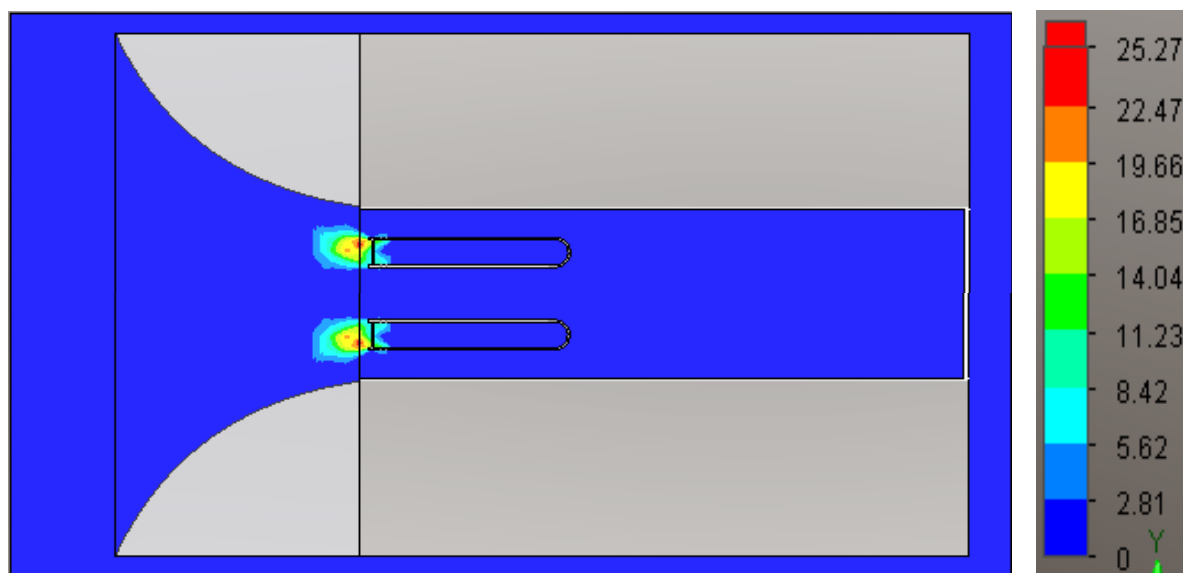


Рис.3.13 Шумові характеристики в змодельованій системі дБ
(без процесу горіння)

При цьому при створенні комбінованої модифікації струменево-нишевого пальникового пристрою, зберігатимуться габаритні розміри, коефіцієнт захаращення, значення аеродинамічного опору та більшість переваг струменево-нишевих пальникових приладів. Більших змін зазнаватимуть саме режимні параметри (в основному через велику різницю в теплоті згорання). (див.табл.3.3) [70-72]

Табл. 3.3. Діапазон значень визначальних режимних та конструктивних параметрів струменево-нишевих комбінованих пальникових модулів, при яких забезпечується ефективна робота.

W_п - Швидкість окиснювача	W_г-Швидкість палива	L-Ширина ніші
5-20 м/с	5-50м/с	10-20 мм
L1- Відстань паливо-подаючих отворів до ніші	d-Діаметр отворів паливо-подачі	s/d-Відносний крок отворів
5-10 мм	1,5-4 мм	3-4

Виходячи з отриманих даних наступним кроком є створення обмеженого ряду варіантів струменево-нишевих комбінованих модулів для їх використання в натурному експерименті. (див. табл. 3.4.)

Таблиця 3.4. Варіанти комбінованих струменево-нішових модулів створених в рамках визначених діапазонів конструктивних значень, для використання у натурному експерименті.

1 Варіант	2 Варіант	3 Варіант	4 Варіант	5 Варіант
d=4мм d/s=3 L1=8мм L=16мм	d=3мм d/s=3 L1=9мм L=18мм	d=3,5мм d/s=3,5 L1=8мм L=18мм	d=3мм d/s=3,5 L1=6мм L=12мм	d=3мм d/s=3 L1=5мм L=10мм
6 Варіант	7 Варіант	8 Варіант	9 Варіант	10 Варіант
d=2.5мм d/s=3,5 L1=7мм L=14мм	d=2мм d/s=3,5 L1=7мм L=14мм	d=2мм d/s=4 L1=8мм L=16мм	d=2мм d/s=3,5 L1=9мм L=18мм	d=1,5 мм d/s=4 L1=6мм L=12мм

3.5. Висновки до третього розділу.

В ході підготовки до проведення комп'ютерного моделювання, власне моделювання, а також аналізу результатів було сформовано наступні висновки:

1. Процес горіння, є надзвичайно складним аеро-термо-хімічним процесом, для повного комп'ютерного моделювання якого необхідна доволі продуктивна обчислювальна техніка, а також багато часу на опрацювання. Крім того, найменші зміни в одному аспекті цього процесу можуть призвести до більш значущих змін в інших.
2. Без проведення натурного експерименту, неможливо упевнитися в ефективності того чи іншого варіанту струменево-нишевого

комбінованого пальникового приладу. Але комп'ютерне моделювання методом «холодної продувки» дозволяє визначити вузький діапазон визначальних конструктивних та режимних параметрів. Виходячи з якого можна створити дослідні модулі для натурного експерименту.

3. Найбільш ефективним методом визначення ефективності тої чи іншої моделі пальникового модуля при методі «холодних пусків» є аналіз утворення зон зворотних потоків та ефективності сумішоутворення (концентраційних меж). Якщо вони накладаються та знаходяться безпосередньо поруч з модулем, це свідчить про те, що параметри підібрані правильно.
4. Важливим є не лише показники ефективності роботи одного модуля, але й його взаємодія з іншими в складі струменево-нишевого пальникового пристрою.

Розділ 4. ДОСЛІДЖЕННЯ КОМБІНОВАНИХ СТРУМЕНЕВО-НІШОВИХ МОДУЛІВ ЗА ДОПОМОГОЮ НАТУРНОГО ЕКСПЕРИМЕНТУ.

Опрацювання результатів комп'ютерного моделювання струменево-нишевих комбінованих пальникових модулів дозволило визначити діапазони ефективних конструктивних та режимних параметрів роботи пальникового модуля. Сформовано 10 варіантів комбінацій конструктивних параметрів модулів. З якими проведено експериментальні дослідження за описаною методикою. Модулі, що показали свою неефективність в діапазоні розпалювання та номінальної роботи (спостерігалось часте затухання факелу, його відрив чи навпаки проскакування полум'я і т.д.) не підлягали подальшому аналізу та признавалися неефективними. Таким чином, залишилися модулі, які працювали в номінальному режимі з майже однаковою ефективністю. Основні відмінності між ними полягали як раз в тому, наскільки ефективно вони працюватимуть в широкому діапазоні, при критично низьких та максимально високих значеннях коефіцієнту надлишку повітря.

4.1 Експериментальний стенд.

Для спрощення експерименту, та збереження часу й матеріалів, при проведенні експерименту, експериментальний стенд схему якого приведено в розділі 2, було виготовлено розбірним. А його робоча ділянка, по суті складалася, з двох основних деталей, статичної частини – умовно тракту димових газів та короба пальникового приладу, де вставлені всі вимірювальні прилади і т.д., а також частина пальникового модуля, а саме торець та ніша. В той самий час, інша частина стенду – змінна частина модуля, а саме тракт паливоподачі з паливороздавальними отворами різного діаметра та відстані між ними й до ніші.

За результатами моделювання було розроблено креслення робочої ділянки, а решта конструкції стенду є видозміненим стендом, що знаходиться в

лабораторії горіння КПП, та вже використовувався у роботах Сірого О.А. та Абдуліна М.З.[25,54]

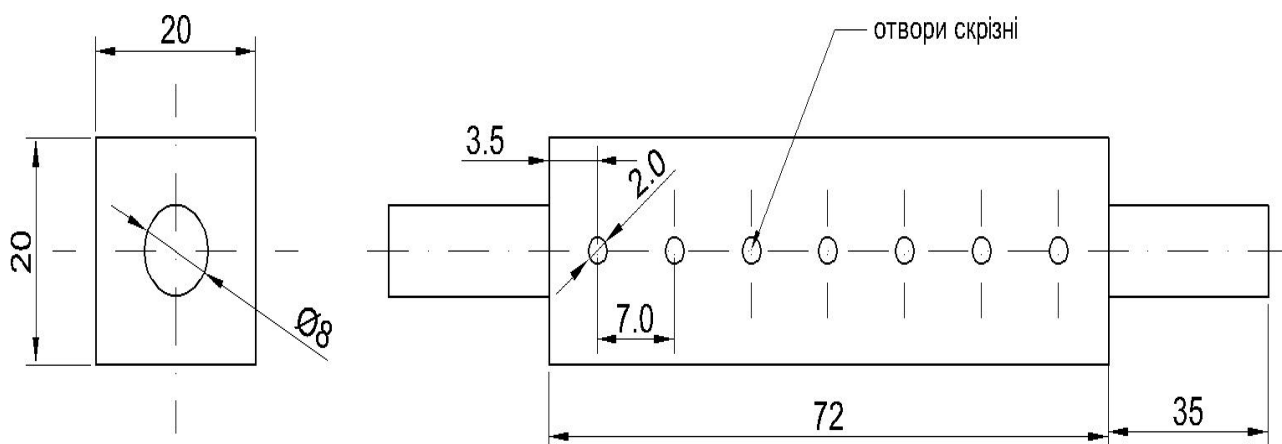


Рисунок 4.1. Змінна частина досліджуваного модуля пального приладу з вирізаними отворами різного діаметру та відстанню між ними.

На рисунку 4.1 зображено один з таких модулів, який за результатами експериментів виявився найбільш успішним. Тобто комбінація діаметру паливороздавального отвору \varnothing – 2мм та d_s – 7мм емпірично була визнана найбільш успішно.

На рисунку 4.2 зображено робочу ділянку експериментального стенду. Ця частина, є спрощеною моделлю корпусу пального приладу. Згідно схеми експериментального стенду, яка вказана в розділі 2, до цієї ділянки йде короб подачі окиснювача, а після – ізольований короб димових газів.

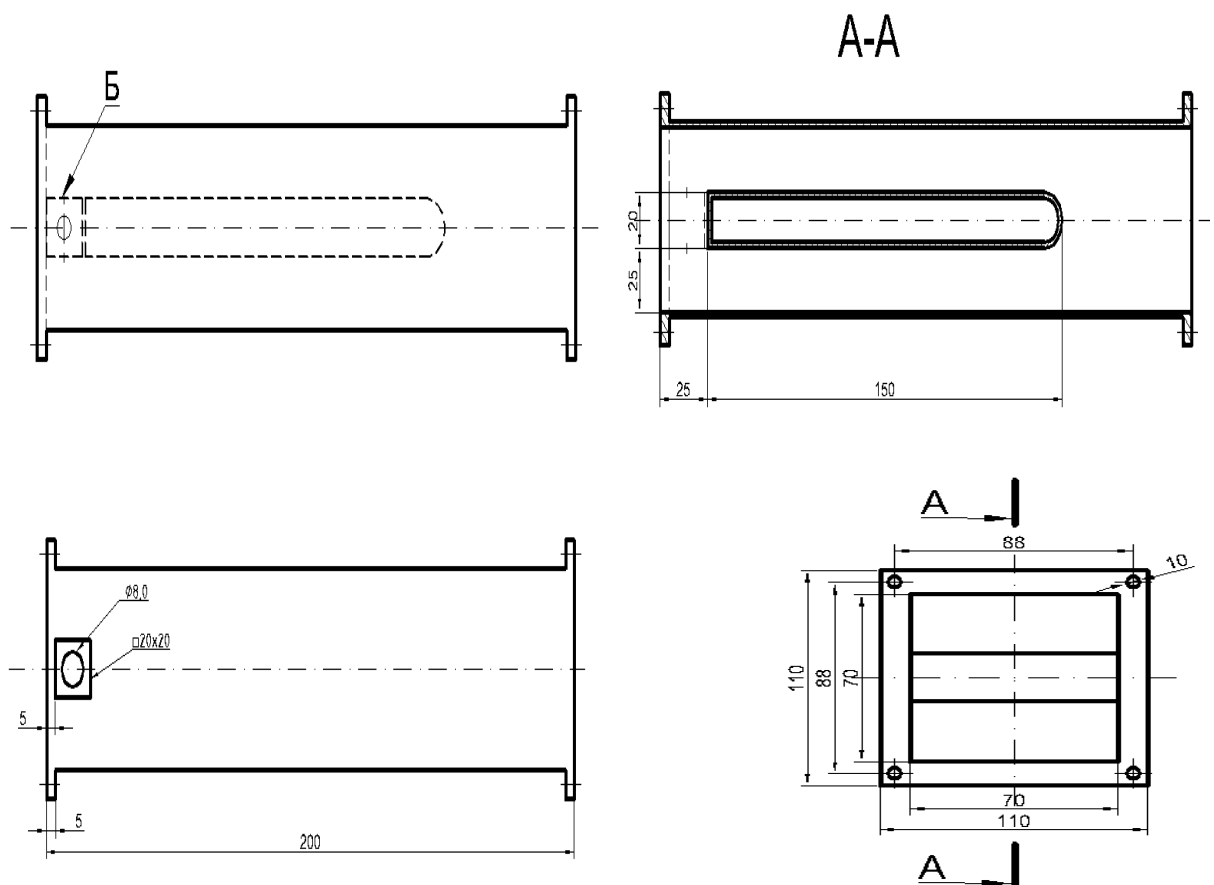


Рисунок 4.2 Схема робочої ділянки експериментального стенду.

На даний момент вони не розглядаються так, як несуть найменше впливу на експеримент, а їх конструкція залишається незмінною незалежно від досліджуваного варіанту комбінованого струменево-нишевого модуля. В робочу ділянку вставляються на вибір модулі з різними конфігураціями після чого підключається подача палива.

4.2 Обробка результатів експериментів

Зазначимо, що варіант пальникового модуля з отвором \varnothing – 2мм та відстанню між ними d_s – 7мм, й кількістю отворів n – 7шт. був найбільш вдалим. Такий висновок зроблено на основі замірів та розрахунку найбільш важливих показників, як температурного поля, екологічні характеристики, довжини факела (як розрахункової так і візуальної). При цьому враховувалася ефективність роботи на всьому діапазоні потужностей, тобто не лише на близьких до номінального режиму значеннях, але й при надзнизьких та надвисоких

значеннях коефіцієнту надлишку повітря. Даний експериментальний комбінований струменево-нишевий модуль показав стабільну роботу в діапазоні надлишку повітря ($\alpha = 1,02 - 7,58$).

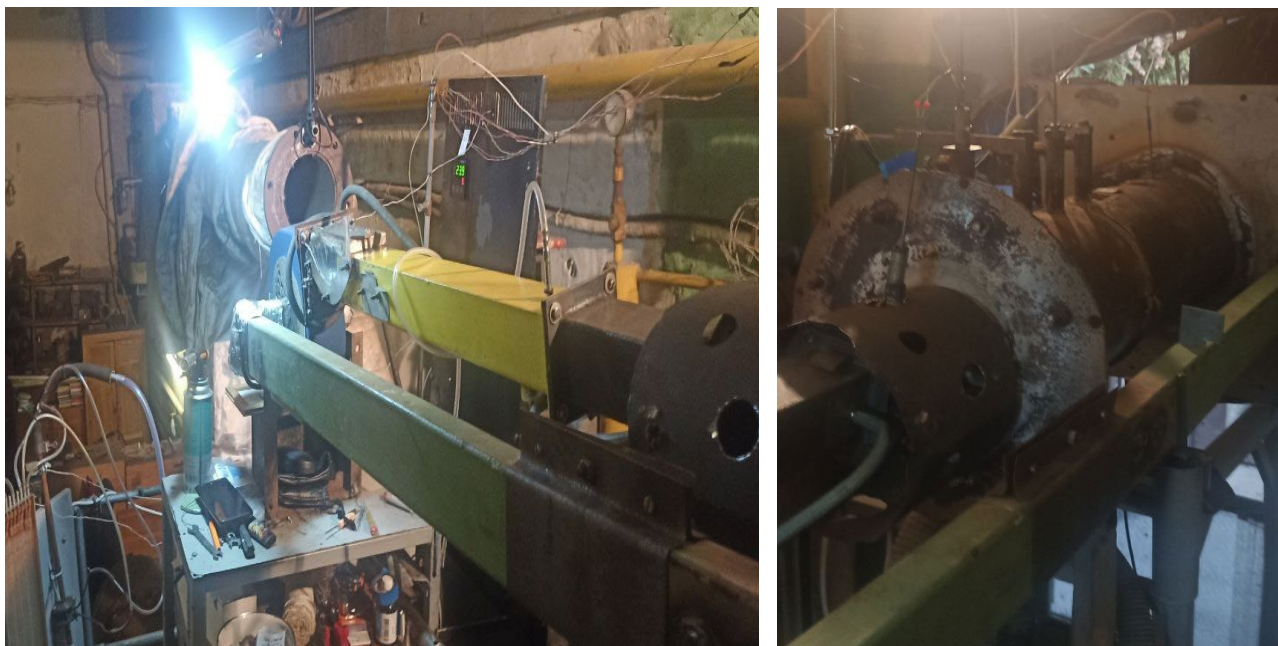


Рисунок 4.3 Фото лабораторного стенду.

