

**НАЦІОНАЛЬНИЙ ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ УКРАЇНИ
«КИЇВСЬКИЙ ПОЛІТЕХНІЧНИЙ ІНСТИТУТ
імені ІГОРЯ СІКОРСЬКОГО»**

Навчально-науковий інститут атомної та теплової енергетики
Кафедра теплової та альтернативної енергетики

"На правах рукопису"
УДК 662.767.2

«До захисту допущено»
Завідувачка кафедри

_____ Ольга ЧЕРНОУСЕНКО
(підпис)
“ ”
_____ 2025 р.

**Магістерська дисертація
на здобуття ступеня магістра
за освітньо-науковою програмою
«Теплоенергетика та теплоенергетичні установки електростанцій»
зі спеціальності 144 «Теплоенергетика»**

**на тему «Розробка засобів підвищення ефективності стабілізаторних
пальників при спалюванні нетрадиційних газів»**

Виконав : студент II курсу, групи ТУ-31мн

Всеволод ДОРОСЕВИЧ
(Власне ім'я, ПРИЗВИЩЕ)

_____ (підпис)

Науковий керівник доцент, кандидат техн. наук, доцент
(Посада, науковий ступінь, вчене звання)

- Леонід БУТОВСЬКИЙ
(Власне ім'я, ПРИЗВИЩЕ)

_____ (підпис)

Консультант _____
(Посада, науковий ступінь, вчене звання)
(назва розділу)

_____ (Власне ім'я, ПРИЗВИЩЕ)

_____ (підпис)

Рецензент доц. кафедри судових енергетичних установок,
допоміжних механізмів суден та їх експлуатації
Державного університету інфраструктури і технологій

к.т.н., доцент Панов С. Л.
(Посада, науковий ступінь, вчене звання, прізвище та ініціали)

_____ (підпис)

Засвідчую, що у цій магістерській дисертації немає
запозичень з праць інших авторів без відповідних
посилань

Студент _____
(підпис)

Науковий керівник _____
(підпис)

Київ - 2025 року

**НАЦІОНАЛЬНИЙ ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ УКРАЇНИ
«КИЇВСЬКИЙ ПОЛІТЕХНІЧНИЙ ІНСТИТУТ
імені ІГОРЯ СІКОРСЬКОГО»**

Навчально-науковий інститут атомної і теплової енергетики
Кафедра теплової та альтернативної енергетики

Рівень вищої освіти – другий (магістерський)
Спеціальність 144 «Теплоенергетика»

Освітньо наукова програма

«Теплоенергетика та теплоенергетичні установки електростанцій»

ЗАТВЕРДЖУЮ
Завідувачка кафедри

_____ Ольга. ЧЕРНОУСЕНКО
(підпис) (ініціали, прізвище)

“ ____ ” _____ 2025 р.

ЗАВДАННЯ
на магістерську дисертацію студенту
Всеволоду Доросевичу
(ім'я, прізвище)

1. Тема дисертації: Розробка засобів підвищення ефективності стабілізаторних пальників при спалюванні нетрадиційних газів
Науковий керівник дисертації Леонід Бутовський, кандидат техн.. наук, доцент
затверджені наказом по університету від “ 18 ” березня 2025 року № 1168-с
2. Термін подання студентом дисертації 16.05.2025 р.
3. Об'єкт дослідження - Процеси мікрофакельного спалювання забаластованих газів замість традиційного палива - природного газу.
4. Предмет дослідження _Мікрофакельні пальникові пристрої стабілізаторного типу для спалювання нетрадиційних газів
5. Перелік питань, які потрібно розробити –
 - 1) Аналіз впливу вмісту баластних домішок на теплотехнічні та фізико-хімічні характеристики газових палив різного складу.
 - 2) Аналіз характеристик робочого процесу горіння газу при наявності баластних домішок.
 - 3) Представлення експериментального стенду, методики заміру параметрів і оброблення результатів досліджень;
 - 4) Виконання дослідів і оброблення експериментальних даних.

5) Розробка рекомендацій щодо засобів підвищення ефективності пальникових пристроїв при спалювання нетрадиційних газів.

6. Орієнтовний перелік ілюстративного матеріалу

- 1) Основні характеристики газових палив, засоби спалювання газових палив різного складу.
- 2) Вплив складу паливних газів на характеристики сталості і показники горіння нетрадиційних палив.
- 3) Представлення експериментального стенду.
- 4) Результати досліджень вплив складу паливних газів на характеристики сталості горіння факелу і показники горіння в двонішевих пальникових пристроях.

7. Орієнтовний перелік публікацій

Стаття в науковому журналі категорії Б – 1.

8. Консультанти розділів дисертації

Розділ	Ім'я, ПРІЗВИЩЕ та посада консультанта	Підпис, дата	
		завдання видав	завдання прийняв

7.Дата видачі завдання 17.03.2025 р.

Календарний план

Ч. ч	Назва етапів виконання магістерської дисертації	Термін виконання етапів магістерської дисертації	Примітка
1	Участь в налазці експериментального стенду та розрахунках режимів роботи	25.03.25	
2	Проведення досліджень з впливу баластних домішок на межі горіння факелу	01.04.25	
3	Проведення досліджень з впливу режимних факторів на характеристики факелу	20.04.25	
4	Аналіз результатів досліджень та розробка рекомендацій	5.05.25	
5	Оформлення і подання дисертації до захисту	16.05.25	

Студент

(підпис)

Всеволод ДОРОСЕВИЧ

(Власне ім'я, ПРІЗВИЩЕ)

Науковий керівник

(підпис)

Леонід БУТОВСЬКИЙ

(Власне ім'я, ПРІЗВИЩЕ)

АНОТАЦІЯ

Магістерська дисертація на здобуття ступеня магістра за освітньо-науковою програмою підготовки на тему: «Розробка засобів підвищення ефективності стабілізаторних пальників при спалюванні нетрадиційних газів»: 89 с., 43 рис., 1 табл., 39 джерел.

Актуальність теми

На багатьох енергетичних, промислових і комунальних об'єктах – котлах, печах, підігрівачах різних матеріалів, сушилах тощо в якості палива використовується природний газ.

В значній кількості природний газ імпортується з-за кордону і від є дуже коштовним. В зв'язку з цим стає необхідною задача економії цього природного ресурсу за рахунок підвищення ефективності обладнання, що його використовує. В той же час в своїй більшості існуюче паливовикористовуюче обладнання, а саме, пальникові пристрої, які використовуються в енергетиці і промисловості, вичерпали свій потенціальний ресурс і не мають резерву для удосконалення.

Аналіз стану забезпечення народного господарства паливними ресурсами показує, що існує достатньо широкий спектр так званих альтернативних, тобто на відміну від природного газу, нетрадиційних палив, до яких можна віднести гази природного або штучного походження, наприклад, доменні гази, колошникові гази, шахтний метан, гази хімічного походження тощо. За своєю сумарною енергетичною ефективністю ці гази не на багато поступаються традиційному природному газу.

Як правило, ці гази відносяться до середньо та мало калорійних. В залежності від свого походження вони мають різний склад. Крім того, склад цих газів може значно змінюватися в часі. Для свого ефективного спалювання ці гази потребують спеціальних методів спалювання, які відрізняються від традиційного підходу.

В той же час вимоги що ефективного використання різних газів не змінюються. Пальникові пристрої повинні забезпечити стале горіння і

високу повноту згоряння у вьому діапазоні робочих режимів, забезпечувати достатньо рівномірне або регульоване поле температур продуктів згоряння, мати допустимий рівень втрат тиску повітря і газу тощо.

Одним з можливих рішень цієї проблеми може бути використання стабілізаторних пальникових пристроїв з різними схемами сумішоутворення газового палива і повітря, які показали свою високу ефективність при спалюванні висококалорійного палива. Такі пальникові пристрої розробляються на кафедрі теплової та альтернативної енергетики НТУУ «КПІ».

Зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами. Робота виконувалась у пріоритетному напрямку досліджень кафедри ТАЕ “Енергетика та енергоефективність” за темою 4.01 "Розробка методів та засобів підвищення ефективності обладнання теплових електростанцій та газотурбінних установок " (Д/р №0116U005215).

Мета і задачі дослідження.

Мета дослідження – розроблення конструкції стабілізаторного пальникового пристрою з комбінованим сумішеутворюванням газового палива різного складу і повітря для спалювання нетрадиційних газових палив штучного або природного походження.

Поставлена мета досягається вирішенням наступних задач:

- аналіз теплотехнічних та фізико-хімічних характеристик забаластованих нетрадиційних газів різного складу;
- аналіз впливу складу нетрадиційних газів на характеристики сталості горіння, розвитку і довжину факелу, температуру горіння.
- визначення особливостей спалювання газів нетрадиційного складу в стабілізаторах при різних схемах сумішоутворення газу і повітря.

Об'єкт дослідження – процеси горіння газових палив нетрадиційного складу в пальникових пристроях стабілізаторного типу.

Предмет дослідження - визначення впливу конструктивних і режимних факторів на процеси горіння нетрадиційних газових палив в стабілізаторних пальникових пристроях.

Методи дослідження – Ізотермічні та вогневі випробування моделей пальникових пристроїв при спалюванні нетрадиційних газових палив. Теоретичні дослідження на базі використання методів математичного та комп'ютерного моделювання.

Експериментальні дослідження проводились на стендах кафедри ТАЕ з урахуванням існуючих методик, нормативних матеріалів з використанням відповідних приладів та стендового обладнання.

Наукова новизна одержаних результатів.

- вперше запропонована технологія спалювання забаластованих низько реакційних газових палив в двонішевих стабілізаторних пальниках;
- вперше розроблено і досліджено моделі двонішевих стабілізаторних пальників для спалювання альтернативних низько реакційних газових палив;
- отримані нові експериментальні дані та одержані узагальнюючі залежності стосовно характеристик робочого процесу горіння нетрадиційних газів різного складу, який може суттєво змінюватись під час роботи, а також виходити за концентраційні межі горіння.

Практичне значення одержаних результатів. Результати і висновки магістерської роботи можуть бути використані при розробці пальникових пристроїв стабілізаторного типу з різними схемами сумішоутворення газу і повітря і які призначені для спалювання низько реакційних нетрадиційних газових палив .

Публікації.

Матеріали магістерської роботи та її основні положення представлені в статті

1. О.Ю. Черноусенко, Л.С. Бутовський, М.А. Рудик, В.С. Доросевич. Стендові випробування натурної двозонної високотемпературної камери згоряння» // *Вчені записки Таврійського національного університету імені В.І. Вернадського. Серія «Технічні науки»*, Том 35 (74), № 2, 2024. С.47-54.

Ключові слова: нетрадиційні газові палива, склад паливної суміші, двонішевий стабілізаторний пальник, комбіноване сумішоутворення, низькорекційний.

SUMMARY

Master's Thesis for obtaining the master's degree under the educational and scientific training program on the topic: "Development of means to increase the efficiency of stabilizer burners when burning non-traditional gases": 89 pages, 43 figures, 1 table, 39 bibliographic references.

Actuality of the theme

Natural gas is used as fuel in many energy, industrial and communal facilities - boilers, furnaces, heaters of various materials, dryers, etc.

A significant amount of natural gas is imported from abroad and is very valuable. In this regard, the task of saving this natural resource by increasing the efficiency of the equipment that uses it becomes necessary. At the same time, most of the existing fuel-using equipment, namely, burner devices used in energy and industry, have exhausted their potential resource and have no reserve for improvement.

Analysis of the state of providing the national economy with fuel resources shows that there is a fairly wide range of so-called alternative, that is, in contrast to natural gas, non-traditional fuels, which include gases of natural or artificial origin, for example, blast furnace gases, furnace gases, mine methane, gases of chemical origin, etc. In terms of their overall energy efficiency, these gases are not much inferior to traditional natural gas.

As a rule, these gases are medium and low calorie. Depending on their origin, they have different composition. In addition, the composition of these gases can change significantly during the time of the operation. For their efficient combustion, these gases require special combustion methods that differ from the traditional approach.

At the same time, the requirements for effective use of various gases do not change. Burner devices must ensure stable combustion and high completeness of combustion in the range of operating modes, provide a

sufficiently uniform or adjustable temperature field of combustion products, have an acceptable level of air and gas pressure losses, etc.

One of the possible solutions to this problem can be the use of stabilizer burner devices with different gas fuel and air mixing schemes, which have shown their high efficiency when burning high-calorie fuel. Such burner devices are being developed at the Department of Thermal and Alternative Energy of NTUU "KPI".

Connection of work with scientific programs, plans, topics. The work was carried out in the priority direction of research of the TAE department "Energy and energy efficiency" under topic 4.01 "Development of methods and means of increasing the efficiency of equipment of thermal power plants and gas turbine installations" (D/r No. 0116U005215).

The purpose and objectives of the research. The purpose of the research is to develop a design of a stabilizer burner device with a combined mixture formation of gas fuel of different composition and air for burning non-traditional gas fuels of artificial or natural origin.

Research tasks:

- analysis of thermotechnical and physicochemical characteristics of ballasted unconventional gases of various composition;
- analysis of the influence of the composition of non-traditional gases on the characteristics of combustion stability, flame development and length, and combustion temperature;
- determination of features of combustion of gases of non-traditional composition in stabilizers with different schemes of mixture formation of gas and air.

The object of research. Combustion processes of gas fuels of unconventional composition in burner devices of the stabilizer type.

The subject of research. Determination of the influence of design and mode factors on the combustion processes of non-traditional gas fuels in stabilizer burner devices.

Methods of researches. Isothermal and fire tests of models of burner devices when burning non-traditional gas fuels. Theoretical studies based on the use of mathematical and computer modeling methods.

Scientific novelty of the results.

- The information on the physical and chemical qualities of non-traditional gas fuels is expanded;
- the information on the influence of the composition of non-traditional gases on the burning process of the torch is received;
- the new experimental data were obtained when burning non-traditional gas fuels in model stabilizer microflare burners.

Practical significance of the results. The results and conclusions of the master's thesis can be used in the development of burner devices of the stabilizer type with different mixtures of gas and air.

Publications

2. О.Ю. Черноусенко, Л.С. Бутовський, М.А. Рудик, В.С. Доросевич. Стендові випробування натурної двозонної високотемпературної квари згоряння» // *Вчені записки Таврійського національного університету імені В.І. Вернадського. Серія «Технічні науки»*, Том 35 (74), № 2, 2024. С.47-54.

Key words: non-traditional gas fuels, fuel composition, stabilizer burner, combined mixture formation.

ЗМІСТ

ПЕРЕЛІК УМОВНИХ ПОЗНАЧЕНЬ, СИМВОЛІВ, СКОРОЧЕНЬ, ТЕРМІНІВ	11
ВСТУП	12
1 НЕТРАДИЦІЙНІ ГАЗОВІ ПАЛИВА ТА ПАЛЬНИКИ ДЛЯ ЇХ СПАЛЮВАННЯ.....	14
1.1 Особливості використання нетрадиційних джерел енергії	14
1.2 Вплив баласту на теплотехнічні та фізико-хімічні характеристики метановмісних газів	17
1.3 Пальникові пристрої для спалювання забаластованих газових палив	26
1.4 Висновки до розділу 1	34
2 ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНЕ ОБЛАДНАННЯ, ВИМІРЮВАЛЬНА АПАРАТУРА І МЕТОДИКА ОБРОБКИ ДОСЛІДНИХ ДАНИХ	36
2.1 Характеристика експериментального обладнання	36
2.2 Методика проведення випробувань, обробка дослідних даних.....	40
2.3 Висновки до розділу 2	43
3 ХАРАКТЕРИСТИКИ РОБОЧОГО ПРОЦЕСУ МОДУЛЬНОГО ДВОНІШЕВОГО СТАБІЛІЗАТОРНОГО ПАЛЬНИКОВОГО ПРИСТРОЮ 444	
3.1 Конструкція модульних двонішевих пальників.....	444
3.2 Експериментальні дослідження характеристик двонішевого комбінованого пальника при подачі газу в нішеві поглиблення	477
3.3 Експериментальні дослідження характеристик двонішевого комбінованого пальника при подачі газу із зривних кромek стабілізатора перед нішевими поглибленнями.....	622
3.4 Висновки до розділу 3	778
ВИСНОВКИ.....	800
СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ	833
ДОДАТОК А Список наукових праць	88
ДОДАТОК Б Превірка магістерської дисертації на академічну доброчесність.....	889

ПЕРЕЛІК УМОВНИХ ПОЗНАЧЕНЬ, СИМВОЛІВ, СКОРОЧЕНЬ, ТЕРМІНІВ

Умовні позначення

L_0 – стехіометричний коефіцієнт,

Q_{np} – теплота згорання (нижча),

ρ – густина,

G – масова витрата,

V – об'ємна витрата,

B – ширина,

d – діаметр,

l – довжина,

α – коефіцієнт надлишку повітря,

C_p – теплоємність,

T – температура,

W – швидкість,

G_{np} – відносний вміст домішки,

Re – число Рейнольдса.

Індекси

п – повітря,

стех – стехіометричний,

г – газ,

п – паливо,

пр – домішка,

ф – факел,

мах – максимум,

ном – номінальний,

Скорочення

ВДЕ – відновлювані джерела енергії;

ПМ – пальниковий модуль;

ПП – пальниковий пристрій;

ГТУ – газотурбінна установка.