Виходячи з досвіду роботи з струменево-нишевими пальниковими приладами, можна робити висновки, що такі діапазони роботи збережуться і на рівні комбінованого струменево-нишевого пальникового приладу, що складатиметься з таких модулів. З додатковими технічними доопрацюваннями, цілком можливо й розширити діапазон в сторону можливості роботи на ще вищих значеннях α , що дозволить більш ефективно забезпечувати стабільну роботу об'єктів, де необхідний температурний режим на виході з топкового простору, не перевищує $100-200\text{ }^{\circ}\text{C}$

4.3 Спалювання пропан-бутану за допомогою струменево-нишевого пальникового модуля.

Емпіричним методом було визначено параметри, при яких робочий процес пальникового пристрою відбувається максимально ефективно та з найбільш підходящими еколого-економічними характеристиками. В даному розділі приводяться

результати таких експериментів, також з двома варіантами фінальної потужності установки 20 та 30 кВт. (див.табл.4.1.)

В таблиці наведено дані експерименту протягом якого поступово приближалися до розрахункових режимних параметрів, серед яких $\alpha=1,02$ і т.д. Тут приведені, температурні дані на різних ділянках експериментального стенду ($t_x=900\text{мм}$, $t_x=700\text{мм}$, $t_x=500\text{мм}$, $t_x=300\text{мм}$, $t_{\text{відх.газ}}$), температура палива ($t_{\text{пропан}}$) та окиснювача ($t_{\text{повітря}}$). Наступними йдуть дані з витратомірних шайб ($\Delta h_{\text{повітря/пропану}}$ та $h_{\text{повітря/пропану}}$). Окремий блок даних – значення складу продуктів спалювання з газоаналізатора – (значення NO_x , CO , O_2 , CO_2).

Важливими з точки зору повноти згорання є температурні показники продуктів спалювання, адже без забезпечення необхідного рівня температур в тому чи іншому вогнетехнічному об'єкті він не зможе ефективно виконувати свої функції. В ході аналізу експериментальних даних, аналізувалися дані термопар, що розташовувалися на відстані 300, 500, 700, 900мм, та на виході димових газів в атмосферу (1200мм). (див.рис.4.4.) Експериментальні дані дали уявлення, про рівномірність температурного поля, та довжину факелу, який забезпечує даний варіант комбінованого струменево-нишевого модуля.

Таблиця 4.1 Результати експерименту при спалюванні пропан-бутану на комбінованому струменево-нишевому пальниковому модулі при максимальній потужності 30кВт.

27.08.2024		P _б	100300Па		L ₀ CH ₄	29	n	7шт
		S	30кВт		Ø	2мм		
час		19:32	19:35	19:37	19:38	19:39	19:40	19:42
t _{пропан}	°C	20,00	20,1	20,2	19,8	20	19,7	19,8
t _{повітря}	°C	20,00	19,8	19,7	20	20	19,7	19,9
t _{відхідних газів}	°C	453,00	451	605	645	759	772,7	826,5
t _{x=900}	°C	493	474	617	679	781	933	865,1
t _{x=700}	°C	621,5	621	821	862	946	954,5	964,8
t _{x=500}	°C	773	755	1013	1012	1001	1001	992
t _{x=300}	°C	882	891	1087	1139	1158	1155,3	1129,6
Δh _{повітря}	мм	20	13	8	4	3	2	1,5
h _{повітря}	мм	100	80	60	40	20	8	7
Δh _{пропан}	мм	360	355	360	355	370	375	375
h _{пропан}	мм	540	525	525	520	540	540	540
NO _x (ОКСН)	ppm	12	17	30	44	61	72	68
CO	ppm	789	703	500	175	18	10	794
O ₂	%	17,1	16,4	14,4	12	7,3	3,7	0,3
CO ₂	%	2,5	2,9	4,2	5,7	8,8	11,5	13,3
α		5,38	4,5	3,18	2,53	1,52	1,19	1,01
G _{проп}	кг/с	0,00062	0,00061	0,00062	0,00061	0,00063	0,00063	0,00063
ρ _{проп}	кг/м ³	2,17	2,17	2,17	2,17	2,17	2,17	2,17
ρ _{повітря}	кг/м ³	1,204	1,203	1,201	1,197	1,195	1,195	1,194
W _{air} (за киснем)	м/с	7,36	6,21	4,37	3,19	2,14	1,71	1,43
W _{air}	м/с	8,07	6,51	5,11	3,62	3,14	2,56	2,22
ΔW _{airГА}	%	8,81	4,63	14,59	11,94	31,78	33,42	35,71
G _{air}	кг/с	0,049016	0,03949	0,03095	0,02185	0,0189	0,0154	0,0133
G _{проп}	м ³ /год	1,03	1,02	1,03	1,02	1,04	1,05	1,05
Δα	%	9,66	4,85	17,08	13,56	46,59	50,19	55,55
N	кВт	28,63	28,45	28,66	28,44	29,02	29,20	29,21
W _{ге}		5,79	5,75	5,79	5,75	5,87	5,90	5,91
q̄		1,11	1,55	3,18	5,89	13,64	21,77	31,14
час		19:43	19:44	19:45	19:46	19:46	19:47	
t _{проп}	°C	19,8	20,1	20,1	19,8	19,7	19,8	
t _{пропан}	°C	20	19,6	19,7	19,9	20	20,2	
t _{повітря}	°C	828,7	834,5	844,9	846,2	849,3	858,3	
t _{відхідних газів}	°C	879,2	888	892,2	897,5	900,6	910,3	
t _{x=900}	°C	972,4	971,7	973,3	977,2	978	975,4	
t _{x=700}	°C	1022,1	1032	1037,9	1041,4	1042	1050,3	
t _{x=500}	°C	1143,8	1142,6	1142,5	1143,6	1143,6	1132,8	
t _{x=300}	°C	1243,5	1242,1	1242,0	1243,2	1243,2	1230,8	
Δh _{повітря}	мм	1,25	1,2	1,1	1	1	1	
h _{повітря}	мм	6	5	4	4	3	2	
Δh _{пропан}	мм	365	375	375	375	375	375	
h _{пропан}	мм	530	540	540	540	540	540	
NO _x (ОКСН)	ppm	75	72	74	75	74	75	
NO _x (ОКСН)	ppm	75	72	74	75	74	75	
CO	ppm	25	107	54	36	22	19	
O ₂	%	1,3	2	1,6	1,2	1,4	1,4	
CO ₂	%	12,7	12,2	12,5	12,7	12,6	12,6	
α		1,06	1,1	1,08	1,06	1,07	1,07	
G _{проп}	кг/с	0,000626	0,000634	0,000634	0,000635	0,000635	0,000635	
ρ _{проп}	кг/м ³	2,17	2,17	2,17	2,17	2,17	2,17	
ρ _{повітря}	кг/м ³	1,193	1,195	1,194	1,194	1,193	1,192	
W _{air} (за киснем)	м/с	1,48	1,55	1,52	1,49	1,51	1,51	
W _{air}	м/с	2,03	1,99	1,90	1,81	1,81	1,81	
ΔW _{airГА}	%	26,94	21,68	19,87	17,67	16,83	16,78	
G _{air}	кг/с	0,012198	0,011959	0,011448	0,010911	0,010909	0,010904	
G _{проп}	м ³ /год	1,04	1,05	1,05	1,05	1,05	1,05	
N	кВт	28,83	29,22	29,22	29,21	29,20	29,21	
q̄		28,16	26,23	27,33	28,48	27,91	27,87	

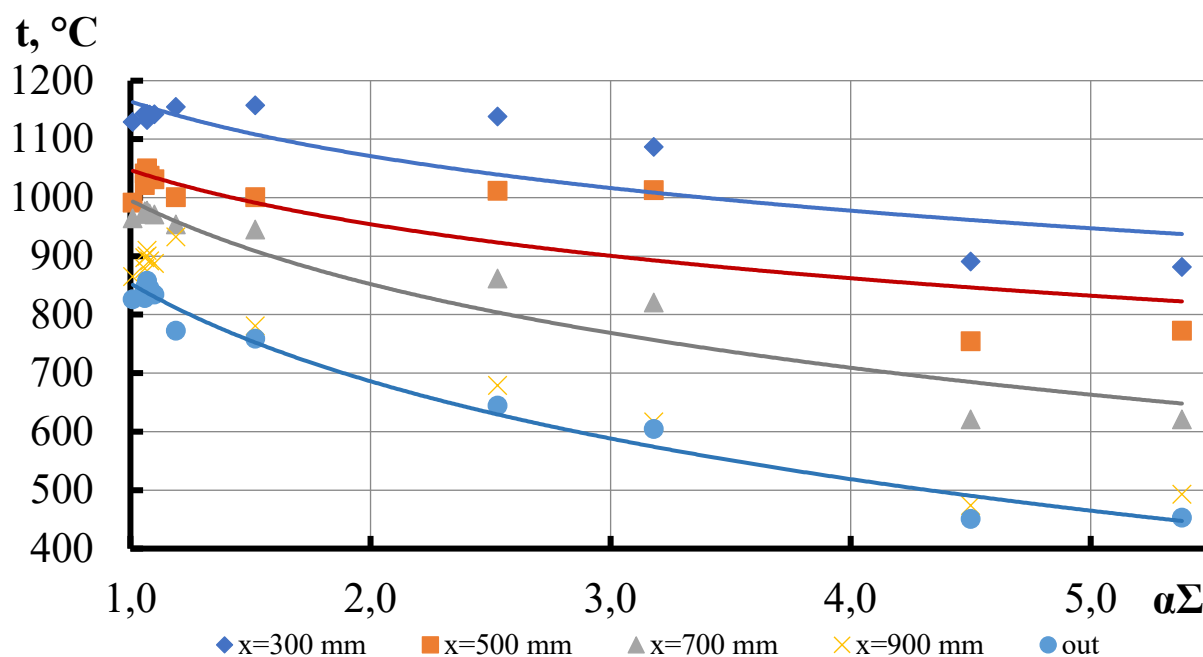


Рисунок 4.4. Графік залежності температур від точки встановлення термопар, а також від коефіцієнту надлишку повітря (α).

Спостерігається доволі високий рівень рівномірності температурного поля, а також можливість роботи в широких діапазонах коефіцієнту надлишку повітря. Розширення діапазону по α_{\max} дозволяє палинковим пристроям працювати на об'єктах з низьким температурним рівнем продуктів спалювання. Так у деяких сушарках потрібно забезпечувати температурний режим 80-100 С°, що вимагає роботи на доволі великих значеннях α .

Не менш важливим в організації робочого процесу палинкових пристроїв є рівень емісії шкідливих речовин, таких як NO_x та CO , в процесі горіння дуже важливо з точки зору екології зберігати правильний баланс між викидами NO_x та CO , адже при низькотемпературному горінні, що забезпечує низький рівень NO_x внаслідок недопалу виділяються критичні значення CO . А при високих температурах (більше 1300 С°), внаслідок більш активних хімічних реакцій, утворюються доволі шкідливі сполуки оксидів азоту.

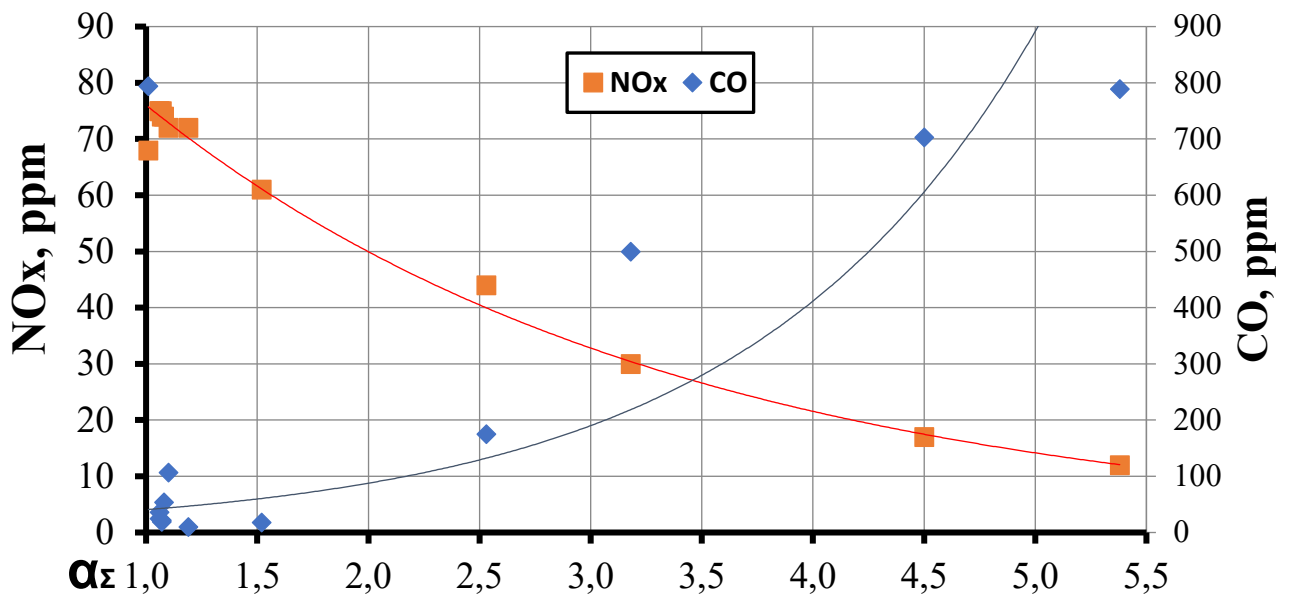


Рисунок 4.5. Залежність рівня викидів шкідливих газів від коефіцієнту надлишку повітря (α).

Як видно з графіків, комбіновані струменево-нишові пальникові прилади в межах номінального функціонування забезпечують викиди як CO так і NO_x нижче 100 ppm. (див.рис.4.5.) Такі рівні викидів при створенні з модулів струменево-нишевого пальникового приладу відповідатимуть більшості нормативних документів, що варіюватимуться у відповідності від типу об'єкту.