ВСТУП

В свій час завдяки своїм позитивним перевагам над іншими видами палив – легкість видобування і транспортування, відсутність твердих та рідких відходів, відсутність шкідливих домішок, природний газ зайняв лідируючі позиції в світовій енергетиці, промисловості, комунальному господарстві, хімічній та металургійній промисловості, в побуті тощо. Країни, які видобувають газ в значній мірі впливають на світову економіку і світовий порядок. Газова складова має суттєве значення у відносинах між країнами.

У всіх економічно розвинених країнах складова природного газу в енергетичному балансі має суттєве значення. Наявність або відсутність такого викопного палива, як природний газ в значній мірі впливає на рівень розвитку народного господарства і добробут населення.

На відміну від інших країн для України природний газ має більше значення у порівнянні з Європейськими країнами, США і світом в цілому. Тому задача ощадливого ефективного використання імпортного коштовного палива має першочергове значення.

В той же час в Україні існують значні резерви первинних і вторинних енергоносіїв, запас яких може бути порівненим з запасами природного газу в країні. Сюди відноситься, наприклад, шахтний метан та вентиляційні шахтні викиди. Можуть бути також використані різні види промислових паливних газів, таких як генераторний, коксовий, а також біопалива у вигляді горючих газів (суміш метану, двоокис вуглецю та інших газів).

Використання таких нетрадиційних газових палив дасть можливість не тільки зменшити витрату дефіцитних в Україні водне-вуглецевих палив, а й доволить вирішити проблему охорони довкілля шляхом введення в паливний баланс використання відходів промислового, а також сільськогосподарського виробництва.

Щодо технічного використання нетрадиційних або альтернативних газів, то слід мати на увазі, що ці гази, як паливо, мають такі особливості як наявність в їхньому складі поліантів різного складу, наприклад, повітря, двоокис і окис вуглецю, азот, складні хімічні речовини, концентрація яких може змінюватись в процесі роботи установки. Як правило, наявність таких поліантів впливає на тепломеханічні та фізико-хімічні характеристики палива, стехіометричний коефіцієнт, концентраційні межі горіння газу, швидкість розповсюдження полум'я, стабільність газового факелу, температуру горіння.

При розробці пальникових пристроїв для спалювання альтернативних нетрадиційних палив слід брати до уваги необхідність взаємозамінності газових палив, тому що зміна складу газу не повинна впливати на показники роботи пальникового пристрою, якість технічного обслуговування пальників, їх регулювання та термін експлуатації.

Крім того, треба також брати до уваги, що використання нетрадиційних газів не повинно впливати на такі основні характеристики пальникових пристроїв, як повнота згорання, вихід токсичних оксидів азоту і вуглецю, діапазон сталої роботи, температуру елементів обладнання, втрати тиску тощо.

Тому питання спалювання нетрадиційних газових палив та розробка засобів для їх ефективного використання має актуальний характер на сьогодні і повинна бути одною зі складових політики раціонального та ощадливого використання відновлювальних джерел енергії в Україні.

1 НЕТРАДИЦІЙНІ ГАЗОВІ ПАЛИВА ТА ПАЛЬНИКИ ДЛЯ ЇХ СПАЛЮВАННЯ

1.1 Особливості використання нетрадиційних джерел енергії

Проблема охорони оточуючого середовища нерозривно з'єднана з проблемою використання природних ресурсів і перш за все – енергетичних ресурсів. Відомо, що без вирішення проблеми енергозабезпечення неможливо вирішити екологічних та багато інших проблем, які постають перед суспільством. Загальноприйнятим є принцип, за яким проблема оточуючого середовища повинна бути об'єктом як національних зусиль, так і міжнародного співробітництва.

Існує багато виробництв, на яких основний технологічний процес супроводжується утворенням значної кількості залишкових речовин, зокрема, горючих газів. До таких підприємств відноситься хімічні, нафтопереробні, металургійні та інші заводи. Ці підприємства розміщуються, як правило, у великих індустріальних центрах і є джерелом забруднень повітряного басейну регіону. Тому постає задача розробки відповідних заходів, в результаті яких не тільки зменшується кількість шкідливих викидів цих підприємств, а додатково промислові відходи використовуються в якості палива.

Рациональне вирішення конкретних проблем використання газових викидів замість традиційних газових палив пов'язане з необхідністю вирішення низки питань. До них відносяться, наприклад, паливні характеристики забаластованих газів, специфіка їх запалювання і горіння, а також закономірності стабілізації полум'я в потоці газоповітряних сумішей. Крім того, важливо правильно оцінювати характеристики пальників різного

типу і розробити методи регулювання топкових процесів, спираючись на теплообмінні властивості факелу.

До пальникових пристроїв, які працюють на газоподібному паливі, висувається низка вимог: пальники повинні забезпечувати повне та надійне спалювання палива при розрахунковому коефіцієнті надлишку повітря, забезпечувати мінімальне утворення токсичних речовин в продуктах згоряння, а також бути компактними та зручними в експлуатації і мати довгий строк служби при невеликій вартості.

Крім того, до пальникових пристроїв висувається вимога організації такого методу спалювання, при якому геометричні та теплообмінні характеристики факелу найкращим чином відповідають відносному розміщенню екранних поверхонь нагріву або розмірам і конфігурації топки.

Зокрема, при розробці методів спалювання палива в котлах малої і середньої потужності часто необхідно виконувати вимоги щодо зменшення довжини факелу для запобігання перегріву екранних трубок і сажоутворення.

З точки зору зменшення довжини факелу частіше всього використовують такі способи: 1) збільшення кута зустрічі газових струменів і повітряного потоку; 2) збільшення периметру запалювання в зоні ядра факелу; 3) підігрів повітря; 4) збільшення довжини зони попереднього сумішоутворення газу і повітря; 5) зменшення одиничної потужності пальників і збільшення їх кількості; 6) інтенсифікація процесів турбулентного перемішування і теплообміну в топковій камері; 7) комбінація різних способів.

Таким чином, необхідно знаходити оптимальні конструктивні і режимні параметри пальникових пристроїв, які забезпечують найбільшу економічність і достатню надійність роботи обладнання.

Закономірності горіння високо реакційних газових палив (зокрема, метан, пропан-бутан тощо) і пальники на їх основі достатньо широко висвітлені в технічній літературі [1].

При спалюванні нетрадиційних газів, які вміщують баласт (азот, повітря, діоксид вуглецю тощо) виникають важливі проблеми, які пов'язані з забезпеченням сталого горіння газів, отриманням необхідної довжини факелу і повноти згорання, а також утворенням токсичних оксидів азоту. В процесі експлуатації пальникових пристроїв часто виникає задача, вирішення якої в значній мірі впливає на можливість використання данного методу спалювання і конкретного пальникового пристрою. Це проблема роботи при зміні складу пальникового газу в залежності від джерела походження, а також зміна складу палива в процесі експлуатації пальника.

Умовою взаємозамінності палив по тепловій потужності є досягнення однакової теплопродуктивності пальникової системи при переході з одного виду палива на інше і однакової масовій витраті повітря ($m_{\text{пов}} = \rho_{\text{пов}} \cdot W_{\text{пов}} \cdot F_{\text{пов}}$, де $\rho_{\text{пов}}$ та $W_{\text{пов}}$ – густина та швидкість повітря у повітряних каналах (отворах), а $F_{\text{пов}}$ – прохідний переріз повітряних каналів (отворів). При струминній подачі палива в зону горіння досягнення такої умови визначається з балансного співвідношення

$$Q_H / \sqrt{\rho_{\Gamma} / \rho_{OK}} \cdot z \cdot d_{\Gamma}^2 \sqrt{\Delta p_{\Gamma}} = \text{const}, \quad (1.1)$$

де Q_H – нижча теплота згорання палива,

z – кількість газових отворів у пальнику;

Δp_{Γ} – тиск (надлишковий) подачі паливного газу.

Останнє рівняння можна також представити у вигляді

$$W_O \cdot z \cdot d_{\Gamma}^2 \sqrt{\Delta p_{\Gamma}} = \text{const}, \quad (1.2)$$

де $W_O = Q_H / (\rho_{\Gamma} / \rho_{OK})^{0,5}$ – число Воббе, яке має стале значення для фіксованого палива при $\rho_{OK} = \text{const}$.

Для газів з різними числами Воббе можна отримати наступні співвідношення, що визначають умову адекватності теплової потужності:

а) при $z = \text{const}$ та $d_{\Gamma} = \text{const}$

$$\Delta p_{\Gamma} \sim W_O^2 \quad (1.3)$$

б) при $z = \text{const}$ та $\Delta p_r = \text{const}$

$$d_r \sim Wo^{1/2} \quad (1.4)$$

в) при $\Delta p_r = \text{const}$ та $d_r = \text{const}$

$$z \sim Wo \quad (1.5)$$

Як видно, умова взаємозамінності (а) виконується за рахунок зміни тиску подачі палива-замінника пропорційно квадрату числа Воббе;

Умова взаємозамінності (б) виконується за рахунок зміни діаметру газових отворів пропорційно квадратному кореню числа Воббе палива-замінника;

Умова взаємозамінності (в) виконується за рахунок зміни числа отворів пропорційно числу Воббе палива-замінника.

1.2 Вплив баласту на теплотехнічні та фізико-хімічні характеристики метановмісних газів

Проблему спалювання сумішей забаластованих газів з повітрям можна вирішити тільки на підставі комплексного аналізу таких факторів: фізико-хімічних (властивості горючих і баластних компонентів газу), режимних (початкова температура газу і повітря, діапазон зміни надлишку повітря і швидкості течії) і конструктивних факторів (стабілізуюча спроможність пальника) [1]. Таким чином, для визначення того, чи буде горіти суміш забаластованого пального і повітря, необхідно знати діапазон сталого горіння даної суміші в конкретному пальнику. Іноді для цієї мети використовують дослідні дані щодо межі (верхньої і нижньої) запалювання горючих складових (CH_4 , H_2 , CO та інших горючих компонентів) у суміші з N_2 і CO_2 .

Якщо вважати розглянуті баластні домішки інертними, то їх вплив зводиться, в основному, до зменшення частки CH_4 , що виділяє тепло, і збільшенні баластної маси газів. Безпосереднім результатом цього є таке:

- зниження калорійності (теплоти згоряння) метановміщуючого газу (Q_n^p);
- зменшення теоретично необхідної кількості повітря для згоряння паливного газу (тобто його стехіометричного коефіцієнту - L_0' кг/кг; V_0' м³/м³)

При розрахунках часто використовують відносні величини забаластованості CH_4 азотом (N_2), вуглекислотою (CO_2) і повітрям у вигляді залежності від відносного змісту баластової домішки:

$$\overline{G_{np}} = \frac{G_{np}}{G_{CH_4}}; \overline{g_{np}} = \frac{G_{np}}{G_T} = \frac{G_{np}}{G_{CH_4} + G_{np}} \quad (1.6)$$

Теплота згоряння забаластованого газу розраховується по формулі

$$(Q_n^p)' = \frac{(Q_n^p)_{CH_4}}{1 + \overline{G_{np}}} \quad \text{або} \quad (Q_n^p)_{CH_4} (1 - \overline{g_{np}}) \quad (1.7)$$

де $(Q_n^p)_{CH_4}$ - нижча теплота згоряння метану. (8550 ккал/м³ = 49800 кДж/кг).

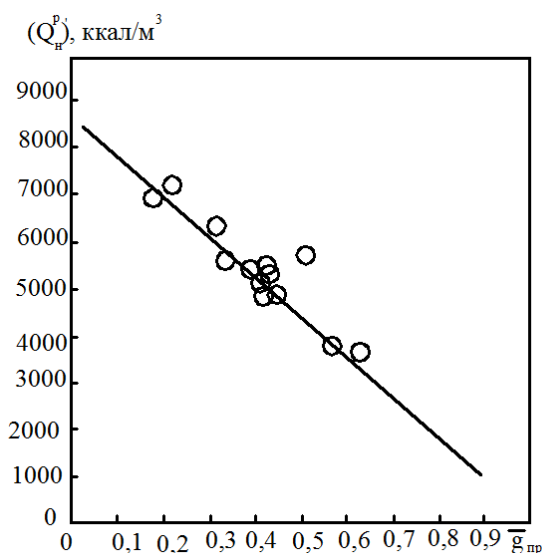
Розрахункові дані для метану наведено в табл. 1.1.

Таблиця 1.1 – Вплив баластових домішок на фізико-хімічні характеристики метановмісного газу (розрахункові значення)

Відносний вміст баласту		$(Q_n^p)'$		L_0' кг/кг		V_0' м ³ /м ³	
$\overline{g_{np}}$	$\overline{G_{np}}$	кДж/кг	ккал/м ³	CH_4 +повітря	CH_4 + CO_2 CH_4 + N_2	CH_4 + повітря	CH_4 + CO_2 CH_4 + N_2
1	2	3	4	5	6	7	8
0	0	49800	8550	16,80	16,80	9,60	9,60
0,10	0,11	44820	7695	15,00	15,10	8,54	8,64
0,30	0,42	34866	5985	11,50	11,80	6,42	6,42
0,50	1,00	24900	4275	7,90	8,40	4,30	4,80
0,70	2,33	14940	2565	4,30	5,00	2,18	2,88
0,90	900	4980	855	0,78	1,68	0,06	0,96

На рис. 1.1 показано вплив величини відносної баластної домішки на теплоту згоряння газу, який вміщує метан.

Як видно, розрахункові значення теплоти згоряння забаластованих метановмістних газів досить добре збігаються з відомими їх значеннями в реальних газах і тому можуть використовуватися при розрахунках і аналізі інших характеристик, пов'язаних з теплотою згоряння.



----- розрахункове значення

Рисунок 1.1 – Вплив вмісту баластної домішки на теплоту згоряння метановмістного газу

Відносний вплив баласту на стехіометричний коефіцієнт (у масовому й об'ємному вираженні) наведений в табл. 1.1 (стовп. 5-8).

При збільшенні вмісту баластної домішки, величина стехіометричного коефіцієнту падає у зв'язку з тим, що зменшується доля метану у паливному газі.

$$G_{CH_4} = G_{пал} - G_{пр} \quad (1,8)$$

$$\text{або} \quad \overline{G_{CH_4}} = 1 - \overline{g_{пр}} \quad (1,9)$$

При баластуванні метану азотом і вуглекислотою:

$$\left(L'_0 \right)_{\frac{CH_4+CO_2}{CH_4+N_2}} = \frac{(L_0)_{CH_4}}{1 + G_{пр}} \quad \text{або} \quad (1,10)$$

$$\left(L'_0\right)_{\frac{\text{CH}_4+\text{CO}_2}{\text{CH}_4+\text{N}_2}} = \left(L_0\right)_{\text{CH}_4} \cdot \left(1 - \overline{g_{\text{пр}}}\right) \quad (1.11)$$

де $\left(L_0\right)_{\text{CH}_4}$ – стехіометричний коефіцієнт для чистого метану, який дорівнює 16,8 кг/кг.

Таким чином, для сумішей $(\text{CH}_4 + \text{N}_2)$ і $(\text{CH}_4 + \text{CO}_2)$ стехіометричний коефіцієнт L'_0 у масовому значенні, має однакову величину. Стосовно паливної суміші $(\text{CH}_4 + \text{повітря})$, то в цьому випадку L'_0 має менші значення, ніж у випадку баластування азотом і вуглекислотою, оскільки кисень «баластного» повітря також бере участь у горінні метану. В результаті маємо:

$$\left(L'_0\right)_{\text{CH}_4+\text{пов}} = \frac{\left(L_0\right)_{\text{CH}_4}}{1 + G_{\text{пр}}} - \overline{g_{\text{пр}}}, \text{ (кг/кг)} \quad (1.12)$$

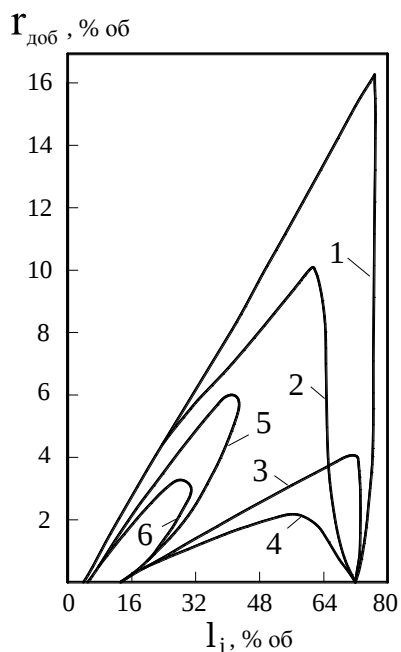
В об'ємному вираженні стехіометричні коефіцієнти $(V'_0, \text{ м}^3/\text{м}^3)$ розглянутих паливних сумішей дещо різняться у зв'язку з різною щільністю газів, що баластують основне паливо.

Границі запалювання суміші газів суттєво залежать від вмісту баластних газів у горючій суміші (рис. 1.2 та 1.3). Границі запалювання горючих сумішей, які містять баластні гази, можна визначити у такій послідовності:

- горючі компоненти згруповують з інертними попарно і з використанням даних, що приведені на рис. 1.2 та 1.3, визначають границі запалювання для кожної пари;
- отримані таким чином границі запалювання вводяться у рівняння (1.1) і визначаються відповідні границі запалювання для складного газу.

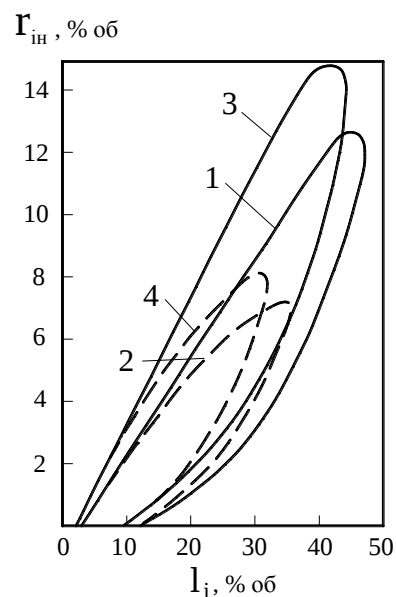
Такий спосіб дозволяє з достатньо високою точністю визначити розрахункові значення границь запалювання.

Границі запалювання у значній мірі залежать від температури горючої суміші $(t_{\text{г.с}}, ^\circ \text{C})$, з підвищенням якої вони суттєво розширюються (рис. 1.4) при одночасному збільшенні величини надлишку повітря бідної горючої суміші (рис. 1.5) [1].



1 - $\text{H}_2 + \text{N}_2$; 2 - $\text{H}_2 + \text{CO}_2$; 3 - $\text{CO} + \text{N}_2$;
4 - $\text{CO} + \text{CO}_2$; 5 - $\text{CH}_4 + \text{N}_2$; 6 - $\text{CH}_4 + \text{CO}_2$

Рисунок 1.2 - Залежність границь запалювання CH_4 , H_2 і CO від добавки баластних газів (N_2 і CO_2) до горючого газу



1 - $\text{C}_2\text{H}_6 + \text{N}_2$; 2 - $\text{C}_2\text{H}_6 + \text{CO}_2$;
3 - $\text{C}_3\text{H}_8 + \text{N}_2$; 4 - $\text{C}_3\text{H}_8 + \text{CO}_2$

Рисунок 1.3 - Залежність границь запалювання C_2H_6 і C_3H_8 від добавки баластних газів (N_2 і CO_2) до горючого газу

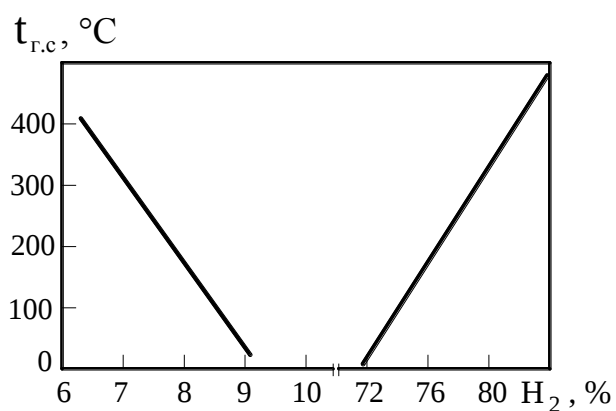
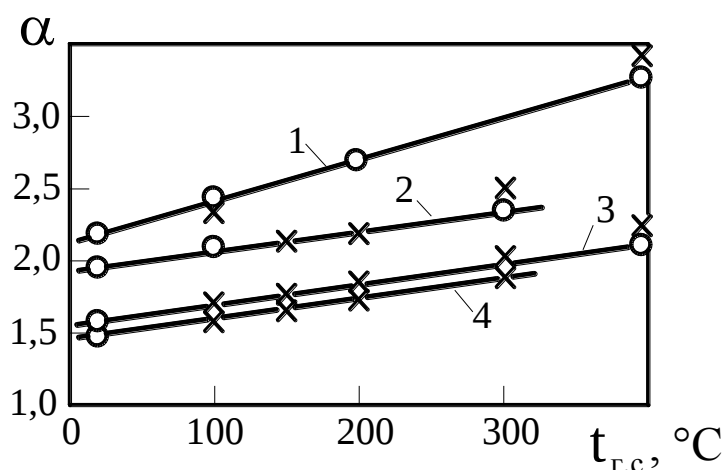


Рисунок 1.4 – Залежність границь запалювання воднево-повітряної суміші від її початкової температури



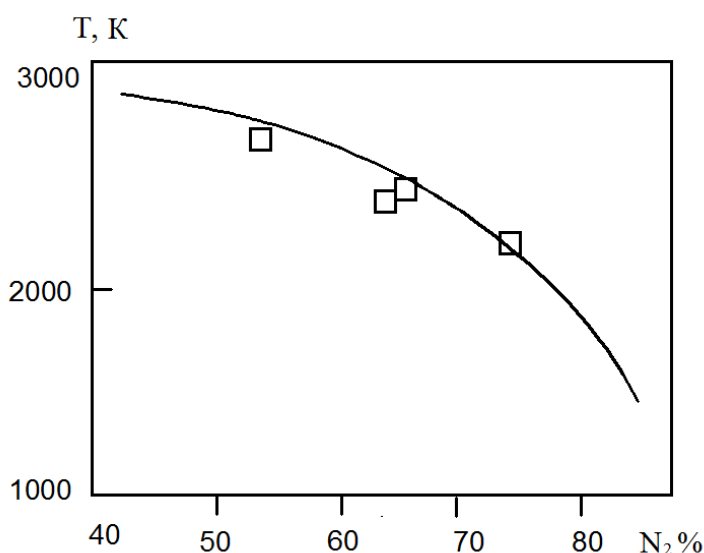
1 – оксид вуглецю (CO); 2 – етилен (C_2H_4); 3 – метан (CH_4); 4 – пентан (C_5H_{12})

(о – експериментальні данні; х – розрахунок)

Рисунок 1.5 – Залежність граничного значення коефіцієнту надлишку повітря (для бідної горючої суміші) від її температури

1.2.1 Вплив баласту на температуру горіння метановмісного газу

На рис. 1.6 наведено дані щодо впливу наявності азоту N_2 на розрахункові і експериментальні значення температури горіння стехіометричної метано-кисневої суміші [2]. Як видно, вона суттєво зменшується при підвищенні вмісту баласту.



----- розрахункове значення; $\square$ - експериментальне значення

Рисунок 1.6 – Вплив домішки N_2 на температуру полум'я стехіометричної метано-кисневої суміші

Температура горіння палива залежить також від теплоємності баласту (маси, яка поглинає тепло). Тому найбільше зниження температури горіння відбувається при розбавленні паливної суміші вуглекислотою (CO_2), яка має найбільшу теплоємність.

При баластуванні вуглекислотою температура додатково знижується через дисоціацію CO_2 .

1.2.2 Вплив баласту на швидкість розповсюдження полум'я

При зменшенні температури хімічної реакції, відбувається зниження швидкості розповсюдження полум'я. Тому у експериментах з добавкою до горючого газу баластних домішок відбувається зниження швидкості поширення полум'я U_H .

На рис. 1.7 [3], це видно з прикладу впливу CO_2 на максимальну швидкість ламінарного розповсюдження полум'я метан-повітряних та пропан-повітряних сумішей. При подачі CO_2 зменшується U_H , при чому, особливо помітно – у метану.

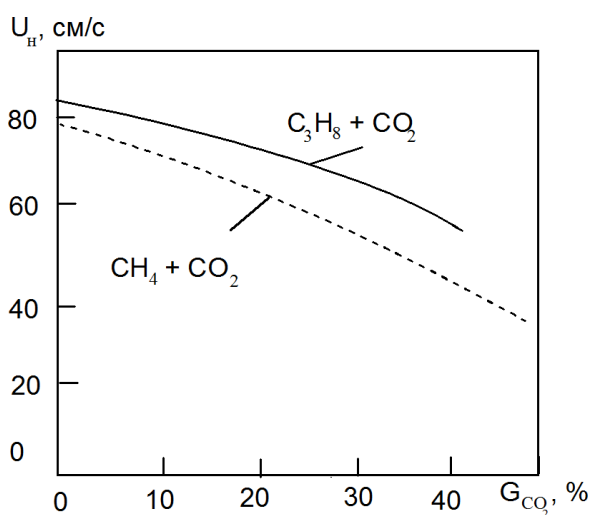


Рисунок 1.7 – Вплив домішки CO_2 на $U_{H_{\max}}$ паливо-повітряних сумішей CH_4 та C_3H_8

1.2.3 Вплив баласту на сталість процесу горіння.

Внаслідок зменшення температури і швидкості розповсюдження полум'я додавання баласту призводить до зниження стійкості процесу горіння полум'я як при дифузійному режимі, так у при спалюванні попередньо перемішаних газоповітряних сумішей.

При дифузійному режимі оцінкою сталості горіння є швидкість при зриві полум'я ($W_{зр}$), при кінетичному горінні сталість горіння визначається швидкістю зриву і концентраційними межами розповсюдження полум'я.

На рис. 1.8 показано вплив інертного баласту на межі сталого горіння у тунельному пальнику при швидкості суміші $W = 60$ м/с паливно-повітряної суміші міського газу із складом (в об.%): $CH_4 - 80 - 85$; $H_2 - 9 - 13$ [4]. Криві 2 – 5 відповідають межам сталого горіння при значеннях ступеня розбавлення m , які дорівнюють відповідно 2 – 5 об'ємам інертного газу на об'єм міського. Крива 1 характеризує межу сталого горіння міського газу без розбавлення ($m = 0$).

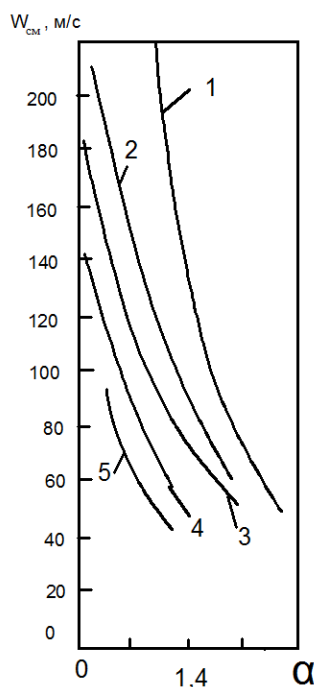


Рисунок 1.8 – Вплив інертної баластної домішки на стійкість горіння газоповітряної суміші міського газу в тунельному пальнику

Як видно, при фіксованій швидкості суміші ($W=60$ м/с) п'ятикратне розбавлення паливного газу баластом зменшує $\alpha_{\max}$ з 1,7 до 1,2 або, а при фіксованому коефіцієнті надлишку повітря ($\alpha = 1,2$), знижує допустиму швидкість потоку з 230 до 60 м/с.

При чисто дифузійному горінні в [5] вплив баластної домішки на швидкість зриву полум'я виражена формулою

$$\frac{(u_{\text{зр}})_{\text{пр}}}{u_{\text{зр}}} = \left[\frac{(u_{\text{н}})_{\text{пр}}}{u_{\text{н}}} \right]^2 \cdot \left(\frac{L_0'}{L_0} \right)^2 \cdot \left(\frac{\rho_{\text{пал+пр}}}{\rho_{\text{пал}}} \right), \quad (1.13)$$

де в знаменнику приведені значення для чистого паливного газу, а в чисельнику – забаластованого.

На рис. 1.9 приведені дані по зриву факелу метану при додаванні до нього CO_2 і повітря. Видно, що обидва баласта зменшують величину $W_{\text{ср}}$, причому вплив CO_2 є більш сильним [6].

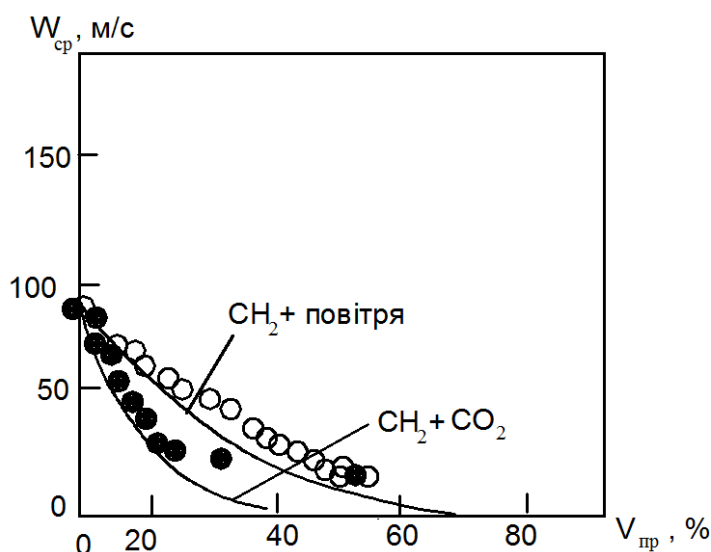


Рисунок 1.9 – Вплив домішок до CH_4 на швидкість зриву полум'я

У роботі [7] досліджувався вплив додавання N_2 і CO_2 до метану на стабільність дифузійного факелу при спалюванні бідних горючих сумішей. Як видно з рис. 1.10, при збільшенні долі баласту (азот і вуглекислота) коефіцієнт надлишку повітря ($\varphi = 1/\alpha$) зменшується.

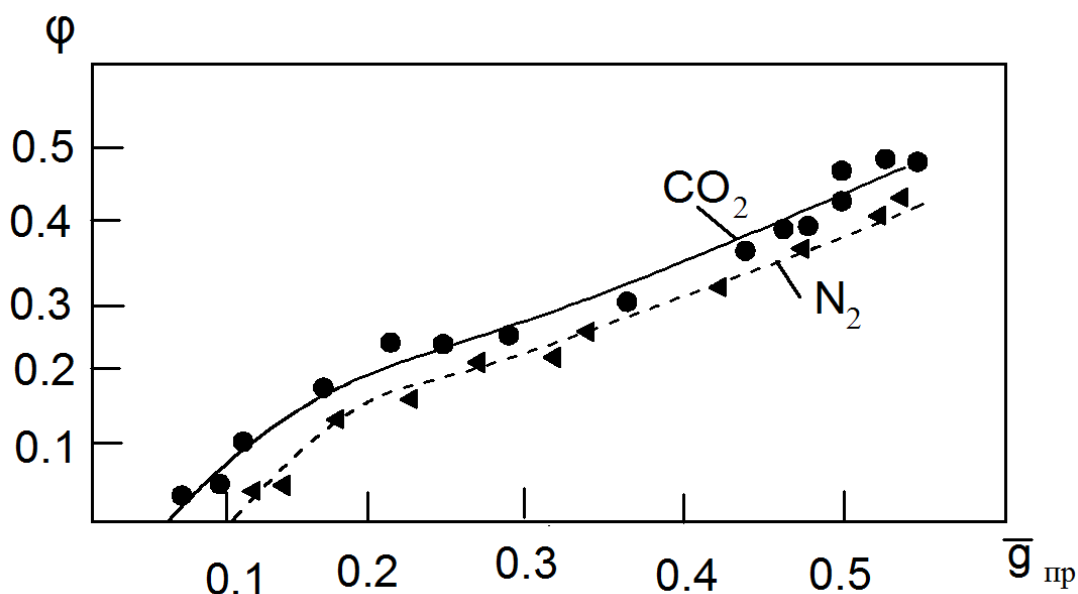


Рисунок 1.10 – Вплив концентрації баласту чергового (дифузійного) факелу на коефіцієнт $\phi = 1/\alpha$, що відповідає сталому горінню

Слід зауважити, що, зазвичай, наведені в літературі дані отримані для холодних сумішей. У разі підвищення початкової температури суміші межі запалювання розширюються. Так, наприклад, підігрів суміші водень-повітря до 400°C веде до зниження нижньої межі запалювання приблизно до 6 % і підвищенню верхньої меж до 84 %.

При аналізі наведених в літературі даних треба брати до уваги, що в багатьох випадках результати отримані в статичних умовах. Внаслідок цього вони не завжди можуть бути використані для характеристики процесу горіння в динаміці. Наприклад, один і той же забаластований газ може бути використаний в пальниковому пристрої, де задовільні умови стабілізації, а в другому пальнику горіння неможливе.

1.3 Пальникові пристрої для спалювання забаластованих газових палив

В енергетиці Існують пальникові пристрої для спалювання низько та середньо реакційних палив – доменного газу, газу сажового виробництва,

генераторного газу, підземної газифікації вугілля - конструкції Таганрогського котельного заводу, а також ЕНІН-МВЦКТІ.

В цих пальниках можливе спалювання забаластованих газів з певним вмістом поліантів [1].

Загалом, при спалюванні забаластованих палив здебільшого використовують такі ж конструкції пальників, що розроблені для спалювання високо реакційних палив. Але при цьому відмічається звуження діапазону сталого горіння, прорив або зрив горіння і поява значного недопалу [8-10]. При збільшенні концентрації поліантів понад певну величину стабілізація горіння стає неможливою .

З метою суттєвого зменшення залежності від імпорту природного газу останнім часом у світовій енергетиці і в Україні все більшу роль відіграють відновлювальні джерела енергії, зокрема, біогаз [11, 12].

Біогаз – це продукт анаеробного розкладу мікроорганізмами органічних речовин. Виробництво біогазу є одним з варіантів енергетичного використання біомаси, тобто органічних речовин рослинного та тваринного походження.

Джерелом біогазу є стічні води на міських очисних спорудах, відходи підприємств харчової промисловості, зокрема, м'ясокомбінати, спиртові заводи та інші виробництва, первинні відходи сільського господарства (солома, відходи виробництва кукурудзи на зерно, соняшник), енергетичні культури, солома ріпаку, деревна тощо.

За деякими даними кількість біомаси, яка щорічно утворюється на планеті, в декілька разів більше, ніж сумарний видобуток копалин. Таким чином, виробництво біогазу з біомаси може в перспективі дати значний додатковий ресурс палива.