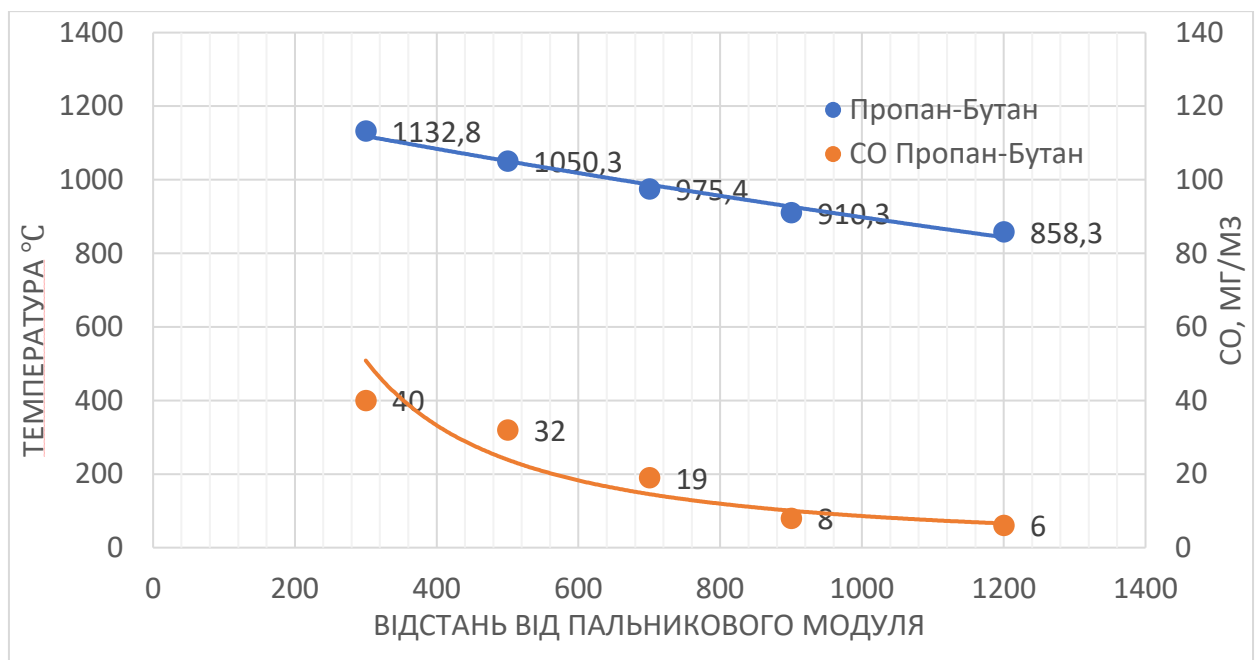


Рисунок 4.6. Довжина факелу та рівень догорання за пальниковим модулем потужністю 30кВт при роботі на пропан-бутану.

Також важливою характеристикою робочого процесу пальникових пристроїв є довжина та форма факелу, який створює даний модуль. Занадто довгий факел призводить до ряду негативних ефектів, як наприклад пропалювання трубної частини котла, а занадто короткий грозить проскакуванням полум'я всередину пальника та його перегріву. Часто занадто довгий факел є наслідком неефективного процесу сумішоутворення, та недопалу. (див. рис.4.6.)

Таблиця 4.2 Результати експерименту при спалюванні пропан-бутану на комбінованому струменево-нишевому пальниковому модулі при максимальній потужності 20кВт.

27.08.2024		P ₆	100300	Pa	L0 _{CH4}	29					
		S	20кВт		n	7шт		Ø	2 мм		
час		18:39	18:46	18:55	18:57	19:00	19:02	19:03	19:04	19:04	19:05
t _{prop}	°C	20	19,7	19,9	20,5	20,2	20,2	20,5	19,2	19,5	20,1
t _{air}	°C	20	20,2	20,6	20	20,2	20,2	20	20,5	20,2	20,3
t _{out}	°C	413	477	442	533	610	623	633	632	646	644
t _{x=900}	°C	452	515	497	593	690	723	735	745	755	755
t _{x=700}	°C	606	697	672	784	875	893	903	905	901	900
t _{x=500}	°C	857	949	690	1023	981	992	971	960	947	939
t _{x=300}	°C	1045	1104	1096	1160	1147	1120	1106	1105	1086	1094
t _{x=300(дійсна)}	°C	1130,1	1197,8	1188,6	1262,0	1247,1	1216,1	1200,1	1198,9	1177,1	1186,3
Δh _{повітря}	мм	13	4	3	2	1,5	1,25	1,1	1	0,75	0,5
h _{повітря}	мм	50	30	20	10	10	10	9	8	7	5
Δh _{пропан}	мм	163	160	160	163	170	167	165	165	165	165
h _{пропан}	мм	240	250	235	235	245	240	240	240	240	240
Nox (ОКСИ)	ppm	8	33	29	47	61	67	71	67	67	68
Nox (ОКСИ)	ppm	8	33	29	47	61	67	71	67	67	68
CO	ppm	590	307	316	142	17	4	5	509	1212	173
O ₂	%	17,8	14,4	14,6	11,7	6,8	3,3	2,2	0,9	0,2	0,7
CO ₂	%	2	4,1	4,1	6	9,1	11,4	12,1	13,3	13,5	13,1
α		6,56	3,23	3,28	2,25	1,48	1,18	1,12	1,01	1	1,03
G _{prop}	кг/с	0,00041	0,00040	0,00040	0,00041	0,00042	0,00041	0,00041	0,0004	0,00041	0,00041
ρ _{prop}		2,11	2,11	2,11	2,11	2,11	2,11	2,11	2,12	2,11	2,11
ρ _{повітря}		1,199	1,195	1,193	1,194	1,193	1,193	1,194	1,192	1,193	1,192
W _{air(за киснем)}		6,15	2,96	3,06	2,13	1,42	1,13	1,06	0,99	0,96	0,98
W _{air}		6,52	3,62	3,14	2,56	2,22	2,03	1,90	1,81	1,57	1,28
ΔW _{airГЛ}	%	5,69	18,30	2,50	17,01	35,95	44,20	44,32	45,45	39,13	23,51
G _{air}		0,0394	0,0218	0,0188	0,0154	0,0133	0,0121	0,0114	0,0109	0,0094	0,00771
G _{проп}	м ³ /год	0,70	0,70	0,70	0,70	0,72	0,71	0,71	0,71	0,71	0,71
N, кВт		19,54	19,34	19,36	19,56	19,95	19,78	19,67	19,63	19,64	19,66
W _{гс}		3,95	3,91	3,91	3,95	4,03	4,00	3,98	3,97	3,97	3,98
q		0,73	3,09	2,89	6,09	14,22	22,09	24,91	28,54	30,56	29,04

Завдяки цьому експерименту та даним отриманим з нього, а конкретно – довжині температурним режимам, рівням викидів, довжині факелу і т.д., можна зробити висновок, що модуль струменево-нишевого пальникового приладу

розроблений для спалювання природного газу, доволі легко адаптується до спалювання пропан-бутану, та потенційно дозволяє знайти ті конструктивні та режимні діапазони де можна буде спалювати і пропан-бутан і природний газ за допомогою одного і того ж пальникового модуля.

Та при цьому зберігається принцип модульності струменево-нишевих пальникових приладів, так як з графіків видно, що як при потужності 20кВт (див.рис.4.7-9 так і при потужності пальникового модуля в 30кВт зберігаються всі ті ж закономірності (див. рис. 4.4 – 6), що уможливорює комбінацію пальникових модулів цієї моделі в повноцінні пальникові пристрої.

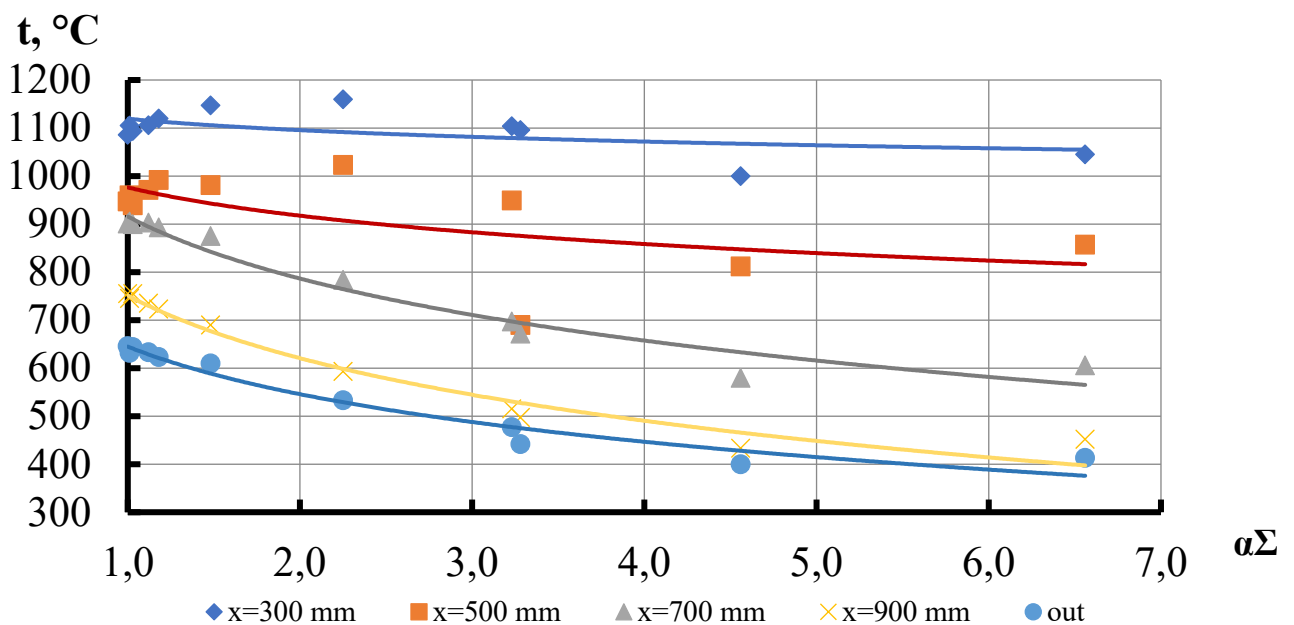


Рис. 4.7. Графік залежності температур від точки встановлення термомпери, а також від коефіцієнту надлишку повітря (α) при номінальній потужності пальникового модуля **30 кВт**.

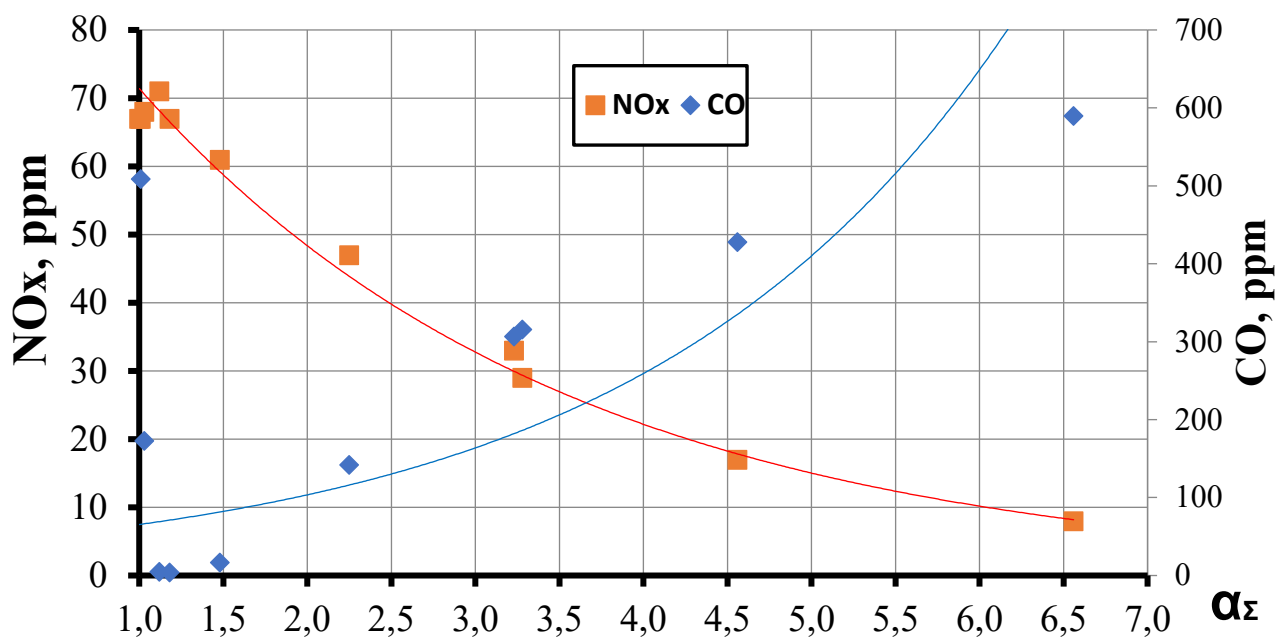


Рис. 4.8. Залежність рівня викидів шкідливих газів від коефіцієнту надлишку повітря (α) при номінальній потужності пального модуля **30 кВт**.

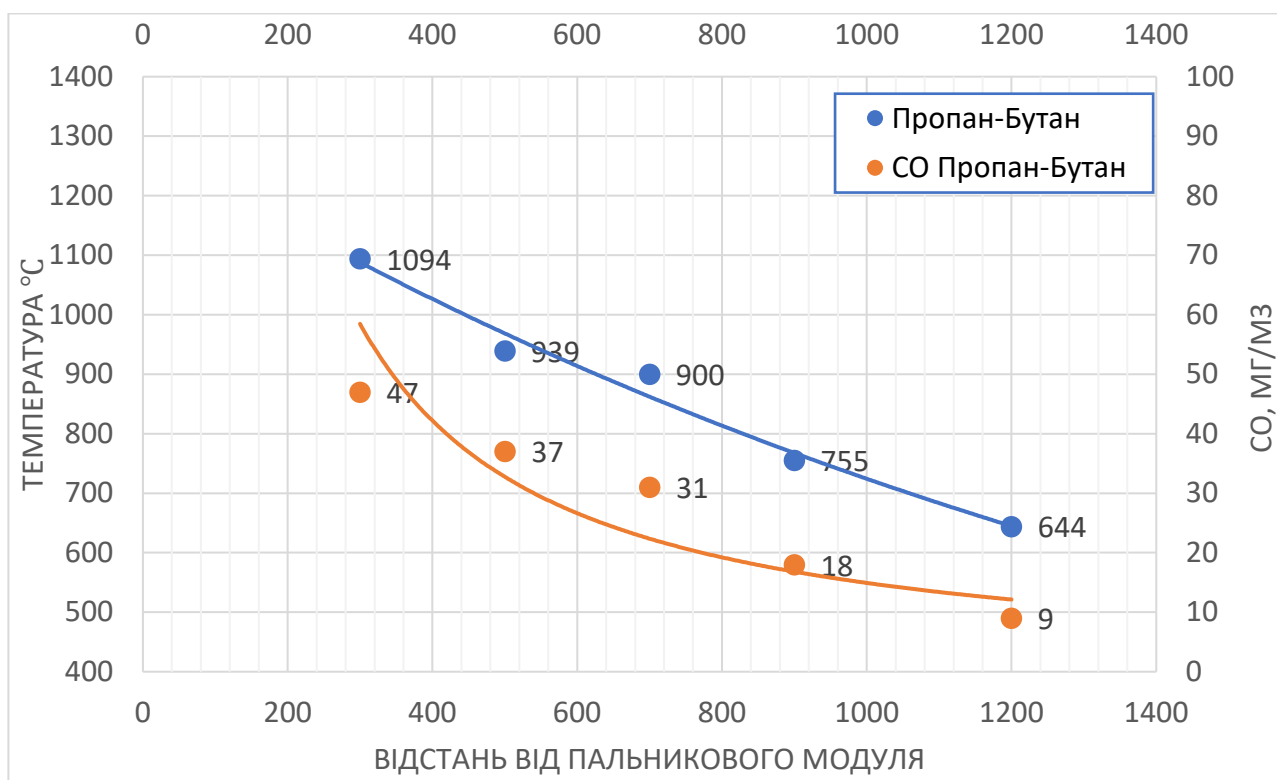


Рис. 4.9 Довжина факелу та рівень догорання пального модуля потужністю **20кВт** при роботі на пропан-бутану.

4.4 Висновки до четвертого розділу.

В процесі проведення натурних експериментів на лабораторному стенді, підтверджено висновки, зроблені під час комп'ютерного моделювання, окрім цього:

1. Уточнено діапазони конструкційних та режимних параметрів в межах яких можливе однаково ефективне горіння як пропан-бутану так і природнього газу.
2. Остаточно визначено конструктивні та режимні параметри роботи струменево-нішевого комбінованого пальникового модуля.
3. Підтверджено збереження визначальних особливостей струменево-нишевої технології для ефективної роботи в умовах почергового спалювання двох видах палива. А саме: низького супротиву по трактам палива та окиснювача, близького до мікродифузійного типу горіння, принципу модульності, низького рівня емісії шкідливих речовин і т.д.