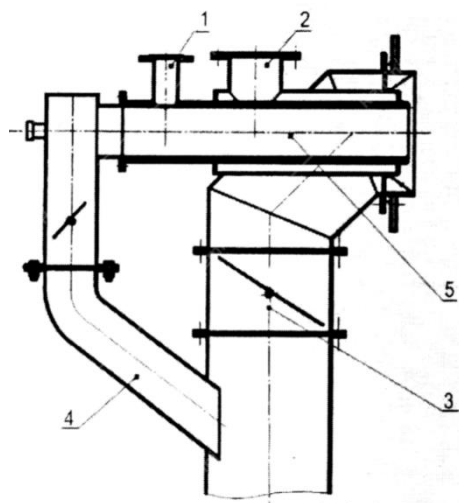
В [4, 13] розглянуто властивості біомаси як енергетичного палива. Біогазові палива в основному містять у своєму складі метан з додатком таких інертних газів як вуглекислота, азот, повітря, оксид вуглецю тощо. Наявність інертних поліантних домішок призводить до зменшення частки

метану і збільшення баластної маси газів, що поглинає тепло. Це призводить до зменшення температури горіння, звуження меж запалювання і погіршення сталості горіння [14].

Вважається, що для забезпечення стійкого горіння в широкому діапазоні режимів забаластованого газу із змінною концентрацією палива і домішок необхідно використовувати додаткові способи стабілізації горіння. Одним з таких способів може бути використання стороннього джерела енергії з високою температурою, наприклад, запалюючого факелу.

В Україні роботи щодо розробки та впровадження пальників для спалювання біогазу різного складу в енергетичних та промислових котлах та установках виконуються, зокрема, в Інституті Газу НАН України [14-18].

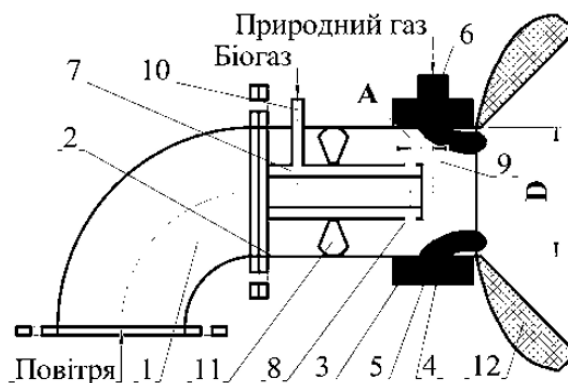
На рис. 1.11 показано пальник з комбінованою подачею низькокалорійних газових палив.



1 – колектор біогазу, 2 – колектор природного газу, 3 – подача основного повітря, 4 – подача вторинного повітря, 5 – центральний канал підведення вторинного повітря

Рисунок 1.11 - Схема пальникового пристрою (6 МВт) для котла ДКВР-20/13, що має три пальники, які можуть одночасно працювати на природному газі і біогазі.

На рис. 1.12 показано двоколекторний пальниковий пристрій вихрового типу для сумісного спалювання біогазу та природного газу.



1 – підведення повітря; 2 – корпус; 3 – біогазів колектор; 4 – сопла подання біогазового палива; 5 – траєкторія біогазових струменів; 6 – закручуючий апарат лопаткового типу; 7 – патрубок підведення природного газу; 8 – збірник природного газу; 9 – подача струменів природного газу; 10 – трубопровід подачі природного газу; 11 – реєстрові лопатки; 12 – вихід в амбразуру

Рисунок 1.12 - Двоколекторний пальниковий пристрій вихрового типу для сумісного спалювання біогазу та природного газу.

В роботі встановлено, що для організації ефективного спалювання біогазу його слід подавати перед виходом струменів природного газу. У зв'язку із меншою швидкістю розповсюдження полум'я в біогазі необхідно використати додаткову стабілізацію полум'я біогазу. В роботі використана закрутка повітряного потоку.

Одна із схем пальника з можливістю комбінованого спалювання суміші генераторного та природного показана на рис. 1. 13.

В конструкції передбачено як комбіноване спалювання, так і спалювання чистого природного газу, оскільки обидва види палив подаються окремо, а сумішоутворення та перемішування газів здійснюються в тунелі пальника та у самій топці .

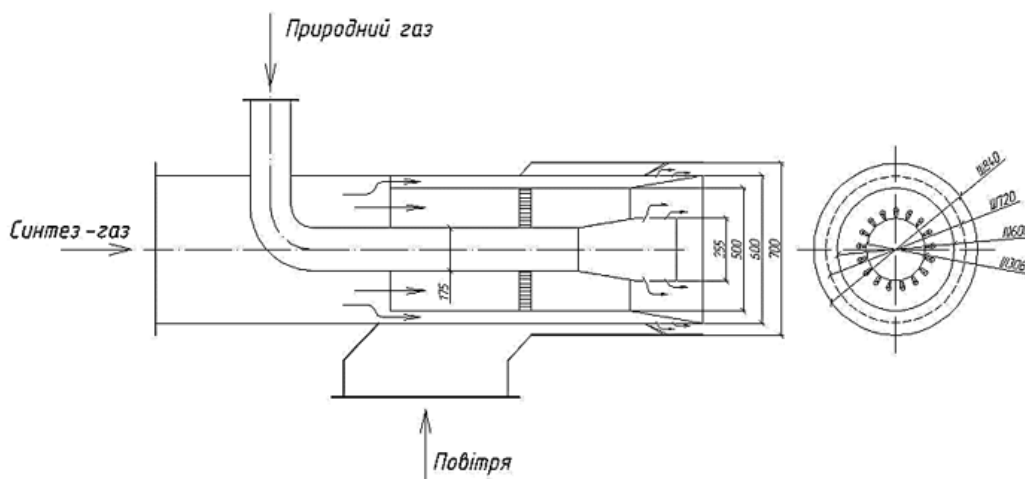


Рисунок 1.13 - Пальник для комбінованого спалювання суміші природного та генераторного газу

Результати аналогічних робіт щодо дослідження спалювання природного і генераторного газу наведено в [17, 18]. В пальнику подача природного і генераторного газів передбачається по окремим каналам. Для запобігання проскоку полум'я в змішувач утворення суміші газів та їх перемішування з повітрям здійснюється в тунелі пальника і самій топці.

В останні роки приділяється значна увага використанню нетрадиційних газових палив в газових турбінах.

Були проведені дослідження з використанням, зокрема, синтез-газу, що утворюється в результаті переробки високосольного вугілля, в камері згоряння ГТУ потужністю 2,5 МВт [19]. В процесі роботи змінювались склад і теплота згоряння синтез-газу. В результаті випробувань конкретної конструкції камери, яка призначена для роботи на природному газі, встановлено пов'язане із зміною структури факелу збільшення виходу оксидів азоту наприклад, з 66 ppm до 200 ppm у випадку спалювання газу з меншою теплотвірною спроможністю синтез-газу. Зроблено висновок про необхідність внесення потрібних змін в конструкцію камери згоряння.

Розвиток енергетичної галузі в країнах Євросоюзу визначається трьома основними принципами: безпека, зниження залежності від нафти і газу, екологічна чистота. Вважається, що альтернативним паливом, яке

задовольняє всім трьом принципам, є гази з біомаси. В рамках проекту Європейського союзу «Високоєфективна газова турбіна з використанням синтетичного газу» (HEGSA: High Efficient Gas Tyrbine with Syngas Application) [20] були проведені випробування камери згоряння, схема якої показана на рис. 1.14.

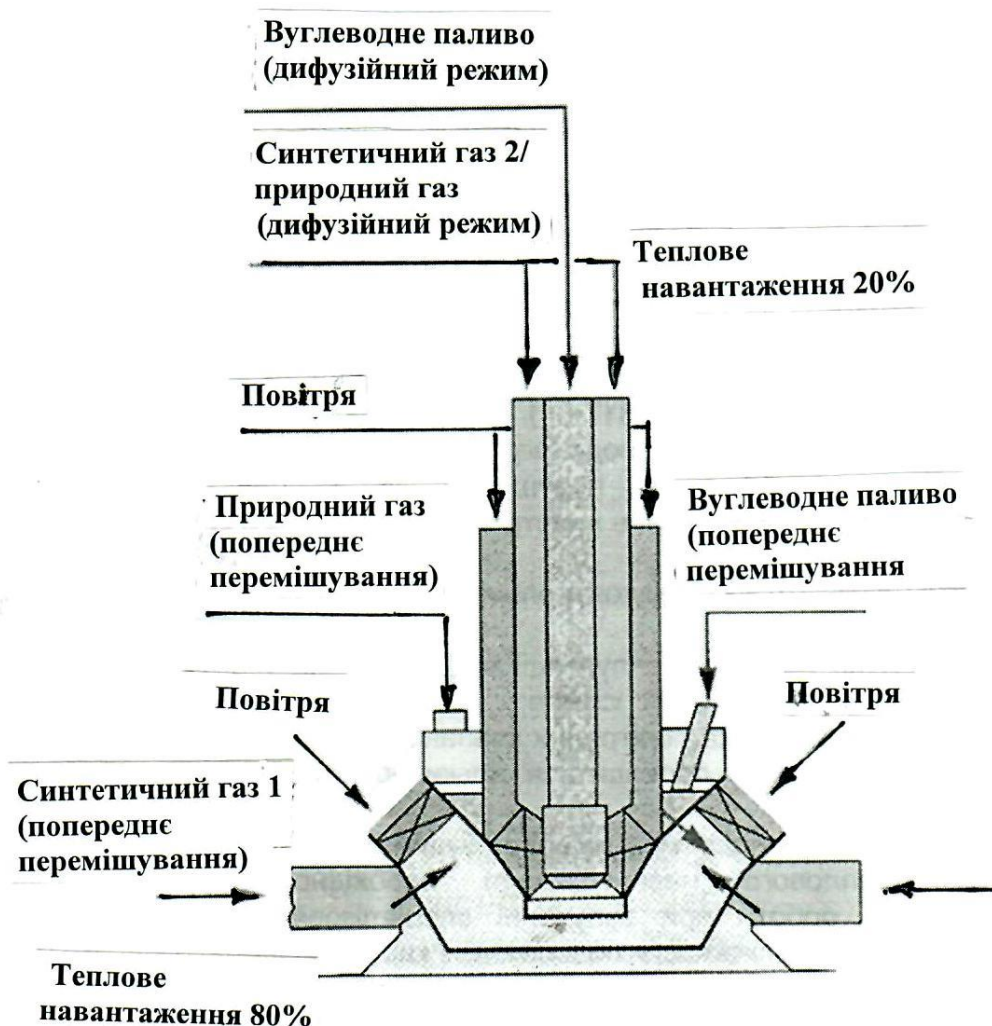


Рисунок 1.14 - Схема камери згоряння з можливістю одночасного спалювання природного і синтетичного газів по проекту HEGSA

За одним із варіантів передбачалось використання біогазу (суміш 40 % - 75 % метану і двоокису вуглецю плюс різні домішки) або синтетичного газу (суміші водню, оксиду вуглецю і різні домішки).

Була розроблена концепція сучасного малоімісійного пальника для турбін з використанням синтетичного газу. Вона характеризується двома каналами для введення синтетичного газу. Основний потік подається в діагональну зону завихрувача, що дає підвищення стабільності горіння бідного синтетичного газу.

Одною з проблем, яку необхідно вирішити при розробці пальника, є велика вірогідність проскоку полум'я в змішувач.

Спалювання попередньо перемішаної газової суміші є основою для отримання низького рівня емісії NO_x . Одною з проблем, яку необхідно вирішити при розробці пальника, є велика вірогідність проскоку полум'я в змішувач.

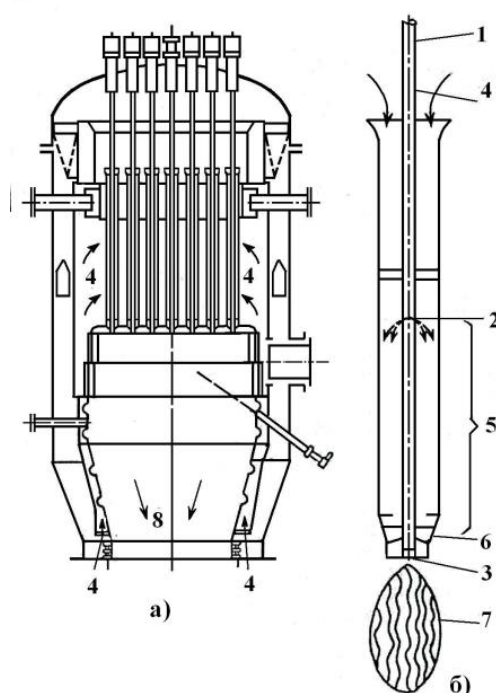
В [21] досліджувались такі базові характеристики горіння палив, як швидкість розповсюдження ламінарного полум'я і діапазон сталого горіння сумішей палива з повітрям. В дослідженнях біогаз складався з 66,4% метану, 30,6 двоокису вуглецю і 3% азоту. Встановлено, що в результаті наявності інгібіторів діапазон сталого горіння в суміші з повітрям звужується до значень від коефіцієнту надлишку повітря $\alpha_{\text{мин}} = 0,6$ до $\alpha_{\text{макс}} = 1,2$ у порівнянні з діапазоном сталого горіння для суміші метан – повітря, де $\alpha_{\text{мин}} = 0,6$ до $\alpha_{\text{макс}} = 1,3$. Швидкість розповсюдження полум'я при $\alpha = 1,0$ складала $u_n = 0,2638$ м/с.

З метою розширення діапазону сталого горіння біогазу використовується додавання до біогазу високореакційного палива, зокрема, водню, замість метану в [22] досліджувались процеси горіння трьох видів біогазу такого складу: чистий біогаз (Н0: 40% CO_2 , 60% CH_4), збагачений воднем біогаз (Н5: 40% CO_2 , 55% CH_4) і (Н10: 40% CO_2 , 50% CH_4).

Встановлено, що додавання водню до біогазу розширює межі сталої роботи суміші з повітрям. Довжина факелу поступово збільшується, структура зони горіння змінюється, локальна температура факелу підвищується і вихід термічних оксидів азоту збільшується. Для

моделювання процесу горіння в камері використовувалась програма ANSYS і удосконалена модель турбулентності k-ε.

На рис. 1.15,а показана багатомодульна камера згоряння фірми ABB [37], що складається з окремих самостійно працюючих модульних елементів (рис. 1.15, б), до яких підводиться повітря 4. Через паливні насадки 2 в зону попереднього перемішування 5 подається паливо. При виході з насадка після завихрувача 6 паливно-повітряна суміш запалюється від чергового пальника 3, до якої подається паливо 1.



1 – подача палива; 2 – струмені палива; 3 – черговий пальник; 4 – подача повітря; 5 – зона змішування; 6 – завихрувач; 7 – черговий факел

Рисунок 1. 15 - Схема багатомодульної камери згоряння фірми ABB

В [23] було досліджено особливості циклів газової турбіни у разі використанні біогазу, етанолу і синтез-газу у порівнянні з циклом на природному газі. Встановлено, що при відповідних перебудовах елементів газової турбіни ефективність циклу може бути на одному рівні.

З метою підвищення стабільності горіння в [24] були проведені дослідження щодо впливу кута закрутки повітряного потоку при дифузійному спалюванні біогазу – суміші 60% CH_4 і 40% CO_2 . Кут закрутки

складав 30° , 45° та 60° . Встановлено, що при використанні закрутки утворюється зона рециркуляції за завихрувачем і при куті закрутки повітряного потоку більше 45° сталість горіння підвищується в 4 – 5 разів у порівнянні з незакрученим потоком.

В енергетиці при спалюванні нетрадиційних палив використовуються конструкції пальників, які були розроблені для спалювання високореакційного палива, тобто традиційно використовуються реєстрові пальники з закруткою повітряного потоку, що збільшує втрати тиску повітря, ускладнює роботу пальника при зміні режиму роботи, а також не дозволяє використати принцип модульності виконання пальника.

Одним з перспективних типів пальникових пристроїв, які можуть забезпечити ефективне спалювання нетрадиційних газових палив, керованість процесом горіння, формування поля температур газів в топці, забезпечення сталості горіння при зміні швидкості повітряного потоку, а також модульність виконання можуть бути мікрофакельні пальникові пристрої стабілізаторного типу, які розроблені в Національному технічному університеті України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського» (НТУУ «КПІ ім. І. Сікорського») [25].

1.4 Висновки до розділу 1

1. Нетрадиційні або альтернативні палива являють собою суміш горючих компонентів типу метану, водню, оксиду вуглецю і баласту у – азоту, повітря, двоокису вуглецю та інших складових.

2. Наявність баласту призводить до зменшення температури горіння, зниження сталості горіння при підвищенні швидкості повітряного потоку і звуження концентраційних меж горіння.

3. При необхідності роботи пальника із зміною концентрації домішок використовується додаткова подача високореакційного палива для організації підпалюю чого факелу.

4. Використання стабілізаторних пальників з комбінованою подачею палив дозволяє організувати стаке горіння факелу у всьому діапазоні зміни концентрацій полю антів.

5. Задачею досліджень є розробка стабілізаторного пальника з уніфікованою організацією робочого процесу забаластованого і високореакційного палива.