Розділ 5. ДОСЛІДЖЕННЯ ВПЛИВУ ДОМІШОК ВОДНЮ НА РОБОЧИЙ ПРОЦЕС ГОРІННЯ В КОМБІНОВАНИХ СТРУМЕНЕВО-НІШОВИХ МОДУЛІВ ЗА ДОПОМОГОЮ НАТУРНОГО ЕКСПЕРИМЕНТУ.

У даному розділі досліджується вплив водневих домішок на робочий процес горіння у комбінованих струменево-нішових модулях. Для цього було проведено серію натурних експериментів на модифікованому лабораторному стенді.

Завершальним етапом досліджень в рамках даної дисертаційної роботи є дослідження ще одного підходу до створення комбінованих пальникових приладів, в яких для переходу з одного виду палива на інше не потребуються зміни в конструкційних розмірах та тривалого часу на підготовку.

Треба відмітити, що режимні параметри хоч і змінюються у відповідності для вибраного виду палива, для покриття різниці у процесах їх спалювання, але суттєво не змінюються. Такого результату можна досягти за допомогою додавання різної кількості домішко водню до того чи іншого палива. Таким чином в досліджуваному комбінованому струменево-нишевому пристрої передбачена подача як пропан-бутані і природнього газу, так і подача водню.

Цей метод не лише дозволяє спростити почергове спалювання двох та більше видів палива, за рахунок приближення їх теплоти згорання внаслідок добавок різної частки водню.

5.1. Експериментальний стенд.

Всі експериментальні дослідження, що полягали у вивченні впливу різної масової частки домішок водню на процеси горіння проводилися за тією самою методикою, що і попередні експерименти по спалюванню пропан-бутану та природнього газу. Лабораторний стенд зазнав лише ряду невеликих модифікацій, що полягли в підведенні тракту подачі водню в комбінований струменево-нішевий модуль. Вимірювальні прилади залишилися такими ж, що і в попередньому експерименті, крім цього була встановлена нова система вимірювання витрати водню на основі витратомірних діафрагм по його тракту.

5.2. Обробка результатів експерименту.

Одним із завдань експериментальних досліджень з застосуванням домішок водню, було дослідити їх вплив на реакційну здатність палив, особливо таких доволі низькореакційних, як пропан-бутан та природній газ. Виходячи з аналізу ряду літератури стосовно спалювання водню, це є закономірним результатом при додаванні 20-40% водню в паливну суміш. Схожі дослідження вже проводилися на струменево-нишевих пальниках та модулях, а саме Сірим О.І, та Кобилянської О.О [32]. З врахуванням досвіду цих досліджень, проводилися відповідні дослідження і на комбінованих струменево-нишевих пальникових модулях.

Іншою метою дослідження є аналіз ефективності приведення двох видів палива (пропан-бутану та природнього газу) до схожих значень теплоти згорання та коефіцієнтів Воббе. Це стає можливим, наприклад у випадку з пропан-бутаном та природним газом. Водень має теплоту згорання значно нижчу ніж і пропан-бутан і природній газ, тому суміш пропан-бутану з воднем буде ближчою по теплоті згорання до природнього газу ніж чистий пропан-бутан. Раніше в дисертації доведені залежності таких конструкційних параметрів, як діаметр паливоподавальних отворів (див. табл. 3.3) та відносний крок між ними від теплотворної здатності. Це стало підґрунтям того, що діапазон режимних та конструктивних параметрів в якому досягається ефективна роботи на двох видах палива можна розширити за рахунок приведення їх до схожих теплофікаційних характеристик.

Дані отримані в ході дослідження, доводять, що підвищення реакційної здатності палив, при її спалюванні в комбінованому струменево-нишевому пальниковому модулі з використанням масової частки водню (до 50%) призводить до низки позитивних ефектів. Серед них: більша повнота вигорання палива (γ), скорочення довжини факелу (L_{ϕ}), підвищення температурного режиму, зменшення викидів CO і т.д.

В ході проведених досліджень, підтверджено, що підвищення реакційної здатності палива, напрямую та значно впливає на структуру факелу. Як можна

бачити на рисунку 5.1. в струменево-нішевих системах при роботі на пропан-бутані, природньому газі чи іншому низькорекційному паливі, можна спостерігати зони з високою концентрацією палива 5-15%, паливо в яких не займається. Навіть не зважаючи на те, що розташовані вони поруч з зонами інтенсивного горіння. Це є результатом охолодження палива в цих зонах набігаючим потоком окиснювача.

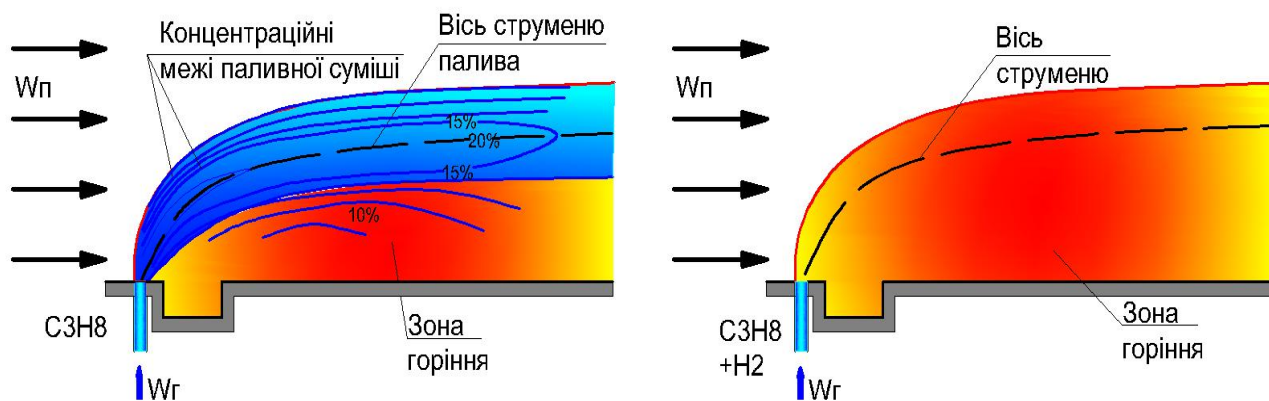


Рисунок 5.1. Вплив підвищення реакційної здатності в струменево-нишевій системі на структуру факелу.

Проте, після додавання певної частини домішок водню (до 50%) до паливної суміші, паливо в цих зонах займається внаслідок підвищення реакційної здатності.

В результаті, паливо що не згорало у факелі, більше не зноситься далі по топці, а догорає безпосередньо в найближчих зонах до струменево-нішевого модуля. Власне, як можна бачити з рисунку 5.5 після додавання домішок водню, до пропан-бутану, факел розпочинається безпосередньо за паливороздавальними отворами, стійкість горіння підвищується, а бідний зрив настає пізніше, ніж без домішок водню. Підвищується швидкість фронту полум'я внаслідок чого факел стає більш стійким до відриву при високих швидкостях окиснювача і т.д.



Рисунок 5.2 Вигляд факелу при спалюванні чистого пропан-бутану та його суміші з домішками водню.

Ефективна робота комбінованого пальникового модуля з конструкційними режимами розрахованими на ефективне спалювання пропан-бутану та природнього газу, при їх розмішуванні з воднем дозволяє припустити, що можливо ще більше розширити діапазони ефективної роботи на двох різних видах палива при незмінних конструктивних параметрах модуля. В даному випадку можна впливати на робочий процес такого пальникового модуля, не лише за допомогою режимних параметрів (швидкість палива та окисника, їх витрати і т.д.), але й змінювати такі параметри, як теплоту згорання, густин, і т.д.,

Це дозволяє компенсувати невідворотнє зменшення ефективності роботи таких пальникових приладів, в порівнянні з приладами пристосованими до спалювання лише одного виду палива. [30]

Дослідження проводилися в тих же діапазонах конструктивних та режимних параметрів, що й попередні, для більш зручного порівняння. Досліджувалися всі ті ж основні показники, що і при спалюванні природнього газу та пропан-бутану. В таблиці 5.1. приведені значення для комбінованого струменево-нишевого модуля, при цільовій потужності – 20 кВт, а також в процесі розпалу і до моменту багатого зриву. В таблиці 5.2. приведені все ті ж показники, але при потужності модулів 30кВт. [30]

Як і в попередніх експериментах, в даних таблицях наведено дані експерименту протягом якого поступово приближалися до розрахункових

режимних параметрів, серед яких виділяється наднизькі значення коефіцієнту надлишку повітря $\alpha=1,02!$

Таблиця 5.1 Результати експерименту при спалюванні суміші пропан-бутану та водню на комбінованому струменево-нишевому пальниковому модулі при максимальній потужності 20кВт.

Суміш пропан-бутану та водню										
25.09.2024		P ₆	100300	Pa	L _{0H2+CH4}	16,09	n	7		
		S	4,5		Ø	2	мм			
час		17:51	17:55	17:58	18:00	18:02	18:04	18:05	18:09	18:10
t _{prop}	°C	21,6	21,5	21,5	21,2	21,1	21,5	21,1	21,3	21,3
t _{H2}	°C	22,2	22,2	22,1	22,6	22,4	22,2	22,5	22,2	22,2
t _{air}	°C	22	22,2	21,9	22,3	22,4	22,1	22,6	22,3	22,4
t _{out}	°C	255	306,7	416,9	512,8	574,6	610,1	618	647,6	649
t _{x=900}	°C	283	341,3	461	561,4	635,3	708,1	722,7	749,3	750,7
t _{x=700}	°C	362	471,4	610,4	745,6	830	892,8	889,2	850,1	906,7
t _{x=500}	°C	442	737,9	890,7	975	988	969,7	973,8	981	977,2
t _{x=300}	°C	779	919,7	1123	1186,5	1220	1197	1198	1178	1181
W _{повітря}	м/с	10	8,2	5,5	3,6	2,4	1,7	2,3	2	1,6
h _{повітря}	мм	95	70	45	32	22	22	22	18	15
Δh _{пропан}	мм	130	135	135	135	155	140	140	140	140
h _{пропан}	мм	310	320	320	320	295	320	320	320	320
Δh _{водень}	мм	32	34	33	35	35	33	33	35	35
h _{водень}	мм	218	225	220	210	210	215	21	21	21
Nox	ppm	3	7	21	45	71	88	75	86	92
CO	ppm	549	428	300	236	25	6	5	461	46
O ₂	%	18,5	17,7	16	13,3	9,5	3,6	8,2	1	2,4
CO ₂	%	1,6	2	3,2	5	7,4	11,1	8,1	12,8	12
α		8,4	6,56	4,2	2,72	1,81	1,2	1,65	1,06	1,15
G _{prop}	г/с	0,368	0,376	0,376	0,376	0,402	0,383	0,383	0,383	0,383
ρ _{prop}	кг/м ³	2,11	2,12	2,12	2,12	2,11	2,12	2,12	2,12	2,12
ρ _{H2}	кг/м ³	0,084	0,084	0,084	0,084	0,084	0,084	0,082	0,083	0,083
G _{сум}	м ³ /год	1,65	1,69	1,67	1,71	1,75	1,69	1,70	1,73	1,73
ρ _{повітря}	кг/м ³	1,196	1,192	1,189	1,186	1,186	1,186	1,185	1,186	1,186
W _{air} (кис)		12,27	9,54	6,24	4,13	2,84	1,81	2,47	1,61	1,73
W _{air}		10,00	8,20	5,50	3,60	2,40	1,70	2,30	2,00	1,60
ΔW _{airГА}	%	22,73	16,32	13,40	14,65	18,26	6,20	7,32	19,57	8,10
G _{air}		0,060	0,04927	0,0329	0,0215	0,0143	0,0101	0,0137	0,0119	0,0095
α		8,18	6,52	4,41	2,82	1,83	1,35	1,81	1,55	1,24
Δα	%	2,57	2,48	4,89	3,44	0,26	11,72	10,43	47,45	9,67
N, кВт		20,84	21,26	21,21	21,31	22,60	21,54	21,56	21,67	21,67
W _{гс}		8,42	8,63	8,55	8,71	8,96	8,61	8,66	8,82	8,82
q̄		0,43	0,76	1,74	4,13	9,24	21,11	11,43	27,91	24,14

В таблиці 5.1. приведені, температурні дані на різних ділянках експериментального стенду (t_{x=900мм}, t_{x=700мм}, t_{x=500мм}, t_{x=300мм}, t_{відх.газ}),

температура палива ($t_{\text{пропан}} / t_{\text{водень}}$) та окиснювача ($t_{\text{повітря}}$). Також, приведені дані з витратомірних шайб (Δh повітря/пропану/водню та h повітря/пропану/водню). Окремий блок даних – значення складу продуктів спалювання з газоаналізатора – (значення NO_x , CO , O_2 , CO_2).

Як і очікувалося, в результаті додавання високореакційного палива, виросли показники температури продуктів спалювання по всій довжині робочої ділянки. В ході аналізу експериментальних даних, аналізувалися дані термопар, що розташовувалися на відстані 300, 500, 700, 900мм (див. рис.5.3-4), та на виході димових газів в атмосферу (1200мм). Експериментальні дані підтвердили, підвищення рівномірності температурного поля, та скорочення довжину факелу. Важливо, що у порівнянні з показниками горіння без домішок водню, (див. рис. 4.4.) температура більш помітно росла в зонах ближчих до модуля, а на виході з експериментального стенду, температура димових газів майже не відрізнялася. В першу чергу це зв'язано з тим, що факел скоротився (див. рис. 5.7), та приблизився до модуля. [29]

В свою чергу, температура димових газів на виході а атмосферу, майже не відрізнялася, бо струменево-нишеві пальникові модулі, які і з додаванням домішок воднем, так і без їх застосування забезпечують високе значення повноти вигорання палива. Тому в обох випадках, до кінця тракту доходили лише його сліди.

Таблиця 5.2 Результати експерименту при спалюванні суміші пропан-бутану та водню на комбінованому струменево-нишевому пальниковому модулі при максимальній потужності 30кВт.