2 ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНЕ ОБЛАДНАННЯ, ВИМІРЮВАЛЬНА АПАРАТУРА І МЕТОДИКА ОБРОБКИ ДОСЛІДНИХ ДАНИХ

2.1 Характеристика експериментального обладнання

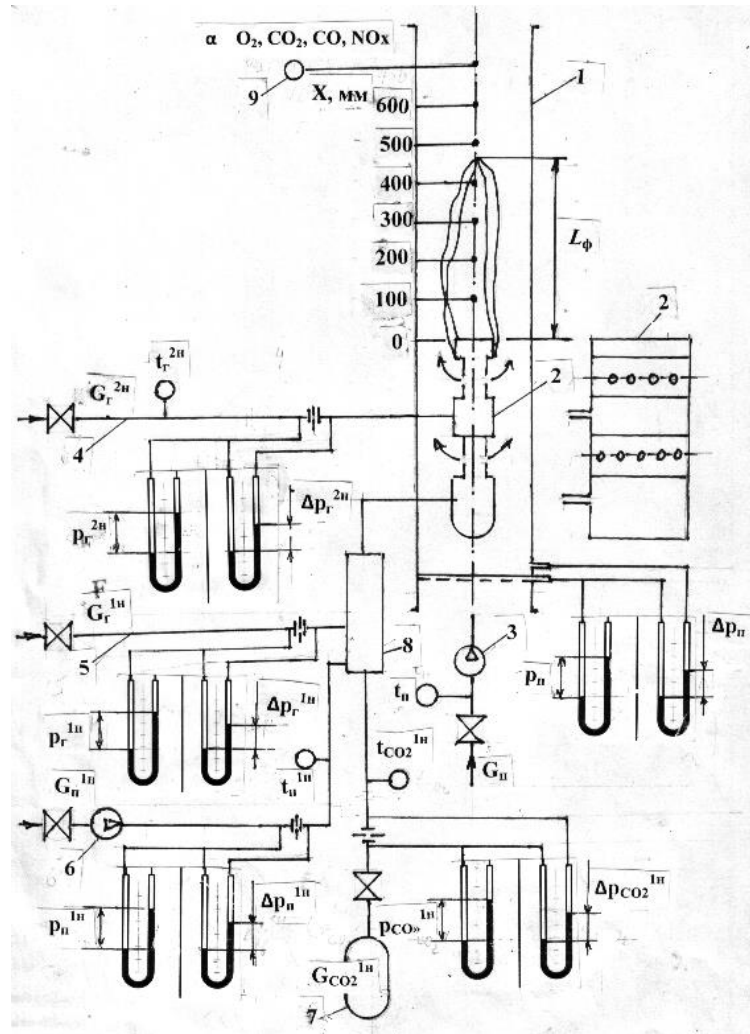
Для проведення випробувань у відповідності з розробленою програмою робіт використовувались модернізовані дослідні стенди в лабораторії кафедри ТАЕ.

На рис. 2.1 приведено експериментальний стенд для визначення характеристик факелу при горінні палива за стабілізатором 1 у відкритому просторі.

На стенді забезпечується подача повітря за допомогою повітряного вентилятора, а також вимір тиску, витрати і температури повітря. Для подачі паливного газу використовуються лінії 4, 5, які також дозволяють виконувати вимірювання параметрів високореакційного газу – тиску, температури і витрати. Для утворення низькорекційного палива використовується колектор-змішувач, в який подається високо реакційний газ по лінії 5, а також баластні домішки - повітря від окремого вентилятора 5 або CO_2 з балону 7.

Вимір параметрів продуктів горіння газу використовуються ХА термопари діаметром 0,5 мм з потенціометром, розміщенні до 700 мм через 100 мм. Газоаналізатори типу ОКІ-5М, Testo 330 та Газохром 3101 дозволяють виконувати аналіз вмісту в продуктах горіння O_2 , CO_2 , CO , NO_x , коефіцієнт надлишку повітря α .

При проведенні досліджень визначались межі сталої роботи обох зон пальника – запалювання і зрив факелу, довжина факелу (по фотографіям), температура і склад продуктів горіння високореакційного газу вздовж осьової лінії сліду за стабілізатором. На наступному етапі досліджень оцінювався вплив подачі полюантів на роботоспроможність пальника – межі сталої роботи, температуру, довжину факелу, якість горіння.



1 – робоча ділянка; 2 – двонішевий модульний стабілізатор; 3 – повітряний вентилятор; 4 – лінія подачі і виміру витрати газу на друге нішеве поглиблення; 5 – лінія подачі і виміру витрати газу на перше нішеве поглиблення; 6 – лінія подачі і виміру витрати повітря на попереднє сумішоутворення з газом; 7 – емність з двоокисом вуглецю (CO_2); 8 – колектор-змішувач; 9 – лінія виміру температури газу і відбору проби для газового аналізу

Рисунок 2.1 -Схема стенду для випробувань двонішевого стабілізаторного пальника

Можливість і характеристики роботи пальника на низько реакційному паливі при зміні його складу визначалась при одночасній подачі

високореакційного газу і баластної домішки через колектор-змішувач до першого нішевого заглиблення, а також високореакційного газу до другого нішевого поглиблення. При цьому змінювались витрати всіх трьох складових компонентів.

Зовнішній вигляд стенду для досліджень горіння факелу у відкритому просторі показано на рис. 2.2.

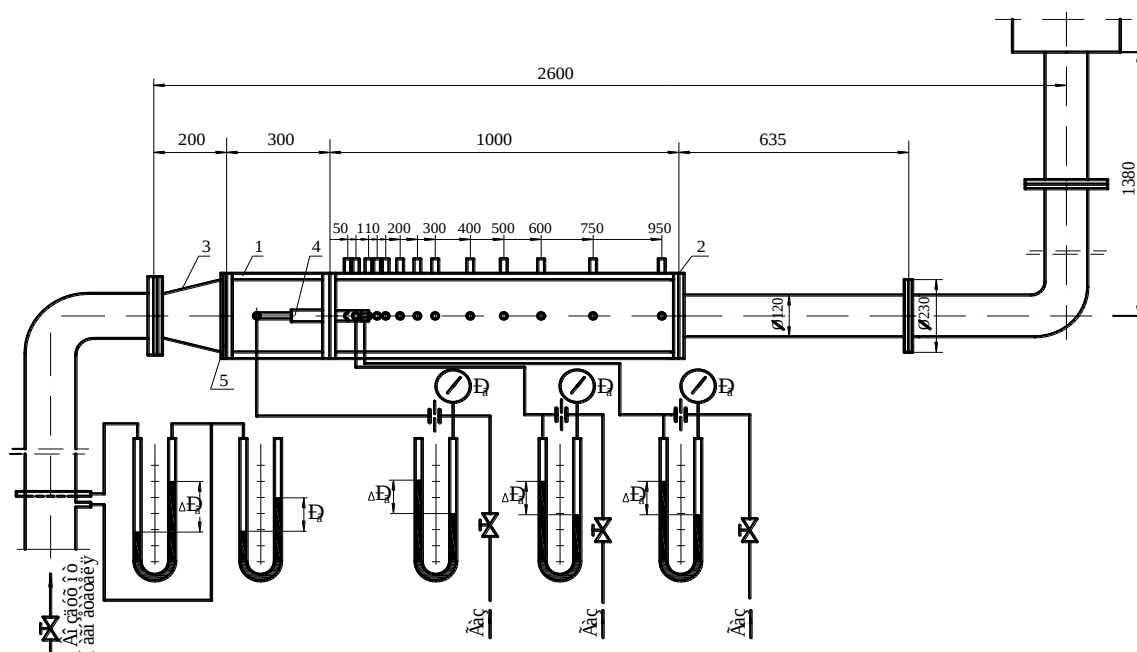


Рисунок 2.2. Стенд для вивчення горіння за стабілізатором у відкритому просторі

Для визначення характеристик робочого процесу горіння палива за одиночним і системою стабілізаторів у закритому каналі, без впливу оточуючого повітря дослідження проводились на закритому дослідному стенді (рис.2.3).

Повітря від компресора підводиться через перехідний дифузор 3 вирівнюючу решітку 5 до вузла 1, в якому кріпиться стабілізатор 4. Горіння палива відбувається у ділянці 2, яка охолоджується водою. Виміри необхідних параметрів в робочій ділянці виконуються за допомогою зондів, які вставляються в штуцери на різних відстанях від стабілізатора.

Зовнішній вид стенду випробувань окремого стабілізатора і системи стабілізаторів показано на рис. 2.4.



1 – вузол встановлення стабілізаторів; 2 – вимірювальна ділянка; 3 – перехідний дифузор; 4 – стабілізатор.

Рисунок 2.3 - Стенд для проведення випробувань горіння палива в системі стабілізаторів



Рисунок 2.4 - Експериментальний стенд для випробувань характеристик стабілізаторів в закритому каналі.

Для заміру характеристик робочих тіл - витрати повітря, паливного газу, додаткових баластних домішок (повітря, вуглекислого газу) передбачено вимірні пристрої – діафрагми. Точкові вимірювання параметрів

виконувались за допомогою зондів: швидкості повітря – трубки Піто-Прандля, температури - ХА та ППР термопари, склад продуктів згоряння – газоаналізатори Testo-330, «ОКСИ - 5М», «Газохром 3101».

2.2 Методика проведення випробувань, обробка дослідних даних

Методика випробувань пальникових пристроїв визначається відповідною нормативною та технічною документацією [26-30]. Методика уточнюється в залежності від типу пальника.

При проведенні досліджень визначається діапазон сталої роботи пальника – коефіцієнт надлишку повітря при запалюванні факелу, «бідному» та «багатому» зривах. Будується залежність цих коефіцієнтів від швидкості повітря, наприклад, $\alpha^{zan} = f(W_{\Pi})$, $\alpha^{max} = f(W_{\Pi})$, $\alpha^{min} = f(W_{\Pi})$.

Для визначення характеристик робочого процесу горіння палива виконують вимірювання складу продуктів горіння (O_2' , CO_2' , H_2' , CH_4' , CO' , NO_x'). Для цього у відповідні штуцери вводяться термопари і зонди для відбору продуктів горіння для аналізу.

Розрахунки проводяться за формулами, що наведені у відповідних документах і технічній літературі [27, 31, 32].

Основні з використаних формул наведено нижче.

1. Нижча теплота згоряння палива Q_H^P , кДж/м³, визначається за допомогою калориметру.
2. Витрата газу V_G , м³/с, вимірюється газовим лічильником і розраховується за формулою:

$$V_G = \frac{V_{лич}}{\tau_G}, \quad (2.1)$$

де $V_{лич}$ – загальна витрата газу за час проведення випробувань, м³; τ_G – час вимірів, с.

3. Витрата газу V_{Γ}^H , м³/с, що приведена до нормальних умов, розраховується як:

$$V_{\Gamma}^H = \frac{273 \cdot (P_{\Gamma}^{liq} + P_6)}{101325(273 + t_{\Gamma}^{liq})}, \text{ м}^3/\text{с}, \quad (2.2)$$

де P_{Γ}^{liq} - надлишковий тиск газу перед лічильником, Па;

t_{Γ}^{liq} - температура газу перед лічильником, °С.

4. Витрата повітря V_{Π}^{Δ} , м³/с, розраховується як:

$$V_{\Pi}^{\Delta} = K_{\Delta} \sqrt{\frac{\Delta P_{\Pi}^{\Delta}}{\rho_{\Pi}^{\Delta}}}, \text{ м}^3/\text{с}, \quad (2.3)$$

де K_{Δ} – коефіцієнт, що враховує геометричні характеристики діафрагми;

ΔP_{Π}^{Δ} - перепад тиску повітря на діафрагмі, Па;

ρ_{Π}^{Δ} - реальна густина повітря розраховується за формулою:

$$\rho_{\Pi}^{\Delta} = \frac{(P_6 + P_{\Pi}^{\Delta})}{(t_{\Pi}^{\Delta} + 273)R_{\Pi}}, \text{ м}^3/\text{с}, \quad (2.4)$$

де P_{Π}^{Δ} - надлишковий тиск повітря перед діафрагмою, Па;

t_{Π}^{Δ} - температура повітря перед діафрагмою, °С;

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

5. Витрата повітря V_{Π}^H , м³/с, що приведена до нормальних умов:

$$V_{\Pi}^H = V_{\Pi}^{\Delta} \cdot \frac{273 \cdot (P_{\Pi}^H + P_6)}{101325 \cdot (273 + t_{\Pi}^H)}, \text{ м}^3/\text{с}, \quad (2.5)$$

де P_{Π}^H - надлишковий тиск повітря перед пальником, Па;

t_{Π}^H - температура повітря перед пальником, °С.

6. Теплова потужність пальника N_{Π} , кВт, розраховується за формулою:

$$N_{\Pi} = V_{\Gamma}^H \cdot Q_H^P. \quad (2.6)$$

7. Коефіцієнт надлишку повітря α розраховується за однією з таких формул:

а) якщо відомі витрати компонентів:

$$\alpha = \frac{V_{\Pi}^H}{V_0 \cdot V_{\Gamma}^H}, \quad (2.7)$$

де V_0 – стехіометричний об'єм повітря для горіння газу, $\text{м}^3/\text{м}^3$.

Він розраховується таким чином:

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

б) за результатами газового аналізу

$$\alpha = \frac{21}{21 - (O'_2 - 0,5CO' - 0,5H'_2 - 2 \cdot CH'_4)} ; \quad (2.9)$$

в) у разі відсутності горіння (ізотермічні продувки)

$$\alpha = \frac{1}{V_0} \left(\frac{CH'_4}{CH_4^{сум}} - 1 \right). \quad (2.10)$$

8. Втрати теплоти від хімічної неповноти горіння, q_3 , %, розраховуються як:

$$q_3 = \frac{(30 \cdot CO' + 25,8 \cdot H' + 85,5 \cdot CH'_4)}{P} \cdot 100\%, \quad (2.11)$$

де P – нижча теплота згоряння палива відносно 1 м^3 сухих продуктів горіння, для природного газу $P=1000 \text{ кДж/м}^3$;

h – коефіцієнт розбавлення продуктів згоряння надлишковим повітрям:

$$h = \frac{CO_{2\max}}{CO'_2 + CO' + CH'_4}, \quad (2.12)$$

$$CO_{2\max} = \frac{21(CO'_2 + CO' + CH'_4)}{21 - (O'_2 - 0,5 \cdot CO' - 0,5 \cdot H'_2 - 2CH'_4)}. \quad (2.13)$$

9. Між коефіцієнтом надлишку повітря α та коефіцієнтом розбавлення продуктів згоряння h існує залежність:

$$\alpha = 1 + \frac{V_0}{V_{с.г}} \cdot (h - 1) = 1 + m(h - 1). \quad (2.14)$$

Якщо визначити $\frac{V_0}{V_{с.г}} = m$, то для природного газу $m=0,9$.

10. Концентрації C , мг/м^3 , оксиду вуглецю (CO) та оксидів азоту (NO_x) у перерахунку на NO_2 , які приведені до нормальних умов (0°C , 101325 Па) і коефіцієнту надлишку повітря $\alpha=1,0$ ($C_\alpha = 1,0$), розраховуються за формулою:

$$C_{\alpha=1,0} = 371,2 \cdot C_m \cdot h \frac{273 + t_{\Pi}}{P_6}, \text{ мг/м}^3, \quad (2.16)$$

де t_{Π} , P_6 – відповідно температура, $^{\circ}\text{C}$, та атмосферний тиск, Па, повітря;
 C_m відповідно масова концентрації оксидів в процентах або мг/м^3 .

2.3 Висновки до розділу 2

1. Модернізовано стенд який дозволяє виконувати роботи по випробуванню стабілізатора в межах розробленої програми

2. Розроблена система дозволяє виконувати необхідні заміри характеристик параметрів- довжина факела, температура повітря і газів, витрати компонентів, виконувати газовий аналіз, вимірювати вміст в тому числі CO і NOx

3 ХАРАКТЕРИСТИКИ РОБОЧОГО ПРОЦЕСУ МОДУЛЬНОГО ДВОНІШЕВОГО СТАБІЛІЗАТОРНОГО ПАЛЬНИКОВОГО ПРИСТРОЮ

3.1 Конструкція модульних двонішевих пальників

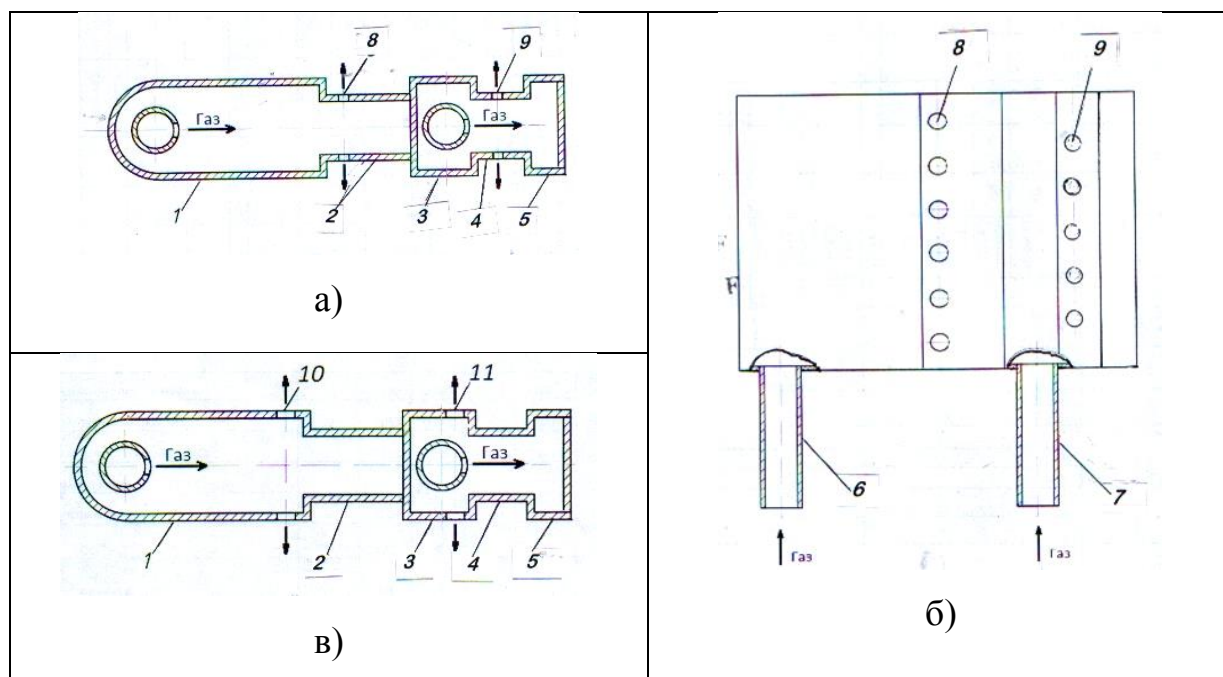
Виконані на кафедрі ТАЕ дослідження стабілізаторних пальників з комбінованою подачею газів показали можливість ефективного і надійного спалювання палива в широкому діапазоні зміни концентрації [25]. При цьому струмені низькорекційного палива проходять між високотемпературними стабілізаційними факелами, які утворює високо реакційне паливо. В той же час, при подачі підпалюючого високотемпературного в зону рециркуляції або із зривних кромek стабілізатора спостерігається збільшення довжини факелу з причини затягування процесу перемішування і горіння обох палив.

З метою забезпечення подачі і горіння альтернативного і підпалюючого палив за однаковими схемами, а також отримання стійкого і ефективного горіння палив в пальнику при зміні концентрації домішок а альтернативному паливі в широкому діапазоні був розроблений і випробуваний двонішевий пальниковий пристрій, який представлений на рис. 3.1 [33]. При розробці двонішевого пальникового пристрою враховувались розробки струменево-нішевих стабілізаторів, які виконуються під керівництвом проф., д.т.н. Абдуліна [34, 35 та ін..].

В роботі були проведені випробування двох варіантів пальників. Як видно з рис. 3.1. двонішевий стабілізаторний пальник дозволяє організувати процеси горіння кожного з обох видів палив за допомогою свого окремого нішевого поглиблення.

Перший комбінований двонішевий газовий пальник для окремого або сумісного одночасного спалювання низькорекційного і високореакційного палив складається (рис. 3.1,а) з полів корпусів 1, 3 першого і другого

нішевих поглиблень, двох нішевих поглиблень 2, 4 і вихідного торця 5. Паливо подається в нішеві поглиблення через отвори відповідно 8, 9.



1 – корпус першої ніші; 2 – нижня стінка першої ніші; 3 - корпус другої ніші; 4 – нижня стінка другої ніші; 5 - вихідний торець пальника; 6 - штуцер підведення газу до першої ніші; 7 - штуцер підведення газу до другої ніші; 8 - отвори подачі газу в першу нішу; 9 - отвори подачі газу в другу нішу; 10 – отвори подачі газу перед першою нішею; 11 – отвори подачі газу перед другою нішею

Рисунок 3.1 - Варіанти досліджених двонішевих модульних стабілізаторів для спалювання альтернативних газових палив; а), б) - поперечний переріз і вид збоку з подачею палива в нішеві поглиблення; в) – поперечний переріз з подачею палива з кромки перед нішевими поглибленнями.

В набігаючий повітряний потік в першому варіанті паливо подається через систему отворів 8,9 в стінках першого і другого нішевих поглиблень. Паливо в полі корпуси першого і другого нішевих поглиблень подається через штуцери 6, 7 (рис. 3.1,б).

Другий варіант комбінованого двонішевого газового пальника для окремого або сумісного одночасного спалювання низькорекційного і високореакційного палив (рис. 3.1,в) відрізняється тим, що паливо подається через систему отворів в стінках корпусів стабілізатора. Газові отвори розміщені на зривній кромці на деякій відстані перед нішевими поглибленнями.

При розгляді запропонованих схем подачі палив виходили з таких міркувань. Вважається, що в першому варіанті пальника (рис. 3.1, а, б) через отвори 8 виконується подача на спалювання газу змінного складу - від високореакційного газу до суміші газу з баластом, яка виходять за межі сталого горіння, а через отвори 9 – виконується подача високореакційного палива, яке утворює високотемпературні підпалюючі (чергові) факели.

Оскільки в нішеві поглиблення заходить тільки якась частина повітря, що обтікає стабілізатор, при подачі палива в нішеве поглиблення слід очікувати високу сталість процесу горіння обох факелів при збільшених коефіцієнтах надлишку повітря.

У разі необхідності зменшити довжину факелу паливо пропонується подавати через отвори 10, 11 (рис. 3.1,в) перед нішевими поглибленнями на часткове попереднє перемішування з окисником (повітрям).

Прийняті конструктивні схеми організації процесу горіння з використанням двох окремих нішевих поглиблень можуть дати можливість при необхідності використати також інші різні комбінації процесів сумішоутворення і горіння палив.

При всіх можливих варіантах газороздачі для забезпечення високих експлуатаційних показників горіння низькорекційного палива - надійності запалювання, стійкості факелу, високої повноти згоряння струмені низькорекційного газу з різним і перемінним під час експлуатації вмістом в ньому баласту проходять через високотемпературні факели високореакційного палива.

3.2 Експериментальні дослідження характеристик двонішевого комбінованого пальника при подачі газу в нішеві поглиблення

3.2.1. Аеродинаміка течії реагентів в двонішевому стабілізаторі при подачі газу в нішевому поглибленні

З використанням програмного комплексу ANSYS Fluent [39] був зроблений аналіз течії струменів палива (пропан-бутан) при подачі з газових отворів, що розміщені в нішевому поглибленні.

На рис. 3.2 показано лінії концентрації палива (пропан-бутан), що виходить з окремого газового отвору, що розташований в першому нішевому поглибленні. Розрахунки виконувались для осі газового струменя діаметром $d_r = 5,0$ мм. Швидкість повітря складала $W_{\text{п}} = 10,0$ м/с, швидкість газових струменів розглядалась в діапазоні $W_r = 7,0 - 25,0$ м/с.

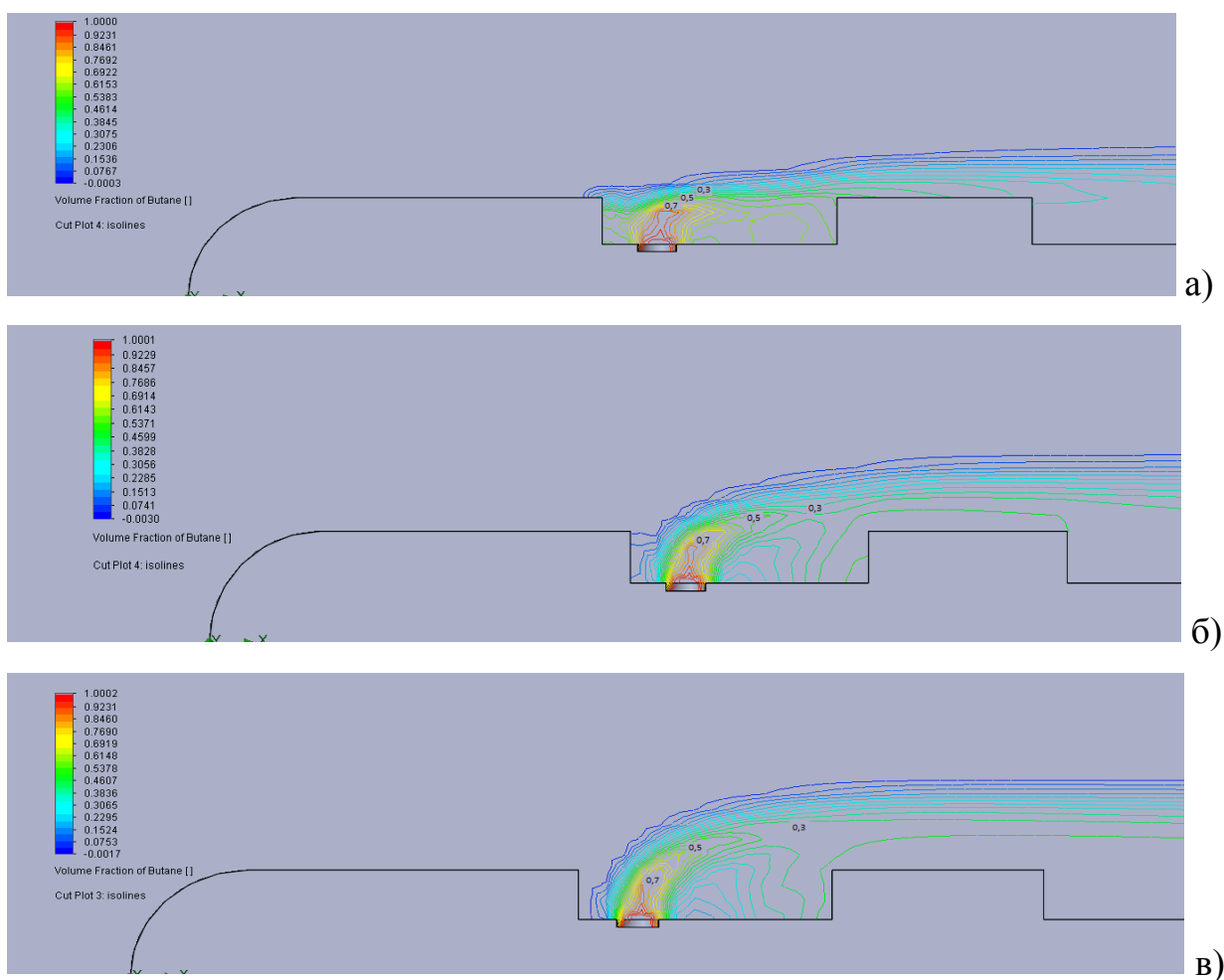


Рисунок 3.2 - Розрахункові поля концентрацій газу (пропан-бутан) при виході струменя газу з отвору в першому нішевому поглибленні $d_r = 5,0$ мм: $W_{\text{п}} = 10$ м/с; а) - $W_r = 7,0$ м/с; б) - $W_r = 14,0$ м/с; в) - $W_r = 25,0$ м/с.

Як показав розгляд результатів розрахунків, при виході струменів газу з отворів в нішевому поглибленні в дослідженому діапазоні достатньо великої зміни швидкості струменів (витрати палива) в нішевому поглибленні концентрація суміші газ-повітря знаходиться в концентраційних межах горіння палива.

На рис. 3.3 показано концентрації палива (пропан-бутан) по осі газового струменя вздовж всього двонішевого стабілізатора при виході газового струменя з першого (а) і другого (б) нішевих поглиблень; $W_{\Pi} = 10$ м/с; $W_{\Gamma} = 25$ м/с.

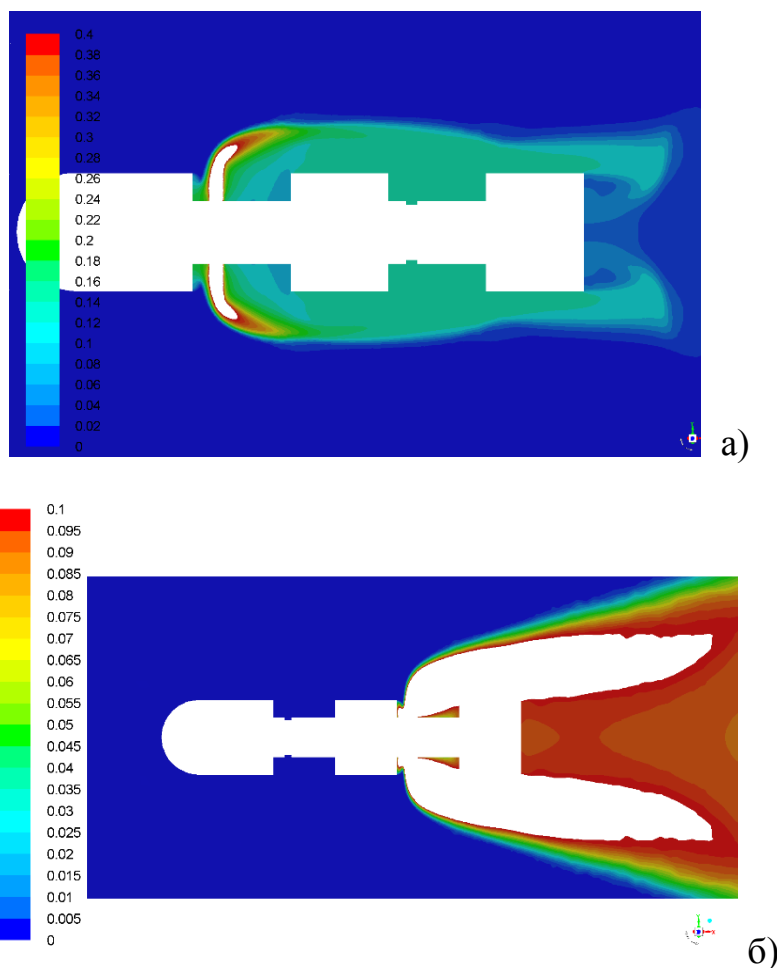


Рисунок 3.3 - Поля концентрацій газу (пропан-бутан) по осі струменя газу в двонішевому стабілізатору при виході газу з першого (а) і другого (б) нішевих поглиблень; $W_{\Pi} = 10$ м/с; $W_{\Gamma} = 25$ м/с.

Як видно, при виході газу з першої ніші частина палива заходить в другу нішу і навіть в зону рециркуляції за стабілізатором.

Розрахунки за допомогою програмного комплексу Fluent дозволили виконати розміщення отворів при одночасній комбінованій подачі палива таким чином, щоб в обох нішах не було злиття струменів газу.

Розрахована схема подачі газу показана на рис. 3.4, де показано лінії токів палива, які одночасно відповідають концентрації.

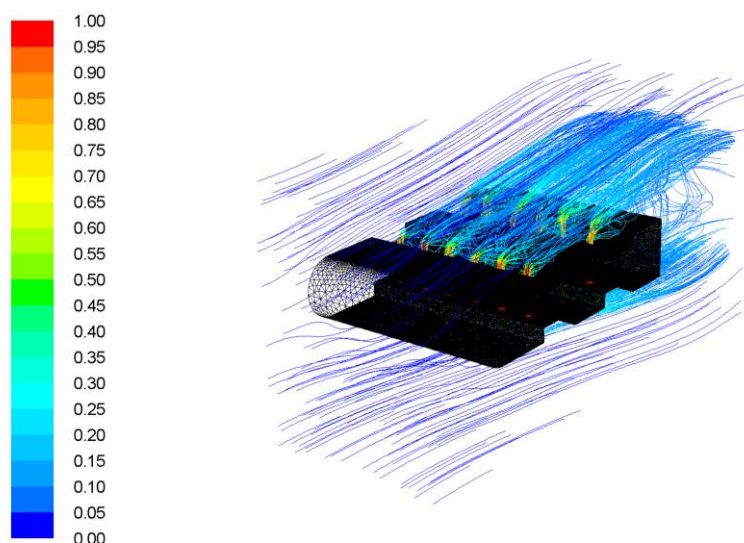


Рисунок 3.4 - Лінії токів газу, які одночасно відповідають концентрації палива при одночасній подачі газу в обох нішевих поглибленнях.

Розрахунки показують, що шляхом зміни діаметру газових отворів, місця і кроку їх розташування в ніші можна регулювати ступінь перемішування палива і повітря і впливати на характеристики процесу горіння.

3.2.2. Сталість горіння в пальнику

На дослідному стенді були проведені натурні вогневі дослідження варіанту двонішевого пальникового пристрою, виконаного за схемою рис. 3.1,а, тобто при подачі газу через отвори в першому нішевому поглибленні.

На рис. 3.5 наведено дані залежності загального коефіцієнту надлишку повітря в пальнику при бідному зриві факелу ($\alpha_{\Sigma}^{\max}$) у випадку подачі газу в

перше нішеве поглиблення від швидкості повітряного потоку, що обтікає стабілізатор $W_{\text{ш}}$, м/с.

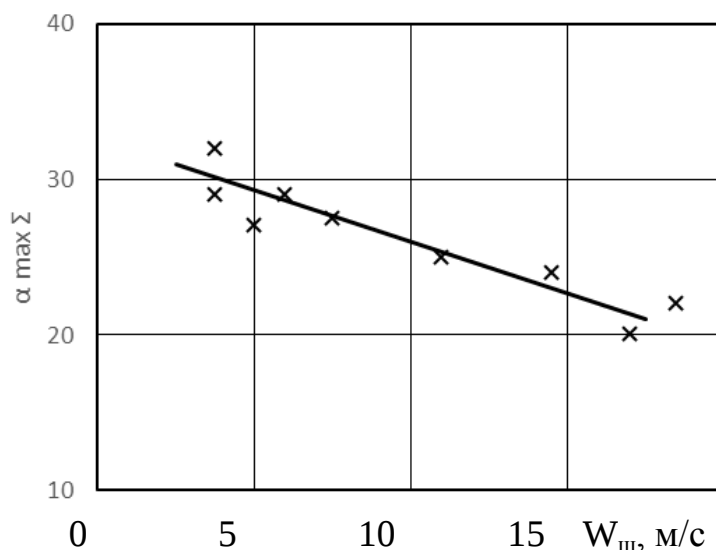


Рисунок 3.5 - Залежність загального коефіцієнту надлишку повітря в пальнику на режимі бідного зриву у випадку виходу газових струменів з першого нішевого поглиблення від швидкості потоку повітря при таких геометричних розмірах елементів стабілізатора: $B_{\text{ст}} = 30$ мм; $K_f = 0,30$; довжина ніші вздовж потоку $L_{1\text{н}} = 30,0$ мм, глибина ніші $H_{1\text{н}} = 7,0$ мм.