Суміш пропан-бутану та водню							
25.09.2024	P ₀	100300	Па			L _{0H₂+CH₄}	16,09
	S	4,5	Ø	2	мм	n	7
час		18:24	18:33	18:34	18:37	18:38	18:39
t _{prop}	°C	20,8	20,6	20,7	20,6	20,7	20,5
t _{H₂}	°C	22,6	22,1	22	22,1	22,2	22,1
t _{air}	°C	22,3	22,1	21,8	22	22	22,2
t _{out}	°C	411,3	531,2	567,4	766,3	775,4	781,2
t _{x=900}	°C	466	519,7	615,8	813,8	820,6	841,9
t _{x=700}	°C	600,5	675,7	769,9	988,8	996,5	928
t _{x=500}	°C	803,3	956,4	1013,6	1024,1	1025,3	1006,3
t _{x=300}	°C	1038,1	1190,7	1222,8	1251	1251,4	1233,4
W _{повітря}	м/с	9,3	8,4	5,5	2,7	2,5	2,15
h _{повітря}	мм	95	70	45	32	22	22
Δh _{пропан}	мм	304	290	280	280	280	270
h _{пропан}	мм	470	620	620	640	640	640
Δh _{водень}	мм	70	60	65	68	68	68
h _{водень}	мм	460	415	420	425	425	425
No _x (окси)	ppm	13	19	42	87	92	101
CO	ppm	446	390	300	11	7	14
O ₂	%	17	3,1	13,7	5,5	4,2	1,1
CO ₂	%	2,5	3,1	4,7	10	10,8	1,8
α		5,25	4,37	2,91	1,35	1,25	1,08
G _{prop}	кг/с	0,000568468	0,000559	0,000549	0,00055	0,00055	0,00054
ρ _{prop}	кг/м ³	2,15	2,18	2,18	2,19	2,19	2,19
ρ _{H₂}	кг/м ³	0,086	0,086	0,086	0,086	0,086	0,086
G _{сум}	м ³ /год	2,44	2,31	2,35	2,38	2,38	2,36
ρ _{повітря}	кг/м ³	1,194	1,192	1,190	1,188	1,186	1,187
W _{air} (кис)		11,38	2,40	5,98	2,86	2,64	2,21
W _{air}		9,30	8,40	5,50	2,70	2,50	2,15
ΔW _{airГЛ}	%	22,33	71,44	8,80	5,79	5,44	2,77
G _{air}		0,055997921	0,05049	0,03299	0,016169	0,014952	0,012863
Δα	%	2,36	317,54	9,36	12,29	12,53	15,49
N, кВт		31,40	30,24	29,98	30,06	30,07	29,61
W _{гс}		12,27	11,42	11,62	11,75	11,76	11,67
q̄		1,09	21,56	3,59	16,20	19,06	26,71

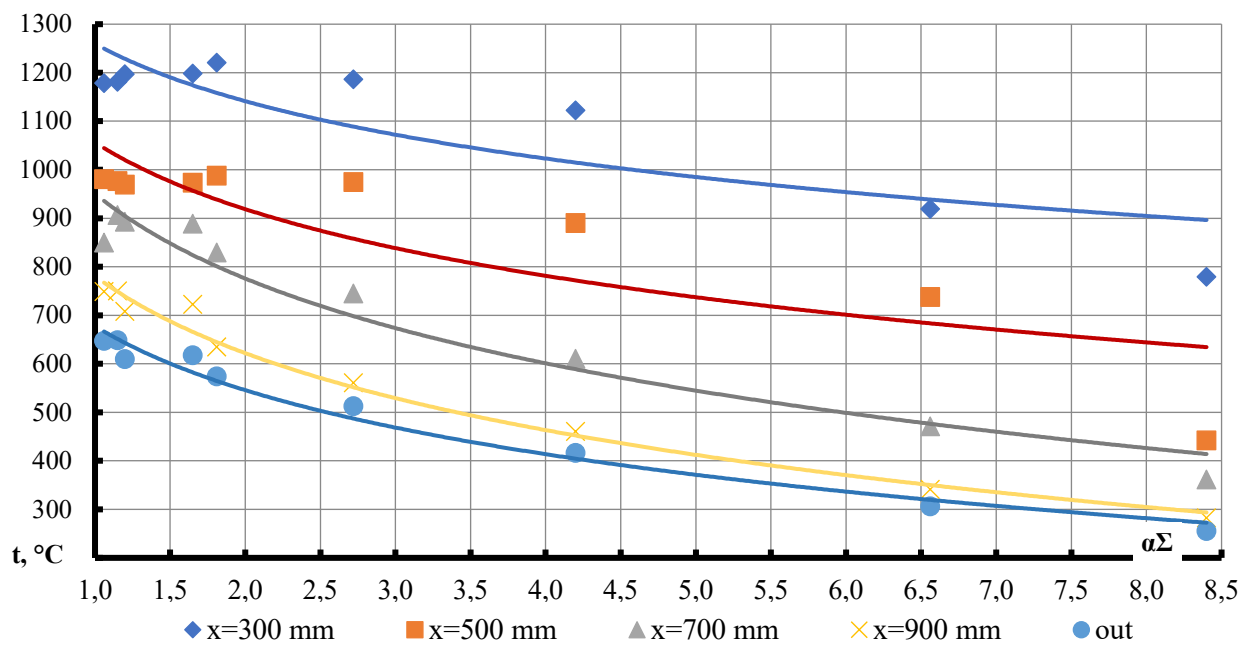


Рисунок 5.3 Температура в різних участках робочої ділянки лабораторного стенду при спалюванні суміші пропан-бутану та водню на палиниковому модулі потужністю 20кВт.

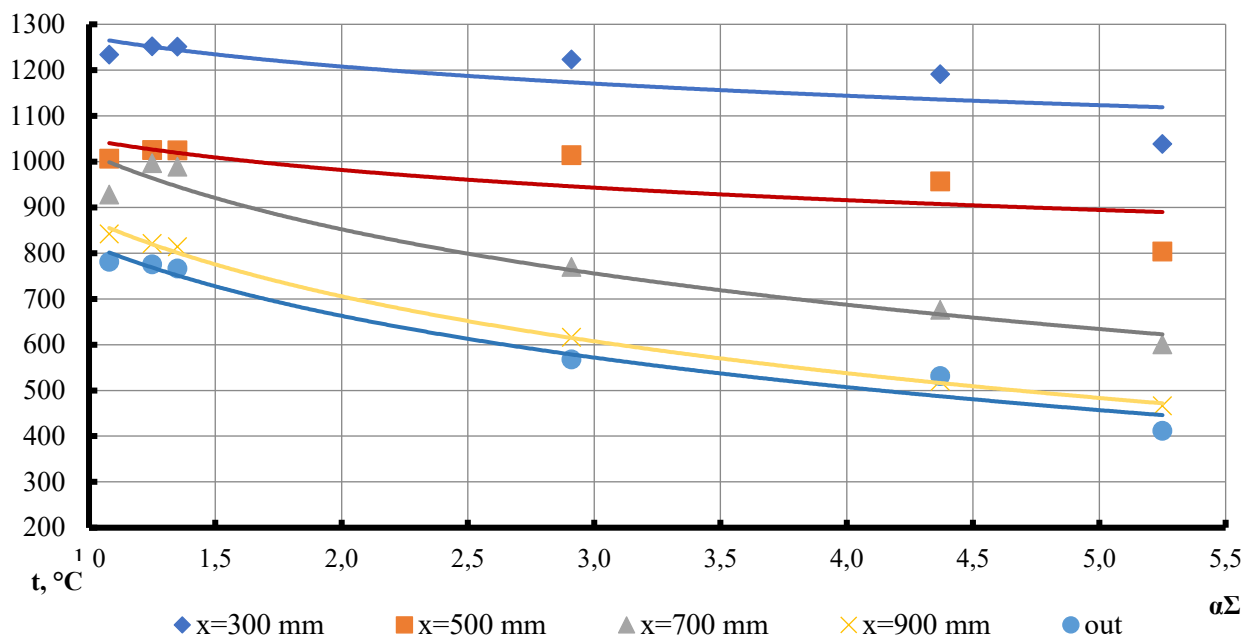


Рисунок 5.4 Температура в різних участках робочої ділянки лабораторного стенду при спалюванні суміші пропан-бутану та водню на палиниковому модулі потужністю 30кВт.

Внаслідок росту температура у факелі за рахунок підвищення реакційної здатності паливної суміші, закономірно відбулося зростання рівня емісії NOx (див. рис. 5.5-6.) Це є логічним побічним наслідком підвищення середнього температурного режиму в лабораторному стенді, від якого залежить рівень емісії оксидів азоту. [29]

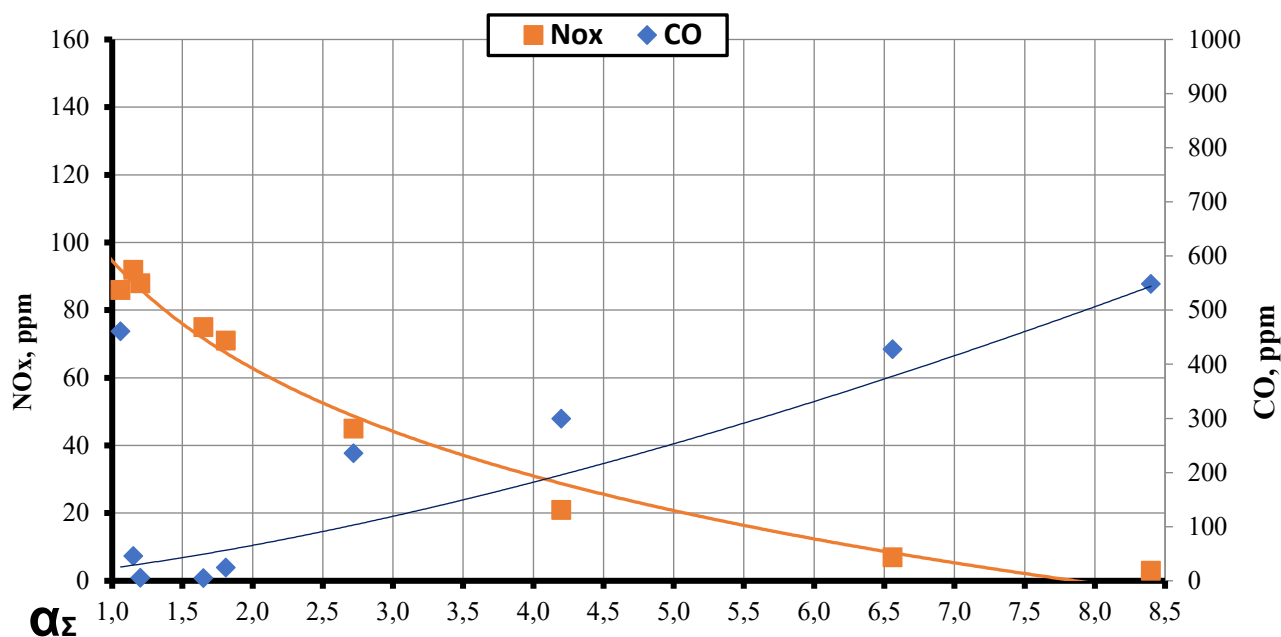


Рисунок 5.5 Рівень викидів (NOx та CO) при спалюванні пропан-бутану з домішками водню на струменево-нишевому пальниковому модулі потужністю **20кВт.**

В той же самий час, з ростом температури і підвищенням рівня викидів NOx (яке варто відмітити є доволі невеликим, на рівні 2-3%) відбувається значне зменшення рівня викидів CO в атмосферу. Що є ще одним доказом позитивного впливу домішок водню на якість догорання.

Ці фактори також значно впливають на зміну структури факелу, а саме скорочення його довжини. Паливо яке не встигло взяти участь в реакції та зайнятися, відноситься в кінець тракту, а потім і в атмосферу. У випадку підвищення реакційної здатності палива, а як наслідок температури в топковому просторі, відбувається ефективніше догорання палива і сліди CO стають незначними. [29]

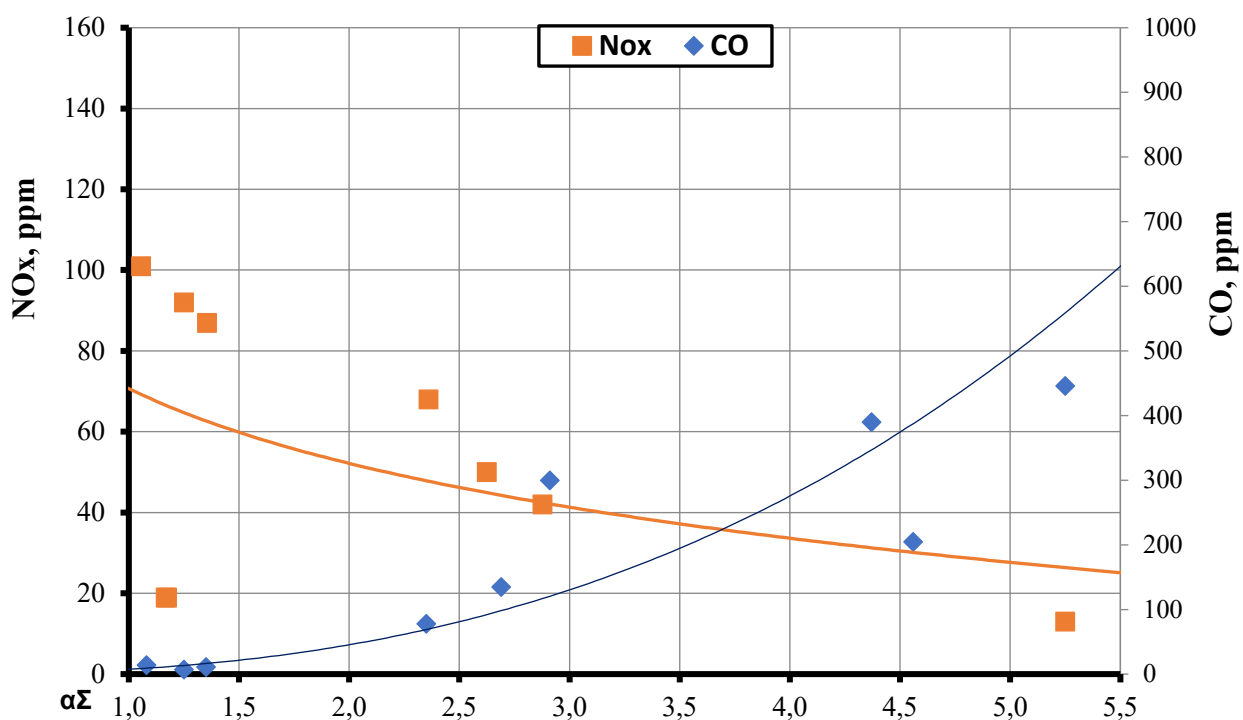


Рисунок 5.6 Рівень викидів (NO_x та CO) при спалюванні пропан-бутану з домішками водню на струменево-нишевому пальниковому модулі потужністю **30кВт.**

З рисунку 5.7 та 5.8. видно, що при застосуванні домішок водню в комбінованих струменево-нишевих пальникових модулях, потужністю 20 та 30 кВт, знижується рівень емісії в навколишнє середовище CO (який і так був доволі низьким). По тому, як поступово віддаляючись від модуля знижуються і показники CO і середня температура димових газів, можна судити про довжину факелу.

Як уже згадувалося раніше, при застосуванні домішок водню, хоч і середня температура виросла, але насамперед за рахунок підвищеної температури безпосередньо біля модуля.

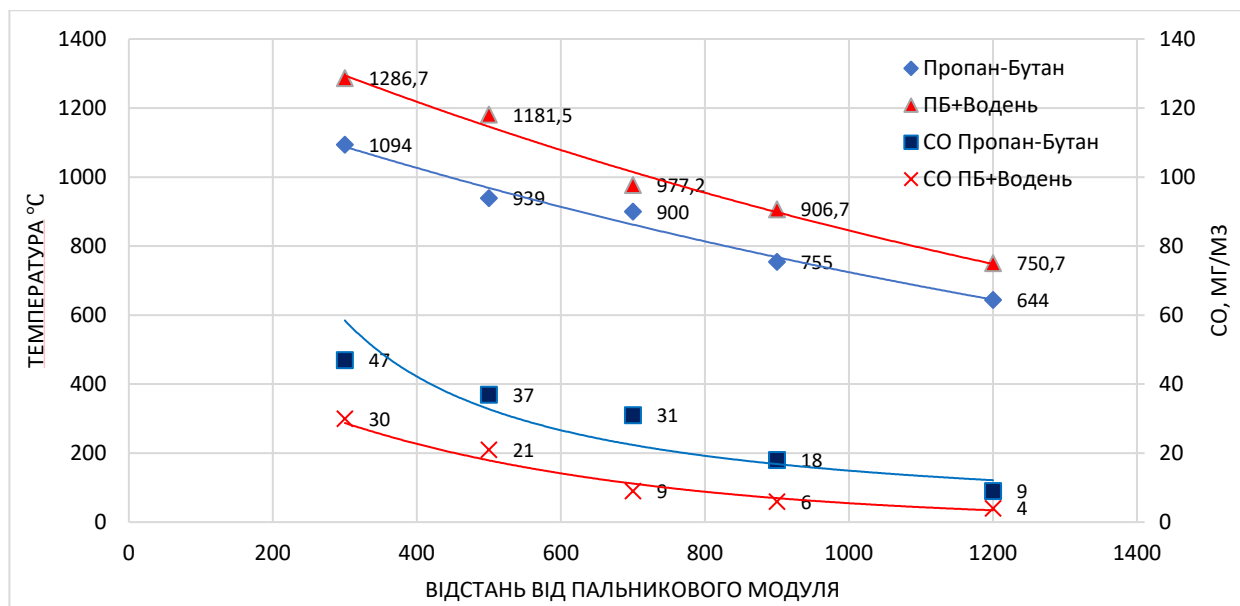


Рисунок 5.7 Довжина факелу та рівень догорання пальникового модуля потужністю **20кВт** при роботі на пропан-бутані з домішками водню.