Для випробуваного варіанту стабілізатора залежність загального (розрахованого на весь повітряний потік) коефіцієнту надлишку повітря в пальнику на режимі бідного зриву у випадку виходу газових струменів з першого нішевого поглиблення $(\alpha_{\Sigma}^{\text{max}})^{1\text{н}}$ від швидкості повітряного потоку $W_{\text{ш}}$ на зрізі стабілізатора можна розрахувати за формулою:

$$(\alpha_{\Sigma}^{\text{max}})^{1\text{н}} = 33 - 0,7 \cdot (W_{\text{ш}}) \quad (3.1)$$

Значення $(\alpha_{\Sigma}^{\text{max}})^{1\text{н}}$ були підраховувані з урахуванням витрати всього повітря в пальнику таким чином,

$$\alpha_{\Sigma}^{\text{max}} = G_{\text{п}}^{\Sigma} / L_0 \cdot (G_{\text{г}}^{1\text{н}})^{\text{д}}, \quad (3.2)$$

де $G_{\text{п}}^{\Sigma}$ – загальна витрата повітря в стенді;

L_0 – ваговий стехіометричний коефіцієнт;

$(G_{\text{г}}^{1\text{н}})^{\text{д}}$ – витрата газу в струменях першої ніші.

Отримані результати дослідів свідчать про достатньо широкий діапазон сталого горіння факелу в сторону бідного зриву. Якщо прийняти, що в нішу при подібних умовах обтікання (коефіцієнт затінення перетину стенду $k_f = 0,30$) поступає біля 6 % від всієї витрати повітря [35], можна вважати, що при загальному коефіцієнті надлишку повітря робочій ділянці стенду $\alpha_z = 20 \div 30$ коефіцієнт надлишку повітря в полості ніші $\alpha_{1n}^{max} = 1,2 \div 1,8$, тобто в нішевому поглибленні концентрація газу (пропан-бутан) є в діапазоні сталого горіння (для пропан-бутану $\alpha = 0,4 \div 1,7$) [36].

3.2.3. Вплив на довжину і температуру факелу швидкості повітря і схеми газороздачі

Були проведені випробування щодо визначення характеристик процесу горіння палива при виході струменів газу з першого і другого нішевих поглиблень. На рис. 3.6, а-г приведені фотографії факелів, а на рис. 3.6, д, е – температури продуктів горіння по довжині факелу вздовж осі сліду за стабілізатором при однакових витратах палива в перше і друге нішеві поглиблення.

Під час виконання досліджень витрата газу, що подається струменями з першого нішевого поглиблення, і повітря, що подається на попереднє змішуванням з цим газом, умовно прийняті такі позначення:

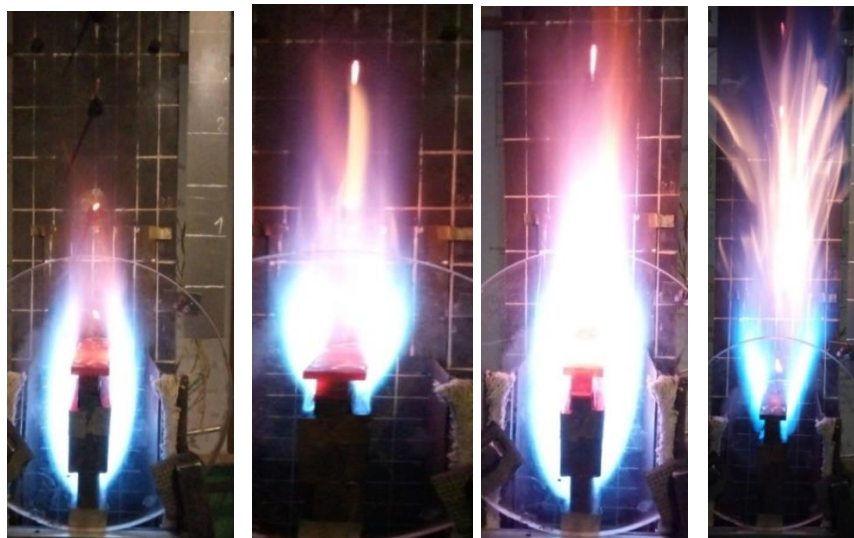
$(G_{\Gamma}^{1n})^d$ – витрата газу, що подається через отвори в першому нішевому поглибленні;

$(G_{\Pi}^{1n})^d$ - витрата повітря, що подається на попереднє сумішоутворення з газом $(G_{\Gamma}^{1n})^d$.

Результати експериментів показали, що при однакових витратах газу довжина факелу при подачі газу в перше за ходом повітря нішеве поглиблення дещо менше, ніж при подачі в друге нішеве поглиблення (див. рис. 3.6. а-б і в-г). Максимальні температури факелів дещо вище при подачі

газу в друге нішеве поглиблення, що вказує на більшу дифузійність процесу горіння.

Причина такого явища може бути пов'язана з тим, що відстань від газових отворів, що розміщені в першій ніші, до зривної кромки стабілізатора, а тому і довжина зони горіння і перемішування продуктів згоряння з повітрям більше, ніж у другій за ходом повітря ніші.

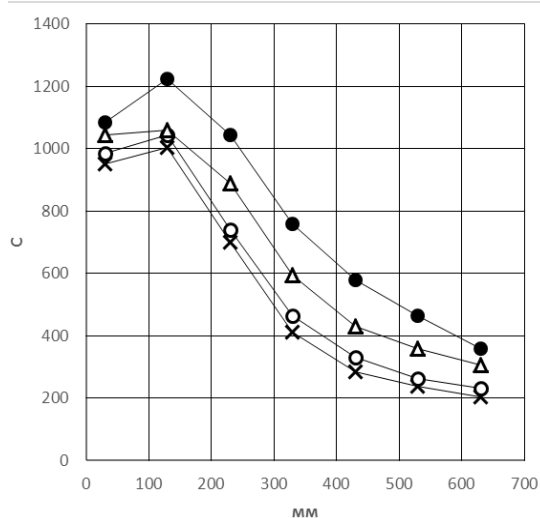


а)

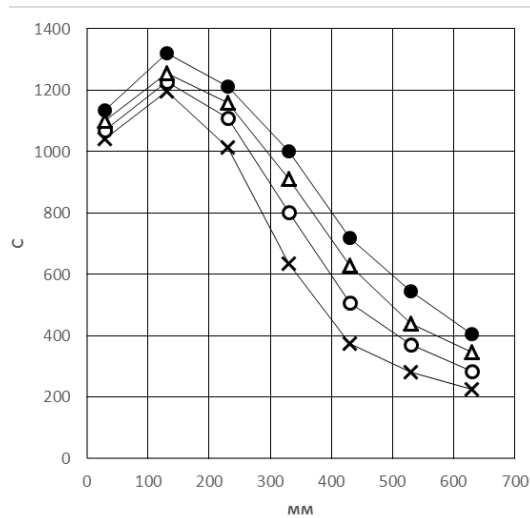
б)

в)

г)



д)



е)

Режими: а, в – подача газу в перше нішеве поглиблення, б, г – подача газу в друге нішеве поглиблення. Витрати газу: а,б – $(G_r^{1н})^д = (G_r^{2н})^д = 0,64$ г/с, в,г – $(G_r^{1н})^д = (G_r^{2н})^д = 1,27$ г/с;

Графіки температур: д,е - витрати газу: х – $(G_r^{1н})^д = (G_r^{2н})^д = 0,64$ г/с, о – 0,80 г/с, Δ – 1,06 г/с, ● – 1,27 г/с.

Рисунок 3.6 - Фотографії факелів (а-г) і температура продуктів горіння по довжині сліду за стабілізатором (д, е) при подачі палива в першу і другу ніші

Як видно з графіків, максимальна температура факелу для другого нішевого поглиблення спостерігається в діапазоні межах $1000 - 1300$ °С, що повинно забезпечувати надійне запалювання низькорекційного палива, що подається з газових отворів першої ніші.

Залежність довжини факелу за стабілізатором в робочій ділянці при подачі газу з отворів в першому і другому нішевому поглибленні від швидкості струменів газу приведена на рис. 3.7.

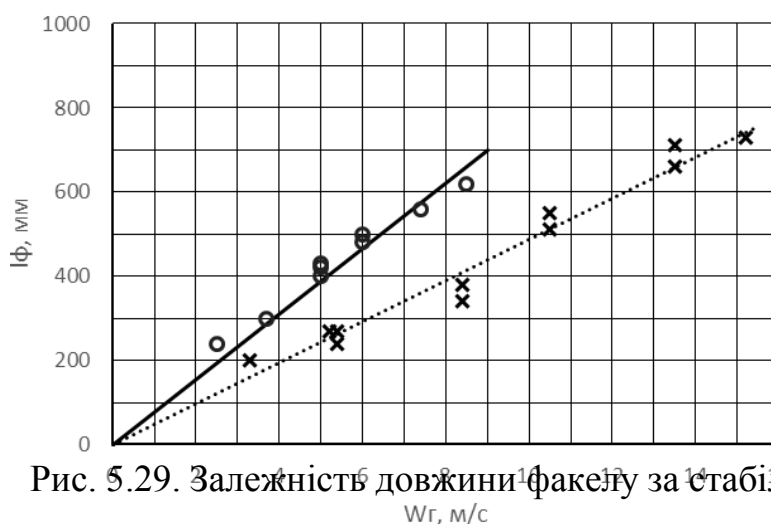


Рис. 5.29. Залежність довжини факелу за стабілізатором при подачі газу в

Позначення: х – для першого за ходом повітря нішевого поглиблення; о – для другого за ходом повітря нішевого поглиблення.

Рисунок 3.7 - Залежність довжини факелу (фотографії) від витрати високореакційного газу (пропан-бутан) при подачі з газових отворів в першому і другому нішевих поглибленнях.

Для даного варіанту стабілізатора залежності довжини факелу від швидкості газового струменя можна представити такими формулами (розмірності l_{ϕ} – в мм, W_g – м/с):

$$\text{для першої ніші} \quad (l_{\phi}^{1н})^д = 50 (W_g^{1н})^д, \quad (3.3)$$

для другої ніші $(l_{\phi}^{2H})^d = 77,8 (W_{\Gamma}^{2H})^d$. (3.4)

Для визначення діапазону можливої роботи двонішевого стабілізатора на альтернативних забаластованих паливах при подачі газу з отворів в нішевих поглибленнях були виконані відповідні дослідження.

3.2.4. Вплив на сталість горіння попереднього підмішування баласту до паливного газу

Характеристика пальника у випадку попереднього сумішоутворення повітря або двоокису вуглецю з газом, який подається з отворів в першому нішевому поглибленню, показані на рис 3.8.

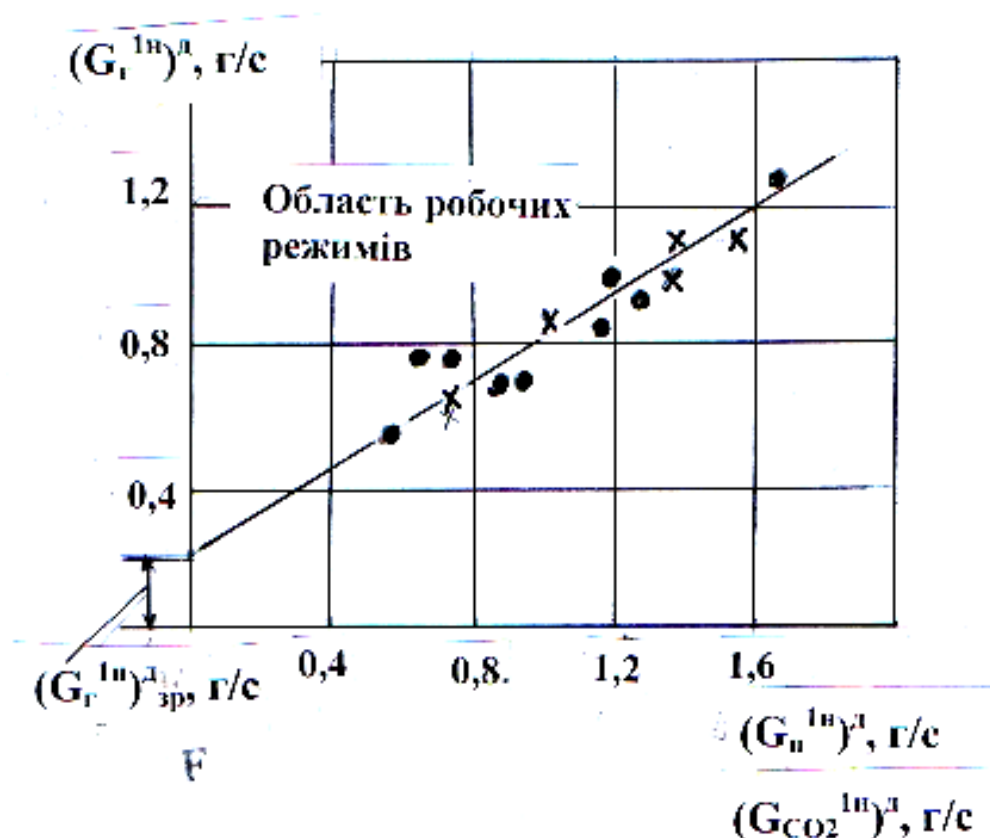


Рисунок 3.8 - Вплив на межі сталої роботи пальника струменевої подачі в перше нішеве поглиблення суміші газу з повітрям і CO_2 . Позначення режимів: ● – подача повітря; x – подача CO_2

Область можливих режимів роботи пальникового пристрою

знаходиться з лівого боку від лінії зриву факелу. Як видно з рис. 3.8, при підвищенні витрати палива можна також збільшити витрату домішки при збереженні сталості факелу.

Дослідження виконувались таким чином. Для даної швидкості повітря виконувалось заміри витрати газу на режимах зриву факелу – $(G_{\Gamma}^{1H})_{\text{зр}}^{\text{д}}$. Після чого встановлювались режими сталого горіння факелу з різною витратою газу - $(G_{\Gamma}^{1H})^{\text{д}}$. На цих режимах до газу на попереднє підмішування подавалось повітря чи CO_2 - $(G_{\text{п}}^{1H})^{\text{д}}$, $(G_{\text{CO}_2}^{1H})^{\text{д}}$ до моменту зриву факелу. Таким чином встановлювались режими сталої роботи пальника при підмішуванні до газу певної кількості домішки. Ці режими розміщуються в лівій частині графіку залежності $(G_{\Gamma}^{1H})^{\text{д}} = f[(G_{\text{п}}^{1H})^{\text{д}}, (G_{\text{CO}_2}^{1H})^{\text{д}}]$.

При проведенні досліджень на даному пальнику не було виявлено впливу виду домішки – повітря чи CO_2 , на характеристики сталості факелу.

Для дослідженої конструкції і схеми газороздачі в пальнику з подачею газу в перше нішеве поглиблення залежність можливої без зриву факелу витрати баласту, $G_{\text{бал}}^{1H}$ (повітря, CO_2), від витрати газу в першій ніші G_{Γ}^{1H} можна розрахувати за формулою

$$(G_{\text{бал}}^{1H})^{\text{д}} = K \cdot [(G_{\Gamma}^{1H})^{\text{д}} - (G_{\Gamma}^{1H})_{\text{зр}}^{\text{д}}] \quad (3.5)$$

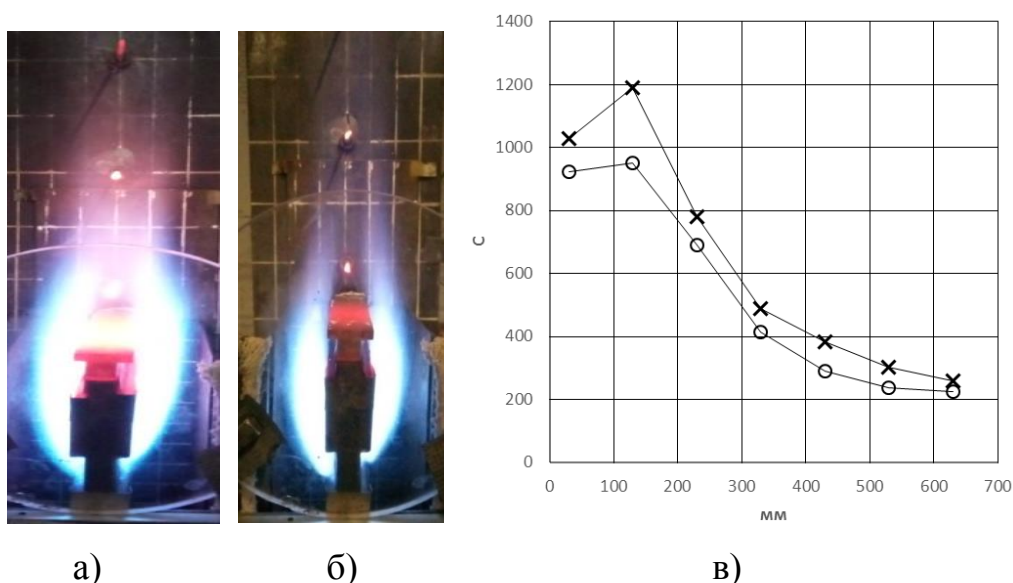
де $K = 1,6$ дослідний коефіцієнт пропорційності для даної конструкції пальника.