Як і випадку з попередніми графіками, на рис. 5.7 та 5.8. всі закономірності зберігаються, незалежно від потужності пальникового модуля. Тому, як і у випадку, коли домішки водню не застосовувалися, при їх застосуванні зберігається принцип модульності струменево-нишевих систем.

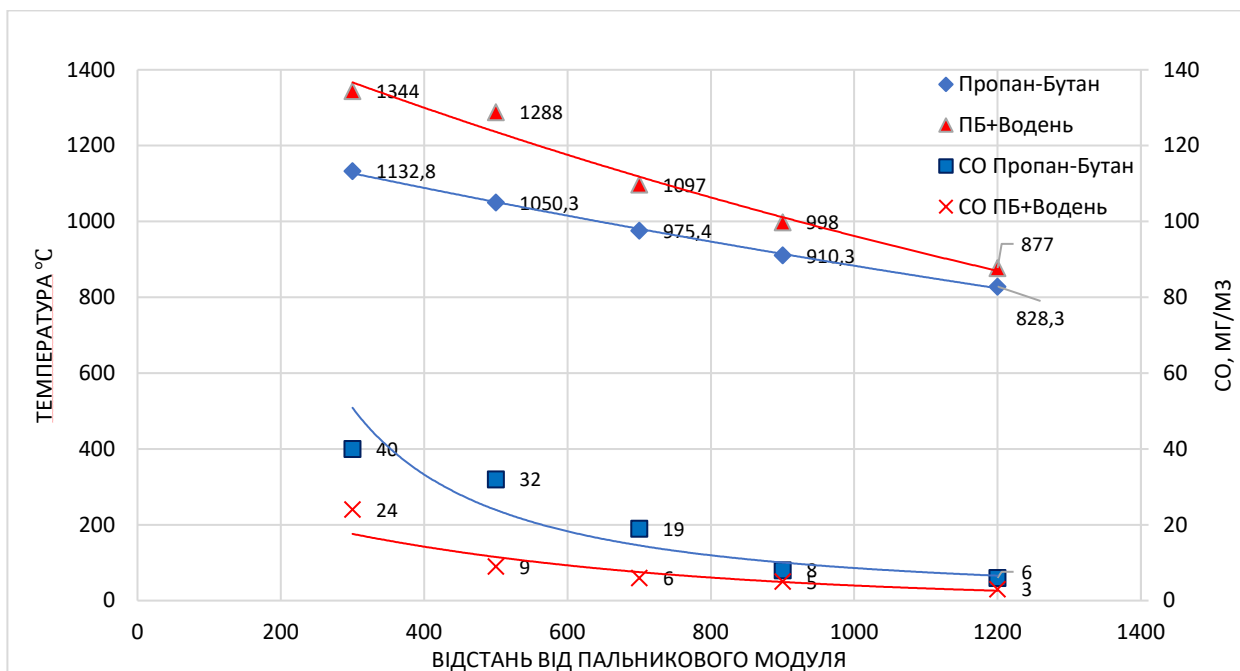


Рисунок 5.8 Довжина факелу та рівень догорання пальникового модуля потужністю **30кВт** при роботі на пропан-бутані з домішками водню.

В ході дослідження помічено доволі високий рівень рівномірності температурного поля продуктів спалювання в робочому стенді. Рівномірність фіксується, як при спалюванні пропан-бутану, так і його суміші з воднем, не лише по довжині факелу, але й в поперечних розрізах робочої ділянки.

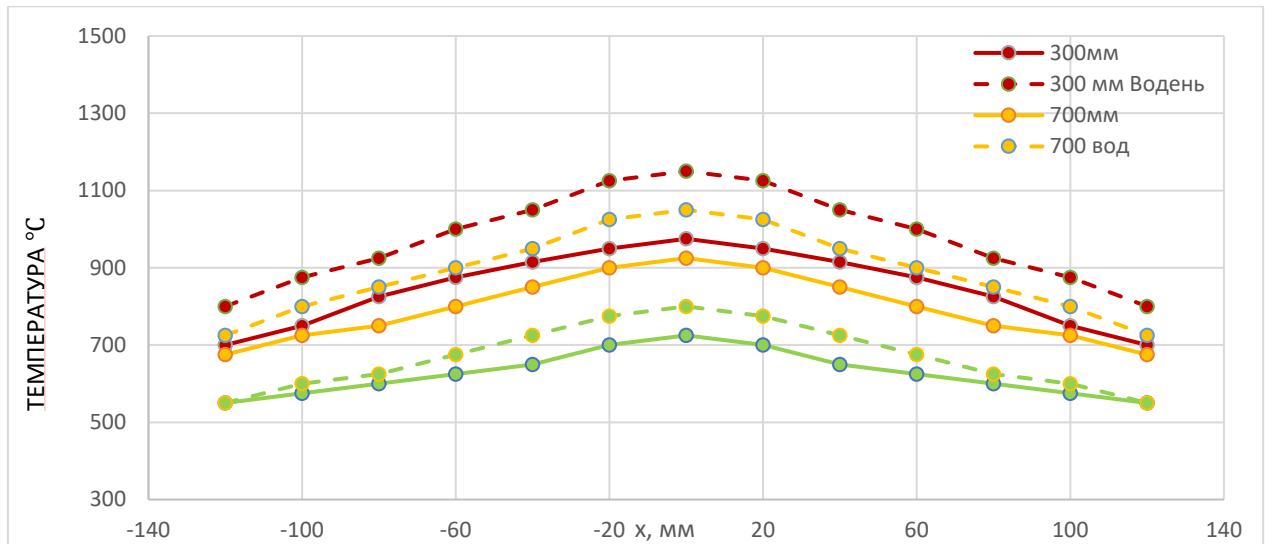


Рисунок 5.9 Зміна розподілу температур в поперечному зрізі факелу пальникового модуля потужністю **20кВт** в залежності від наявності домішок водню.

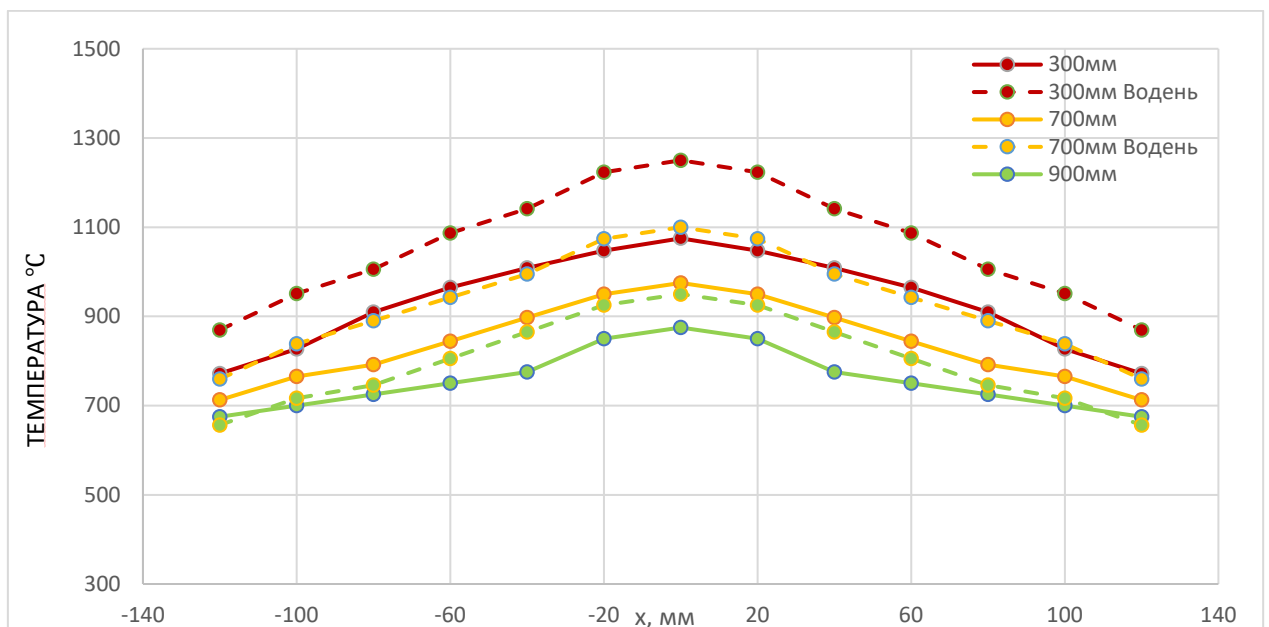


Рисунок 5.10 Зміна розподілу температур в поперечному зрізі факелу пальникового модуля потужністю **30кВт** в залежності від наявності домішок водню.

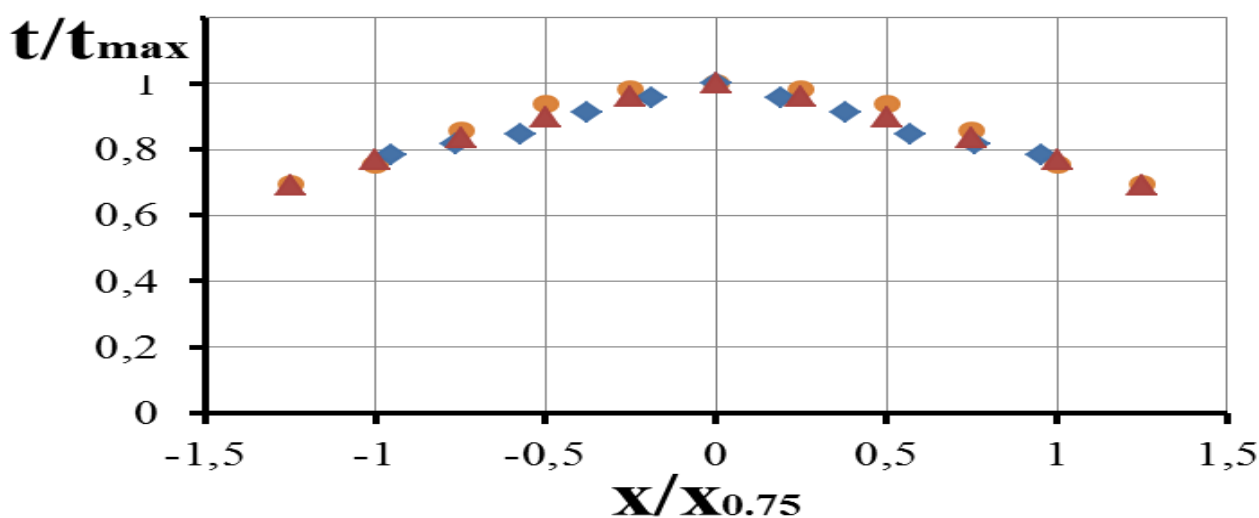


Рисунок 5.11 Значення температур у поперечному перерізі факелу в напрямку нормальному до струменево-нишевого модуля. [54]

5.3. Висновки до п'ятого розділу.

Проведені експериментальні дослідження впливу водневих домішок на робочий процес горіння в комбінованих струменево-нишевих модулях засвідчили низку важливих закономірностей, що мають як теоретичне, так і практичне значення для вдосконалення технологій спалювання газових паливних сумішей. Аналіз отриманих результатів дозволяє сформулювати наступні висновки:

1. Встановлено, що введення водню у паливну суміш у масовій частці до 50% забезпечує підвищення реакційної здатності низькорекційних палив, таких як пропан-бутан та природний газ, що сприяє інтенсифікації процесів горіння, зростанню ступеня повноти згорання та скороченню довжини факелу.
2. Доведено, що використання водневих домішок приводить до зближення теплоти згорання та коефіцієнтів Воббе пропан-бутану та природного газу, що дозволяє експлуатувати комбіновані пальникові пристрої без необхідності зміни конструктивних параметрів, зберігаючи їхню ефективність у широкому діапазоні паливних композицій.

3. Виявлено, що введення водню у паливну суміш сприяє перерозподілу температурного поля всередині камери згоряння, що призводить до зміщення зони максимальних температур у бік пальникового модуля, забезпечуючи більш локалізоване згоряння палива та мінімізуючи втрати енергії в кінцевих зонах топкового простору.

4. Установлено закономірність між підвищенням температурного режиму та збільшенням концентрації NO_x у продуктах згоряння, що обумовлено високотемпературними механізмами утворення термічних оксидів азоту. Водночас, експериментально підтверджено суттєве зниження рівня емісії оксиду вуглецю (CO), що свідчить про прискорення процесів окислення залишкових продуктів неповного згоряння та зменшення частки незгорілого палива.

5. Встановлено, що поряд із класичними режимними параметрами (витрати палива, швидкість подачі окисника, коефіцієнт надлишку повітря) додавання водню дозволяє ефективно регулювати фізико-хімічні характеристики паливної суміші, зокрема її теплотворну здатність і густину, що відкриває можливості для гнучкої адаптації процесу горіння до різних видів паливної бази без внесення конструктивних змін у пальникові пристрої.

6. Отримані результати підтверджують перспективність застосування комбінованих струменево-нишевих пальникових модулів із водневими домішками для забезпечення стабільного та ефективного процесу горіння в умовах варіативності паливних ресурсів, що створює передумови для подальшого вдосконалення енерготехнологічних систем з підвищеною гнучкістю паливозабезпечення.

ВИСНОВКИ

Відповідно до мети та завдань дослідження проведено аналіз літератури присвячений проблемі підвищення рівня ефективності організації топкового процесу в різноманітних вогнетехнічних об'єктах, що працюють у широкому діапазоні температур за рахунок створення комбінованих пальникових пристроїв, що реалізують принципи струменево-нішевої технології. Науково-дослідні центри з вивчення процесів горіння практично у всіх країнах світу продовжують дослідження та нові розробку в сфері комбінованого спалювання газоподібних палив.

Зроблено огляд видів вогнетехнічних об'єктів, розглянуто з історичної точки зору використання людством різних видів палив, проаналізовано різноманітні технології спалювання та провівши невеликий огляд водневої енергетики і т.д..

Проаналізовано особливості функціонування струменево-нішевої технології, які дає змогу створити комбіновані пальникові пристрої здатні з однаковою ефективністю спалювати два та більше види палива, без внесення конструктивних змін в роботу об'єкті та пальника і не потребуючі додаткового часу на підготовку. Описано організацію топкового процесу за допомогою комбінованих струменево-нишевих пальникових пристроїв.

Для вирішення завдань дисертації вироблена методологія та методика проведення досліджень, яка передбачала експериментальні дослідження у лабораторних умовах, комп'ютерне моделювання та проведення досліджень у промислових умовах. Методики проведення досліджень на експериментальних стендах та методики обробки експериментальних даних, що використовувались при проведенні досліджень, багато років розроблялися, апробувалися та вдосконалювалися у лабораторії горіння теплоенергетичного факультету Київського політехнічного інституту.

Проведено оцінку похибок приладових вимірювань: похибка визначення витрати та тиску палива, похибка вимірювання температурних характеристик, похибка вимірювання емісійних характеристик.

В результаті комп'ютерного моделювання аеродинаміки течій, та процесів сумішоутворення в комбінованому струменево-нишевому пальниковому модулі та проведених досліджень на експериментальних стендах ТОВ«НВК «СНТ» та лабораторії КПІ ведуться подальші роботи над типорядом комбінованих струменево-нишевих пальникових пристроїв.

При проведенні досліджень організації топкового процесу вогнетехнічних об'єктів було виявлено, що струменево-нишеві пальникові пристрої можуть ефективно працювати в режимі змінного навантаження, навіть при переході з одного палива на інше, що додатково дозволяє оптимізувати споживання палива. Виявлено, що при неузгодженості режимів роботи можуть спостерігатися наднормативні викиди чадного газу СО та незгорілого палива.

В результаті проведених досліджень промислових пальникових пристроїв було вперше експериментально отримано дані щодо роботи комбінованого модуля струменево-нішевої технології. Проведено аналіз ефективності можливої модернізації існуючих об'єктів шляхом впровадження струменево-нішевої технології. Запропоновано інженерно-технологічні підходи до модернізації вогнетехнічних об'єктів на основі комбінованого використання різних видів палива. Виконано попередній розрахунок комбінованих струменево-нишевих пальників на основі базового струменево-нішевого модуля.

При проведенні досліджень організації топкового процесу промислової газифікаторної установки підтверджено результати отримані в дисертації, а також ефективність комбінованих струменево-нишевих пальникових пристроїв на практиці. Випробовування ефективності даного пальникового пристрою в умовах довготривалої експлуатації досі проводяться.

Випробування дозволили визначити діапазон стійкої роботи комбінованих струменево-нішевих пальникових пристроїв та провести їх порівняння зі звичайними струменево-нішевими пальниками та штатними пальниками.

В даних пальникових пристроях попередньо фіксуються наступні переваги: відбувається стабільний процес горіння навіть при низьких значеннях тиску та критично низьких значеннях коефіцієнту надлишку повітря ($\alpha=1,02$); факел не виходить за допустимі межі; відсутні перевищення допустимих норм емісії шкідливих речовин на режимах близьких до номінального та в процесі розпалювання; широкі можливості до регулювання температури факела дозволяють використання пальників на вогнетехнічних об'єктах з широким діапазоном необхідних температур в топці. Конструкція ПП дозволяє перемикатися між використанням природного газу і пропан-бутану, без втручання в конструкцію самого пальникового пристрою.

В результаті виконаної роботи була отримана наступна наукова новизна:

1. Вперше за допомогою отриманих даних експериментальних досліджень визначено діапазони основних конструкційних ($d=2.5...3.5$ мм, $L=12...18$ мм, $s/d=3...4$), та режимних параметрів ($W_{п}=10...15$ м/с, $W_{г}=10...20$ м/с, $\alpha=1,05...3$), комбінованих струменево-нішових пальникових модулів (для роботи на пропан-бутані та природному газі), що забезпечують необхідну структуру течії, якість сумішоутворення, теплопереносу, стабілізації полум'я і повноту вигорання палива в зоні стабілізації горіння.
2. Створено струменево-нішевий пальниковий модуль здатний до ефективної роботи на пропан-бутані та природному газі при наднизьких коефіцієнтах надлишку повітря ($\alpha_{кр} \sim 1,02$)
3. Проведено дослідження впливу масової частки водню (до 50%) в паливній суміші струменево-нішевого комбінованого пальникового модуля, на підвищення реакційної здатності, а також зменшення числа Воббе $W =$

$$\frac{Q_n^p}{\sqrt{\rho_f/\rho_o}} W_{\text{пропан-бутан}} \sim 20,7 \text{ ккал/м}^3 > W_{\text{пб+в}} \sim 15,6 \text{ ккал/м}^3 > W_{\text{природний газ}} \sim 12,6 \text{ ккал/м}^3 > W_{\text{водень}} \sim 10,5 \text{ ккал/м}^3$$

4. На основі комбінованих струменево-нишевих модулів, створено модельний ряд пальникових пристроїв. Такі пальникові пристрої забезпечують більше значення коефіцієнту робочого регулювання (**більше 6**), коротший факел (**на 5-10%** при однакових умовах) та здатні пускатися при нижчому тиску палива (**в 3-4 рази**) в порівнянні з іншими моделями комбінованих пальникових пристроїв. [74]
5. Ведуться роботи по дослідженню довгострокового функціонування вищезгаданих пальникових пристроїв, та витрати їх ресурсу на промисловому об'єкті.

Результати дослідження підтвердили зростання ефективності вогнетехнічних об'єктів з впровадженням запропонованої технології, що дозволяє значно підвищити економічні та екологічні показники роботи вогнетехнічних об'єктів без суттєвих змін у їхній конструкції, сприяючи підвищенню енергетичної безпеки та технологічної гнучкості паливоспалююч систем.

Таким чином, остаточні висновки дисертаційної роботи мають наступний вигляд:

1. Сформовано ряд рекомендацій (фундаментальних, екологічних, економічних і т.д.) до диверсифікації паливної бази вогнетехнічних об'єктів.
2. Одним з найбільш перспективних палив, на даний момент є скраплений пропан-бутан, він екологічно чистіший за більшість палив, має вищу теплотворну здатність, а також спрощує процес автоматизації. Його зберігання в скрапленому вигляді дозволяє зменшувати розмір паливного господарства в декілька разів.

3. У зв'язку з тим, що водень має не надто велику об'ємну теплоту згорання, але високу реакційну здатність використання його домішок в паливних сумішах є доволі ефективним (особливо в струменево-нішевих пальникових пристроях, що забезпечують достатній рівень перемішування палива і т.д.) Це водночас дозволяє зменшити коефіцієнт Воббе пропан-бутану, привести його теплоту згорання до більш схожих на природний газ значень. Крім цього застосування домішок водню також призводить до підвищення реакційної здатності, як пропан-бутану так і природного газу.

4. Результати досліджень показали, що завдяки підвищенню реакційної здатності паливної суміші, особливо перспективними домішки водню є при спалюванні палив з низькою теплотворною та реакційною здатністю – доменний-, генераторний-, біо-газ і т.д.

Крім того, проведено порівняльний аналіз комбінованих струменево-нішових пальникових пристроїв, традиційних струменево-нішових пальників та пальників інших сучасних типів.

Пальники сучасних типів	Комбінований струменево-нішевий пальник	Струменево-нішевий пальник при роботі на природному газі
Коеф. надлишку повітря (α) ~ 1,15...1,25	Коеф. надлишку повітря (α) ~ 1,05...1,1	Коеф. надлишку повітря (α) ~ 1,05...1,1
Коеф.робочого регулювання (K_p) ~ 3...5	Коеф.робочого регулювання (K_p) ~ 6...8	Коеф.робочого регулювання (K_p) ~ 10
Мінімальний тиск при пуску ($P_{\text{мін}}$) ~ 1000	Мінімальний тиск при пуску ($P_{\text{мін}}$) ~ 75	Мінімальний тиск при пуску ($P_{\text{мін}}$) ~ 100
Питома вага пальника (кг/ МВт) ~ 20	Питома вага пальника (кг/ МВт) ~ 15	Питома вага пальника (кг/ МВт) ~ 12
Питомі витрати ел.енергії (кВт/Гкал) ~ 20	Питомі витрати ел.енергії (кВт/ Гкал) ~ 19	Питомі витрати ел.енергії (кВт/ Гкал) ~ 18

В таблиці приведені попередні дані випробувань комбінованих струменево-нішових пальникових пристроїв. З неї видно, що в цілому комбіновані струменево-нішові пальники забезпечують дещо гірші значення таких параметрів, як коефіцієнт робочого регулювання (K_p), питома вага пальника та питомі витрати електроенергії, ніж струменево-нішовий пальник розрахований

на спалювання одного виду палива. Проте це є невеликою ціною за можливість спалювати два та більше види палива з відносно однаковою ефективністю. Варто відзначити, що показники критичного коефіцієнту надлишку повітря ($\alpha_{кр}$), та мінімального тиску при пуску ($P_{пуск}$) більші або рівні ним же у випадку класичного струменево-нишевого пальника. А решта проаналізованих параметрів все ще перевершують рівень пальників інших типів.

З досвіду модернізації водогрійних та парових котлів на основі струменево-нишевої технології, забезпечення представленого рівня показників дає можливість забезпечити високий рівень ККД (вище паспортного), можливість ефективної роботи в широкому діапазоні потужностей та безпеку пуску. Крім того, технологія дозволяє зменшувати емісію шкідливих речовин до рівню європейських нормативів (насамперед NO_x) за допомогою ефективного використання рециркуляції димових газів.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Pirani, S. Burning up. A global History of Fossil Fuel Consumption. 2018.
2. Brimblecombe, P. The Big Smoke (Routledge Revivals): A History of Air Pollution in London since Medieval Times. Routledge, 2012.
3. History. Доступно за адресою: <http://naturalgas.org/overview/history/>
4. Анастасенко, С. М., Білюк, І. С., Бугрім, Л. І., Гаврилов, С. О. Національний університет кораблебудування імені адмірала Макарова. Львів: Новий Світ-2000, 2021.
5. Шидловський, А. К. Енергетичні ресурси та потоки. Енергетика України на початку ХХІ століття.
6. ІАЕА. The 1986 Chernobyl nuclear power plant accident. Доступно за адресою: <https://www.iaea.org/topics/chernobyl>
7. Catt, B. The Viability of All Renewable Grids with Battery Storage Support. The deliverability and full cost of renewable energy without fossil support.
8. Murtaugh, D., Chen, S. Recycling wind turbine blades can solve the industry's biggest problem. Japan Times, 2024. Доступно за адресою: <https://www.japantimes.co.jp/environment/2024/03/09/sustainability/wind-turbine-blade-recycle/>
9. На 5,8% більше електроенергії: результати перших 4 місяців 2021. Доступно за адресою: <https://kosatka.media/category/elektroenergiya/analytics/na-5-8-bolshe-elektroenergiy-rezultaty-pervyh-4-mesyacev-2021>
10. European Commission. Commission staff working document on the evaluation of the Directive 2006/66/EC on batteries and accumulators and waste batteries and accumulators and repealing Directive 91/157/EEC. Brussels, 2019. Доступно за адресою: https://commission.europa.eu/system/files/2019-04/swd-report-batteries-accumulators-april2019_en.pdf
11. USGS. How are bats affected by wind turbines? Доступно за адресою: <https://www.usgs.gov/faqs/how-are-bats-affected-wind-turbines>

12. USGS. Collision and displacement vulnerability among marine birds of the California Current System associated with offshore wind energy infrastructure. Доступно за адресою: <https://www.usgs.gov/publications/collision-and-displacement-vulnerability-among-marine-birds-california-current-system>
13. Gajanayake, S. M., Gamage, R. P., Li, X.-S., Huppert, H. Natural gas hydrates – Insights into a paradigm-shifting energy resource. Доступно за адресою: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S277297022200013X>
14. Fusion Industry Association. The global fusion industry in 2023. Fusion Companies Survey. Доступно за адресою: <https://www.fusionindustryassociation.org/wp-content/uploads/2023/07/FIA-2023-FINAL.pdf>
15. Design and testing of a Multi-Fuel industrial burner suitable for syn-gases, flare gas and pure hydrogen. Доступно за адресою: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S2451904923001981>
16. ДБН В.2.5-77:2014. Котельні.
17. СНіП II-35-76. Котельні установки.
18. ДСТУ 4223-2003. Котли, посудини під тиском і трубопроводи.
19. Jenkins, B., Mullinger, P. Industrial and Process Furnaces: Principles, Design and Operation. Butterworth-Heinemann, 2011. ISBN 9780080558066.
20. Grzella, J., Sturm, P., Krüger, J., Reuter, M. A., Kögler, C., Probst, T. Metallurgical Furnaces. John Wiley & Sons, 2005. p. 7.
21. US patent 417943.
22. NASA Glenn Research Center. "Combustor - Burner". 2015.
23. Global Fuel Economy Initiative. "Fuels". Доступно за адресою: www.globalfueleconomy.org. Retrieved 2022-04-12.
24. Бондаренко, В. І., Варламов, Г. Б., Вольчин, І. А., Карп, І. М., Колоколов, О. В., Кравченко, Т. Г., Кузьменко, О. М., Ландау, Ю. О., Лук'янчиков, В. С., Мойсеєнко, О. В., Півняк, Г. Г., Подгуренко, В. С., Сігал, І.

Я., Скляр, П. Т., Чернявський, М. В., Широков, С. В. Енергетика: історія, сучасність і майбутнє. Від вогню та води до електрики.

25. Абдулін, М. З. Дисертація: Розроблення теплофізичних засад технологій спалювання палив з застосуванням струменевонішових систем.

26. Абдулін М. З. Розроблення теплофізичних засад технологій спалювання палив із застосуванням струменево-нішових систем.

27. Абдулін М. З. та інші. Струменево-нишева технологія спалювання палива – основа надійної роботи вогнетехнічного обладнання // Третя Міжнародна науково-практична конференція «Енергоефективність крупного промислового регіону»: зб. наук. пр. – 2008. – С. 18–24.

28. Абдулін М. З. та інші. Оптимізація топкового процесу – шлях до підвищення ефективності, екологічної безпеки і надійності роботи котлів // Новини теплопостачання. – 2008. – № 4. – С. 31–35.

29. Абдулін М. З., Сірий О. А., Назарова І. О. Вітчизняні енергоефективні технології – запорука енергетичної безпеки держави // Збірник тез доповідей Міжнародної науково-технічної конференції молодих учених та студентів «Актуальні задачі сучасних технологій». – 2014. – С. 231–232.

30. Абдулін М. З., Куник А. А. Шляхи створення універсальних та комбінованих пильникових приладів // Вчені записки. – 2023. – С. 52023289.

31. Лось Л. В., Цивенкова Н. М. Проблема енергоносіїв та її вирішення в сільському господарстві України біоенергетичними газогенераторами. – 2004.

32. Сірий О. А. Вплив параметрів струменево-нішевої системи на робочий процес пильникових пристроїв. – 2016.

33. Абдулін М. З., Сірий О. А., Куник А. А. Підвищення реакційної здатності природного газу та пропан-бутану.

34. Aminudin M. A. et al. An overview: Current progress on hydrogen fuel cell vehicles // International Journal of Hydrogen Energy. – 2023. – Vol. 48, No. 11. – P. 4371–4388.

35. Kojima H. et al. Influence of renewable energy power fluctuations on water electrolysis for green hydrogen production // *International Journal of Hydrogen Energy*. – 2023. – Vol. 48, No. 12. – P. 4572–4593.
36. Osman A. I. et al. Biofuel production, hydrogen production and water remediation by photocatalysis, biocatalysis and electrocatalysis // *Environmental Chemistry Letters*. – 2023. – Vol. 21, No. 3. – P. 1315–1379.
37. Verleysen K., Parente A., Contino F. How does a resilient, flexible ammonia process look? Robust design optimization of a Haber-Bosch process with optimal dynamic control powered by wind // *Proceedings of the Combustion Institute*. – 2023. – Vol. 39, No. 4. – P. 5511–5520.
38. Kværner-process with plasma arc waste disposal technology. Archived from the original on 2014-03-13. Retrieved 2009-10-13.
39. Ao, Y., Chen, Y., Wu, Y., He, Y., Zhou, Z. High hydrogen yield from a two-step process of dark- and photo-fermentation of sucrose // *International Journal of Hydrogen Energy*. – 2007. – 1 Feb.
40. Badwal, S. P. S., Giddey, S., Munnings, C., Bhatt, A. I., Hollenkamp, A. F. Emerging electrochemical energy conversion and storage technologies // *Frontiers in Chemistry*. – 2014. – Vol. 2. – P. 79. doi:10.3389/fchem.2014.00079.
41. Werner Zittel; Reinhold Wurster (1996-07-08). "Chapter 3: Production of Hydrogen. Part 4: Production from electricity by means of electrolysis". HyWeb: Knowledge – Hydrogen in the Energy Sector. Ludwig-Bölkow-Systemtechnik GmbH. Archived from the original on 2007-02-07. Retrieved 2010-10-01.
42. Janssen, H; Emonts, B.; Groehn, H. G.; Mai, H.; Reichel, R.; Stolten, D. (1 July 2001). High pressure electrolysis: the key technology for efficient H₂ production (PDF). Hypothesis IV: Hydrogen power – theoretical and engineering solutions international symposium.
43. Hauch, Anne; Ebbesen, Sune Dalgaard; Jensen, Søren Højgaard; Mogensen, Mogens (2008). "Highly efficient high temperature electrolysis". *Journal of Materials Chemistry*. 18 (20): 2331–40. doi:10.1039/b718822f.

44. Low, Jingxiang; Yu, Jiaguo; Jaroniec, Mietek; Wageh, Swelm; Al-Ghamdi, Ahmed A. (May 2017). "Heterojunction Photocatalysts". *Advanced Materials*. 29 (20). Bibcode:2017AdM....2901694L. doi:10.1002/adma.201601694. ISSN 0935-9648. PMID 28220969. S2CID 21261127.
45. Криль Я. М. и др. Status and prospects of renewable hydrogen use in Ukraine: impact on industry and decarbonization pathways // *Мінеральні ресурси України*. – 2023. – № 2. – С. 12-16.
46. Єфімов О., Ліфшиць П., Каверцев В. Удосконалення технологічної схеми спалювання газу в теплових установках металургійних підприємств // *Вісник Національного технічного університету «ХПІ»*. Серія: Енергетичні та теплотехнічні процеси й устаткування. – 2023. – № 3. – С. 21-25.
47. Карвацкий А. Я. Моделирование энергозберігаючих регламентів промислового обладнання / А. Я. Карвацкий. Київ: НТУУ «КПІ», 2014. – 234 с.
48. Abdulin M.Z. Research of hydrodynamic flame stabilizer with cross fuel feed characteristics / M.Z. Abdulin, O.A. Siryi // *Riga Technical University*. 2014. №15. p.32–38.
49. Дослідження гідродинамічного стабілізатора полум'я з поперечною подачею палива / М. З. Абдулін, А. А. Сірий // *Сучасні проблеми наукового забезпечення енергетики: матеріали XII Міжнародної науково-практичної конференції аспірантів, магістрантів і студентів, НТУУ «КПІ», Київ, 21-24 червня 2014 р.* – С. 101.
50. Абдулін М. З. Вітчизняні енергоефективні технології - запорука енергетичної безпеки держави / М. З. Абдулін, О. А. Сірий // *Колективна монографія. КПІ, 2013.* – С. 224–233.
51. Сірий О. А., Кобилянська О. О. «CFD-симулювання процесу спалювання суміші метан-водень в струменево-нішевому стабілізаторі полум'я» // *Вчені записки Таврійського національного університету імені В. І. Вернадського*. – 2022. – Т. 33 (72), №4. – С. 12-19.

52. РД153-34.1-26.303-98 Методологічні вказівки по проведенню експлуатаційних випробувань котельних установок для оцінки якості ремонту. — М.: ОРГРЭС, 2000. — 35 с.
53. Абдулін М. З., Джамал І. Дослідження пальникового пристрою з поперечною подачею струменів палива // Екотехнології та ресурсозбереження. — Київ, 1997. — №2. — С. 68–70.
54. Сірий О. А. Вплив параметрів струменево-нішевої системи на робочий процес пальникових пристроїв: дис. канд. техн. наук.: 05.14.14 — теплові та ядерні енергоустановки / Олександр Анатолійович Сірий. — Київ, 2016. — 198
55. О. В. Семеняко. ТЕРМОАНЕМОМЕТРИЧНІ ВИМІРЮВАННЯ ХАРАКТЕРИСТИК ТЕЧІЇ В МІЖРЕБЕРНИХ КАНАЛАХ ПЛОСКО-ОВАЛЬНИХ ТРУБ // Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського». ORCID 0000-0002-9097-1358.
56. ДСТУ ГОСТ 29134-97. Пальники газові промислові. Методи випробувань. Зі змінами, метрології і сертифікації. — М.: Видання стандартів, 2004. — 31 с.
57. Типова інструкція з експлуатації газового господарства теплових електростанцій РД 34.20.514-92.
58. Дибан Е.П., Єпик Є.Я. Тепломасообмін і гідродинаміка турбулізованих потоків. — Київ: Наукова думка, 1985. — 296 с.
59. Khedia, K.S., Ghoniem, A.F. (2012). Mechanisms of stabilization and blowoff of a premixed flame downstream of a heat-conducting perforated plate. *Combustion and Flame*, Elsevier, 159(3), 1055-1069.
60. Фіалко Н.М., Шеренковський Ю.В., Майсон Н.В., Бутовський Л.С. (2014). Вплив пластинчастих турбулізаторів потоку на характеристики течії та сумішоутворення палива і окислювача в циліндричному стабілізаторному пальниковому приладі. *Науковий вісник НЛТУ України*, 24.6, 114-121.
61. Абдулін М.З., Джамал І. Аномальні явища стійкості горіння за пілоном з поперечною подачею струменів палива. *Екотехнології і*

ресурсозбереження, Київ, 3 (1997), 68-70. NASPLIB, ВІНІТІ РАН, Ulrich's Periodicals Directory.

62. ГКД 34.02.305-2002. Викиди забруднювальних речовин у атмосферу від енергетичних установок: методика визначення. Чинний від 01.07.2002.

63. Абдулін М.З., Шелешей Т.В., Куник А.А. Аналіз впливу топкового режиму на температуру відхідних газів в котлоагрегатах при їх модернізації на основі струменево-нішевої технології. *Modern Scientific Researches*, Yolnat PE, 11(2), 43-51.

64. Колієнко А.Г. (2021). Використання суміші природного газу і водню як палива в комунально-побутових і промислових паливоспалювальних теплогенеруючих установках.

65. Present and future fuels in the shipping industry: Dual Fuels. *Accelleron – The future of turbocharging today*. <https://accelleron-industries.com/charge-magazine/present-and-future-fuels-in-the-shipping-industry-dual-fuels> (дата звернення: 25.06.2024).

66. Сорока Б.С., П'яних К.Є., Згурський В.О., Горупа В.В., Кудрявцев В.С. (2020). Енергетичні та екологічні характеристики побутових газових приладів при використанні метано-водневої суміші як паливного газу. *Нафтогазова галузь України*, 6, 3-14.

67. Natural Gas for High Horsepower (NHP) Summit. NHP Summit. URL: <https://www.hhpsummit.com> (дата звернення: 25.06.2024).

68. Fialko, N.M., Prokopov, V.G., Butovskiy, L.S. (2010). Simulation of the flow structure of an isothermal flow in the echeloned lattice of flat flame stabilizers. *Industrial heat engineering*, p. 21-29.

69. Черноусенко, О. ., Бутовський, Л., Мороз , О., Куник, А., & Хілімончук , Д. (2023). Розробка та дослідження дифузійностабілізаторного пальника з нішею. Вісник Національного технічного університету «ХПІ». Серія: Енергетичні та теплотехнічні процеси й устаткування, (1-2), 47–54. <https://doi.org/10.20998/2078-774X.2022.01.08>

70. Which Burner; Gas, Oil, or Dual Fuel Burners - UKHVAC. UKHVAC. URL:<https://ukhvac.co.uk/which-burner-gas-oil-or-dual-fuel-burners/#:~:text=Fuel%20Flexibility:%20Dual%20fuel%20burners,promoting%20efficiency%20and%20cost%20savings> (дата звернення: 25.06.2024).

71. Choosing the Right Type of Industrial Burner. Filter. URL: <https://filter.eu/choosing-industrial-burners/> (дата звернення: 25.06.2024).

72. Industrial oil and gas dual fuel burner_bntet burner. Boiler Gas burner,diesel burner,Biomass burner,light heavy oil burner,rotary kill burners,Asphalt plant burner,low temp burner,line burner,china Industrial burner-Bntet burner. URL: <https://bntet-burner.com/news/Industrial-oil-and-gas-dual-fuel-burner.html> (дата звернення: 25.06.2024).

73. Things You Didn't Know About Bi-Fuel and Dual-Fuel - New & Used Generators, Ends and Engines | Houston, TX | Worldwide Power Products. Commercial & Industrial Generators | Houston, TX | Worldwide Power Products. URL: <https://www.wpowerproducts.com/blog/generator-engine-fuels/5-things-you-didnt-know-about-bi-fuel-and-dual-fuel/#:~:text=Efficiency:%20The%20greatest%20advantage%20of,as%20a%20gas-powered%20car.> (дата звернення: 25.06.2024).

74. Daley J. Two Fuels Are Better Than One. Illinois Tech Magazine. URL: <https://magazine.iit.edu/fall-2017/two-fuels-are-better-one> (дата звернення: 25.06.2024).

ДОДАТОК А. Список публікацій здобувача за темою дисертації.

Публікації в яких представлені основні наукові результати дисертації:

1. Черноусенко, О., Бутовський Л., Мороз О., Куник А., Хілімончук Д. (2023). Розробка та дослідження дифузійностабілізаторного пальника з нішею. *Вісник Національного технічного університету «ХПІ»*. Серія: Енергетичні та теплотехнічні процеси й устаткування, (1-2), 47–54. <https://doi.org/10.20998/2078-774X.2022.01.08> (Дисертантом проведений огляд літератури за темою публікації.)
2. Куник А., Абдулін М., Шляхи створення універсальних та комбінованих пальникових приладів. *Вчені записки ТНУ імені В.І. Вернадського*. Серія: Технічні науки Том 34 (73) № 5 2023 стр. 289-294 <https://doi.org/10.32782/2663-5941/2023.5/44> (Дисертант брав участь у підготовці проектної документації для виготовлення комбінованого пальникового пристрою на основі струменево-нішевої технології, а також брав безпосередню участь у налагоджувальних експериментальних дослідженнях.)
3. Куник А., Абдулін М., Особливості створення одно- та багатопаливних пальникових приладів. *Вчені записки ТНУ імені В.І. Вернадського*. Серія: Технічні науки Том 36 (76) № 4 2024 стр.1-5 <https://doi.org/10.32782/2663-5941/2024.5.2/01> (Дисертантом виконано оглядову частину публікації, сформульовано постановку задачі та окреслено основні особливості технічного впровадження багатопаливних пальників у промислове використання.)
4. Куник А., Абдулін М., Сірий О., Ткаченко С., Куник А., Boilers modernization due to energy-ecological improvement technology of burning. *Journal of the Chemical Institutes of the Bulgarian Academy of Sciences and of the Union of Chemists in Bulgaria Bulgarian Chemical Communications*, Volume 52, Special Issue F (pp. 14-19) 2020 DOI: 10.34049/bcc.52.F.0002 Google Scholar, Scopus (Дисертант опрацював режимні карти водогрійних котлів КВГМ-20.)

Патент на корисну модель.

5. Абулін М., Фіалко Н., Тимощенко, Куник А., Пальниковий пристрій UA 143503 U, МПК 2020.01, F23Q 13/02 (2006.01), F23D 14/00

Публікації, які засвідчують апробацію матеріалів дисертації:

6. Сірий О., Абдулін М., Куник А., Зріджені газы. Нові можливості. *«Вугільна теплоенергетика: шляхи реконструкції та розвитку»*. Збірка наукових праць: XVI Міжнародної науково-практичної конференції м. Київ, 20-25 жовт. 2020р./ Інститут вугільних енерготехнологій НАН України м. Київ, 2020. С. 142-146.

7. Абдулін М., Куник А., Кобилянська О., Нові види резервного та аварійного палива. *«Проблеми екології і експлуатації об'єктів енергетики»*. Збірник праць: XXIX Міжнародної конференції м. Чорноморськ 10-14 черв. 2019р. / Інститут промислової екології м.Київ, 2020. С. 137-142.

8. Абдулін М., Куник А., Шелешей Т., Взаємозв'язок втрат теплоти з відхідними газами та емісії NO_x в котлоагрегатах. *«Вугільна теплоенергетика: шляхи реконструкції та розвитку»* Збірка наукових праць: XVII Міжнародної науково-практичної конференції м. Київ, 19-20 жовт. 2021р./ Інститут теплоенергетичних технологій НАНУ м.Київ, 2021. С.206-210.

9. Абдулін М., Куник А., Порхун С., Перспективи використання пропан-бутану в якості палива на вогнетехнічних об'єктах. *«Проблеми екології і експлуатації об'єктів енергетики»* Збірник наукових праць: XXX Міжнародної конференції м.Київ, 19-20 лист. 2020р./ Інститут промислової екології, Київ, 2021р. С.50-55.

10. Сірий О., Абдулін М., Куник А., Підвищення реакційної здатності природного газу та пропан-бутану. *«Проблеми екології і експлуатації об'єктів енергетики»* Збірник праць: XXXII Міжнародної конференції м.Київ, 20-21 вер. 2022р./ Інститут промислової екології, Київ, 2023р. С.57-63.

ДОДАТОК Б Порівняльна характеристика природного газу та водню.

Назва горючої характеристики	Од. вим.	Величина характеристики CH_4	Величина характеристики H_2
Нижча теплота згорання	МДж/м ³	335,88	10,79
Індекс Воббе (нижчій)	МДж/м ³	13	39
Межі спалахування у суміші з повітрям:	%об		
- нижча, X_H		5,0	4,0
- вища, X_H		15,0	75,0
Теоретичні витрати повітря на горіння	м ³ /м ³	9,52	2,38
Температура горіння (жаропродуктивність)	°С	2043	2235
Об'єм продуктів згорання ($\alpha = 1$)	м ³ /м ³	10,52	2,88
Максимальна швидкість розповсюдження (поширення) полум'я	м/с	0,37	2,67
Коефіцієнт надлишку повітря α на межах спалахування:			
- нижній межі спалахування		1,8	9,8
- вищій межі спалахування		0,65	0,15
Теоретична потреба у повітрі для повного згорання (стехіометрична кількість повітря)	м ³ /м ³	9,52	2,38
Щільність	кг/м ³	0,71	0,089

ДОДАТОК В - Характеристики горючих газів

Властивість газу	Одиниця	Газ					
		Водень	Пропан	Бутан	Метан	СО	Ацетилен
Густина	кг/м ³	0,091	2,003	2,702	0,716	1,251	1,172
Межа поширення полум'я:							
-нижча C _H	об. %	4,11	2,21	1,91	5,0	12,55	2,55
-вища C _B	об. %	75	9,5	8,5	15,0	74	81
Температура запалення t _{ЗАП}	°С	530-595	530-565	490-565	645-850	610-655	335-500
Нормальна швидкість розповсюдження полум'я U _{Hmax}	см/с	315	39,1	37,91	29-33,1	-	171
Стехіометричний коефіцієнт:							
-L _V	м ³ /м ³	2,39	23,91	31,02	9,51	2,39	11,9
-L _O	кг/кг	34,52	15,71	15,47	17,24	2,48	13,26
Нижча теплота згоряння Q _H ^P	МДж/м ³	10,77	96,1	118,6	35,7	12,57	56,02
Температура горіння T _{Гmax}	°С	2241	2154	2117	2041	2379	2665
Енергія запалювання, Q _{ЗАП}	МДж	0,018	0,38	0,37	0,47	-	0,012

ДОДАТОК Г Акт впровадження ТОВ«НВК»СНТ»

ТОВАРИСТВО З ОБМЕЖЕНОЮ ВІДПОВІДАЛЬНІСТЮ
«НАУКОВО-ВИРОБНИЧА КОМПАНІЯ «СТРУМЕНЕВО-НИШОВА ТЕХНОЛОГІЯ»

тел./факс: +38 (044) 462-52-62
e-mail: npk.snt@gmail.com
www.sn-technology.com



вих. №35/2 від 10.02.24 року

АКТ

Даним актом підтверджується, що аспірант кафедри ТАЕ Навчально-наукового інституту атомної та теплової енергетики Національного технічного університету України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»; група ТУ-11ф, - Куник Арсен Андрійович, проводив експериментальні дослідження робочого процесу нового комбінованого струменево-нишевого пальникового пристрою у складі газифікаторної установки при роботі на пропан-бутані та природньому газі та їх сумішами з домішками водню.

Результати досліджень використовуються при створенні нового модельного ряду комбінованих струменево-нішових пальникових пристроїв.

Генеральний директор



М. ПІСКУН/

Україна, 04080, м. Київ, вул. Кирилівська, 102
ЄДРПОУ № 38934729,
IBAN № UA383209840000026008210308813 в АТ «Прокредит Банк»
ІПН 389347226535, сс-св № 200147702

ДОДАТОК Д. Акт впровадження НТЦ «Флогістон»

Товариство з обмеженою відповідальністю
**«НАУКОВО-ТЕХНІЧНИЙ ЦЕНТР
«ФЛОГІСТОН»**

вих № 2-2025к 04.02.2025 року

АКТ

Цим актом підтверджую, що аспірант кафедри Теплових та атомних електростанцій, Навчально-наукового інституту атомної та теплової енергетики Національного технічного університету України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського» групи ТУ-11ф, - Куник Арсен Андрійович, провів ряд експериментальних досліджень та комп'ютерних моделювань, в результаті яких визначив нові та уточнив існуючі залежності конструктивних та режимних параметрів, що тепер активно використовуються в роботі науково-технічного центру.

Заступник директора



Г.Р.Дворцин

м.Київ-2025р.