3.2.5 Вплив подачі баласту на попереднє сумішоутворення з газом на довжину факелу

В межах діапазону можливої роботи пальника були проведені дослідження щодо впливу подачі повітря на попереднє сумішоутворення з газом, а потім подачі цієї суміші струменями в перше нішеве поглиблення. На рис. 3.9,а приведено фотографії факелу при подачі тільки високореакційного палива (пропан-бутан) струменями з першого нішевого

поглиблення, на рис. 3.9,б – факелу з додатковою подачею повітря на попереднє сумішоутворення з газом і на рис. 3.9,в - температура газів вздовж осьової лінії сліду за стабілізатором для обох випадків..

Як показали результати випробувань, подача такого баласту, як повітря, на попереднє сумішоутворення з газом в першій ніші призводить до скорочення довжини факелу з можливої причини наближення характеру процесу горіння суміші повітря і газу до кінетичного. Як видно, при цьому також зменшується температура факелу внаслідок розбавлення палива повітрям.



а) режим без подачі повітря на попереднє сумішоутворення

$(G_r^{1H})^d = 0,8 \text{ г/с}$; x – позначення режиму на графіку в);

б) - подача повітря на попереднє сумішоутворення $(G_r^{1H})^d = 0,8 \text{ г/с} + (G_{п}^{1H})^d = 0,3 \text{ г/с}$, $(G_{п}^{1H})^d / (G_r^{1H})^d = 0,38$; o - позначення режиму на графіку в).

Рисунок 3.9 - Вплив на довжину факелу за стабілізатором подачі повітря на попереднє утворення суміші з газом і подачі суміші струменями з першого нішевого поглиблення.

Графік впливу на довжину факелу відносної витрати домішки (повітря) при подачі газу з першої ніші показаний на рис. 3.10.

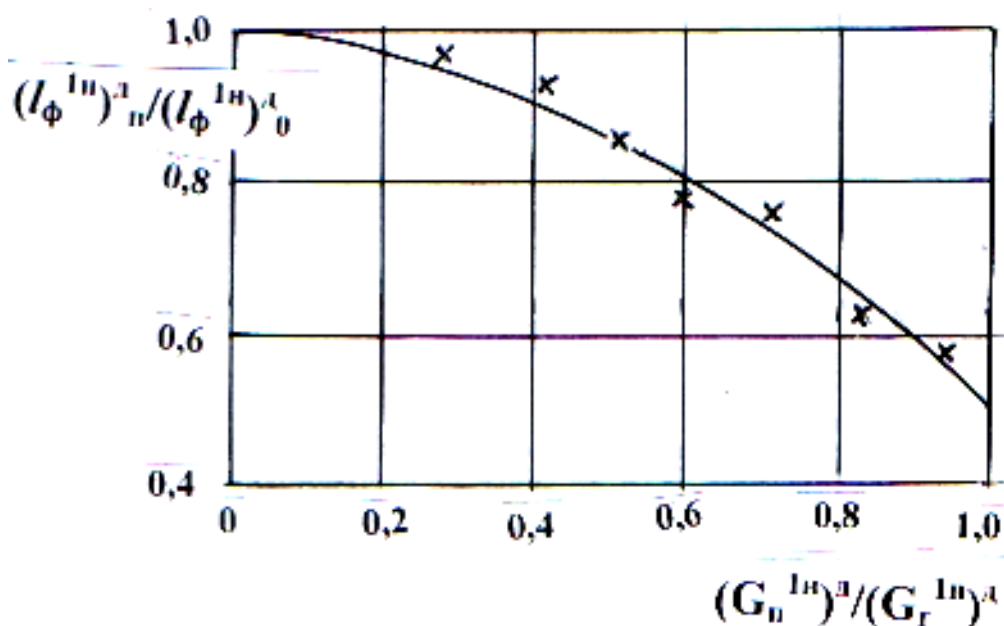


Рисунок 3.10 - Залежність відносної довжини факелу від баластування газу повітрям і струменевої подачі з першого нішевого поглиблення.

При подачі повітря на попереднє підмішування з газом і подачі цієї суміші з першої ніші візуальна довжина факелу поступово зменшується внаслідок розбавлення палива повітрям.

У випадку додавання повітря на попереднє сумішоутворення з газом, який виходить з першого нішевого поглиблення, довжину факелу можна представити у вигляді залежності

$$(l_{\phi}^{1H})_n / (l_{\phi}^{1H})_0 = 1 - 0,5 \cdot (G_n^{1H})^d / G_r^{1H})^d \quad (3.6)$$

де $(l_{\phi}^{1H})_0$ – довжина факелу без баластування палива повітрям;

$(l_{\phi}^{1H})_n$ – довжина факелу при баластуванні палива повітрям;

$(G_n^{1H})^d$ – витрата повітря на попереднє змішування з газом;;

$G_r^{1H})^d$ – витрата газу в перше нішеве поглиблення.

3.2.6 Характеристики токсичності двонішевого пальника

З використанням газоаналізатора ОКСИ-5М, були виконані вимірювання вмісту токсичних полуюантів (CO, NOx) в продуктах згоряння в кінці зони горіння відкритого факелу ($X = 700$ мм). Результати вимірювань

показали, що при підвищенні витрати основного газу, що подається з першого нішевого поглиблення, і, відповідно, довжини факелу, концентрації CO і NO_x (рис. 3.11,а) в кінці зони горіння збільшуються.

Це пов'язане з підвищенням температури факелу і збільшенням часу перебування продуктів в зоні високих температур.

Звертає на себе увагу достатньо низький рівень виходу окису вуглецю і оксидів азоту при подачі газу з першого нішевого поглиблення в обтічний повітряний потік.

При подачі низькорекційного палива (суміші газу і баластуючого повітря) з першого нішевого поглиблення максимальна температура факелу дещо знижується (рис. 3.9, 3.10), що супроводжується зменшенням виходу окису вуглецю (рис. 3.11,б), причому зменшення вмісту окису вуглецю відбувається безперервно.

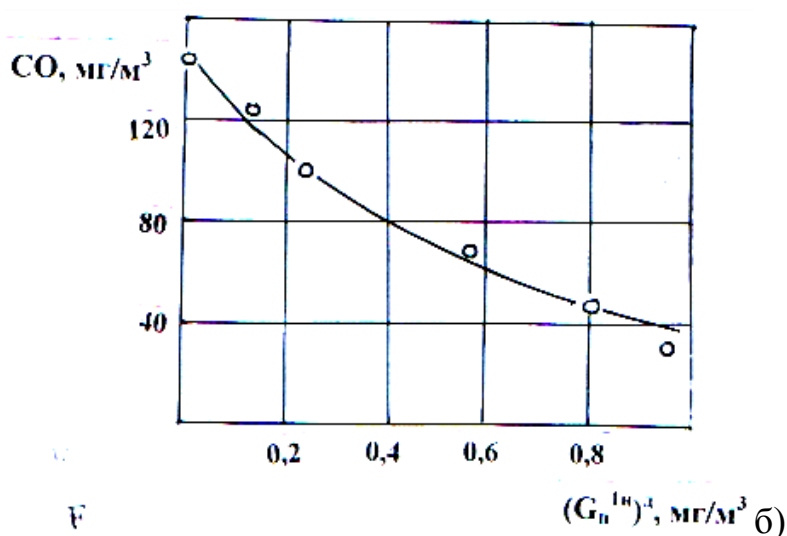
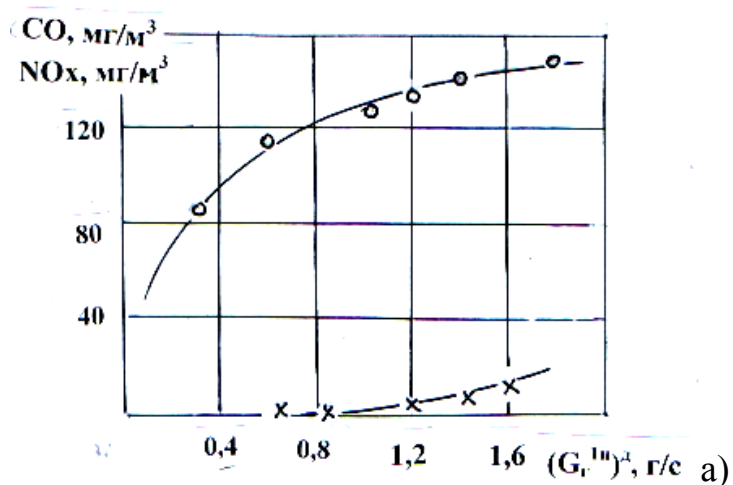


Рисунок 3.11 - Залежність виходу оксиду вуглецю (ϕ) і оксидів азоту (x) від витрати високореакційного палива при подачі газу в перше нішкове поглиблення (а) і залежність виходу оксиду вуглецю при збільшенні витрати баласту чого повітря на сумішоутворення з газом, $W_{\text{п}} = 7,74$ м/с; $X = 700$ мм; $(G_{\text{г}}^{1\text{н}})^{\text{д}} = 1,7 \cdot 10^{-3}$ кг/с.

При проведенні випробувань зафіксована підвищена температура вихідної частини стабілізатора (до $650^{\circ}\text{C} - 700^{\circ}\text{C}$). При необхідності зниження температури стабілізатора існують конструктивні засоби, які передбачають можливість охолодження торця стабілізатора [37, 38].

Загалом можна сказати, що, як показали дослідження, при однакових конструкціях обох ніш і системах газороздачі характеристики горіння також практично однакові.

3.2.7 Робота пальника на комбінованому режимі з подачею баласту на сумішоутворення з газовим паливом першої ніші

На наступному етапі роботи виконувались дослідження щодо характеристик робочого процесу пальника у відповідності з прийнятою в даній роботі методикою організації процесу спалювання газів у двонішевому стабілізаторі, а саме, у разі виходу концентрації паливної суміші, що подається з першої ніші, $[(G_{\text{г}}^{1\text{н}})^{\text{д}} + (G_{\text{п}}^{1\text{н}})^{\text{д}}]$, за межі сталої роботи.

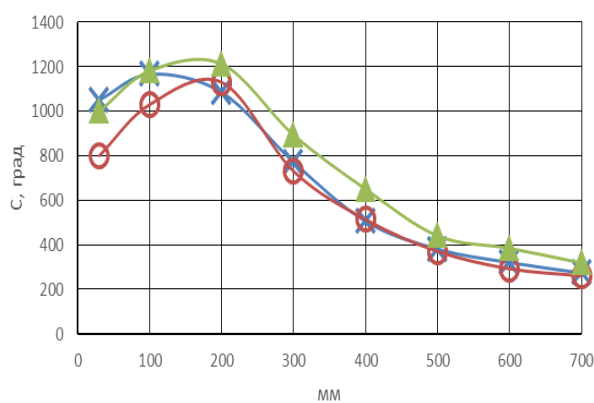
В такому випадку для підтримання процесу горіння низько реакційної суміші в пальнику в даній конструкції пропонується подавати високореакційне паливо струменям з газових отворів в другому нішевому поглибленні – $(G_{\text{г}}^{2\text{н}})^{\text{д}}$.

Результати роботи на одному з режимів такої комбінованої роботи при сумісній подачі палив в обидві ніші показано на рис. 3.12 у вигляді фотографій факелу і заміреної температури газу по довжині зони горіння.

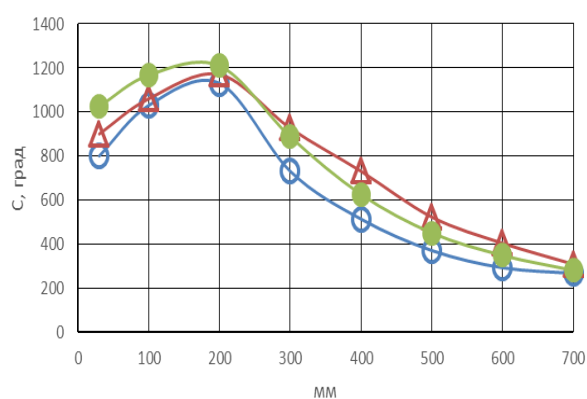
Під час випробувань на всіх режимах підтримувалась постійною теплова потужність пального $Q_{\text{пал}} = Q^{1\text{н}} + Q^{2\text{н}} = \text{const}$. При зменшенні витрати палива з першої ніші виконувалось збільшення витрати палива з другої ніші.



а - реж. 1 б – реж. 2 в – реж. 3 г – реж. 4 д – реж. 5



Реж. 1,2,5



Реж. 2,3,4

№ режиму	$(G_r^{1\text{н}})^{\text{д}} \cdot 10^3$, кг/с	$(G_r^{2\text{н}})^{\text{д}} \cdot 10^3$, кг/с	$(G_r^{\Sigma})^{\text{д}} \cdot 10^3$, кг/с	$(G_{\text{п}}^{1\text{н}})^{\text{д}} \cdot 10^3$, кг/с	$(G_{\text{п}}^{1\text{н}})^{\text{д}} / (G_r^{1\text{н}})^{\text{д}}$	Умовне познач.
1	1,0	0	1,0	0	0	Х
2	0,5	0,5	1,0	0	0	о
3	0,5	0,5	1,0	0,5	0	Δ
4	0,5	0,5	1,0	1,0	2,0	●
5	0	1,0	1,0	0	0	▲

Режими 1, 2, 5 – комбінована робота без подачі повітря в першу нішу

Режими 2, 3, 4 – комбінована робота з подачею повітря в першу нішу

Рисунок 3.12 - Робота двонішевого стабілізатора по комбінованій схемі при подачі повітря на попереднє сумішоутворення з газом і подачі суміші з отворів в першому нішевому поглибленні і стабілізації горіння факелом другої ніші.

В режимі № 1 в першу нішу подавалось високореакційне паливо (пропан-бутан) $(G_{r^{1H}})^D = 1,0$ г/с; $(G_{r^Z})^D = 1,0$ г/с.

В режимі № 2 була комбінована робота з подачею по 50 % палива в обидві ніші $(G_{r^{1H}})^D = (G_{r^{2H}})^D = 0,5$ г/с; $(G_{r^Z})^D = 1,0$ г/с. Як видно, довжина факелу збільшується, але температура практично не змінюється.

В режимі № 3 додатково подавалось повітря на утворення суміші з паливом в першій ніші при збереженні загальної витрати палива $(G_{r^{1H}})^D = (G_{r^{2H}})^D = 0,5$ г/с; $(G_{r^Z})^D = 1,0$ г/с, $(G_{n^{1H}})^D = 0,5$ г/с. Характер горіння практично не змінюється у порівнянні з другим режимом.

В режимі № 4 при збільшенні витрати повітря на сумішоутворення з газом в першій ніші відбувався зрив горіння в першій ніші $(G_{r^{1H}})^D = (G_{r^{2H}})^D = 0,5$ г/с; $(G_{r^Z})^D = 1,0$ г/с, $(G_{n^{1H}})^D = 1,0$ г/с. В даному випадку струмені низькореакційного альтернативного палива першої ніші (пропан-бутан + повітря) запалюються високотемпературними факелами другої ніші. При цьому відбувається деяке скорочення довжини факелу, практично, без зміни рівня температури факелу.

В режимі № 5 відключалась подача газу і повітря з першої ніші $(G_{r^{1H}})^D = 0$ г/с; $(G_{n^{1H}})^D = 0$ г/с), теплова потужність пальника забезпечується збільшенням витрати газу з другої ніші $(G_{r^{2H}})^D = 1,0$ г/с; $(G_{r^Z})^D = 1,0$ г/с з її характеристиками по довжині і температурі факелу. В цьому режимі характеристики пальника визначаються характеристиками горіння палива, яке подається з другої ніші

Загалом, як показують візуальні спостереження і дані по температурі газів у факелі, при подачі негорючої суміші палива і баласту з отворів першої ніші, а високореакційного палива – з отворів в другій ніші, не спостерігається значного підвищення довжини факелу і зменшення температури газів у факелі.

Таким чином, розроблений принцип процесу спалювання газу в двонішевому стабілізаторному модулі і результати випробувань пальника можна використати для розробки пальникових пристрів для спалювання різних видів газів, в тому числі нетрадиційних альтернативних низько реакційних, навіть у тому випадку, коли суміш палива і баласту виходить за концентраційні межі горіння.

Метою подальшої роботи має бути вдосконалення конструкції моделі пальника з точки зору охолодження вихідної частини стабілізатора і скорочення довжини факелу при роботі з подачею газу у другу нішу.

3.3 Експериментальні дослідження характеристик двонішевого комбінованого пальника при подачі газу із зривних кромок стабілізатора перед нішевими поглибленнями

3.3.1 Аеродинаміка течії реагентів в двонішевому стабілізаторі при подачі газу з кромок перед в нішевими поглибленнями

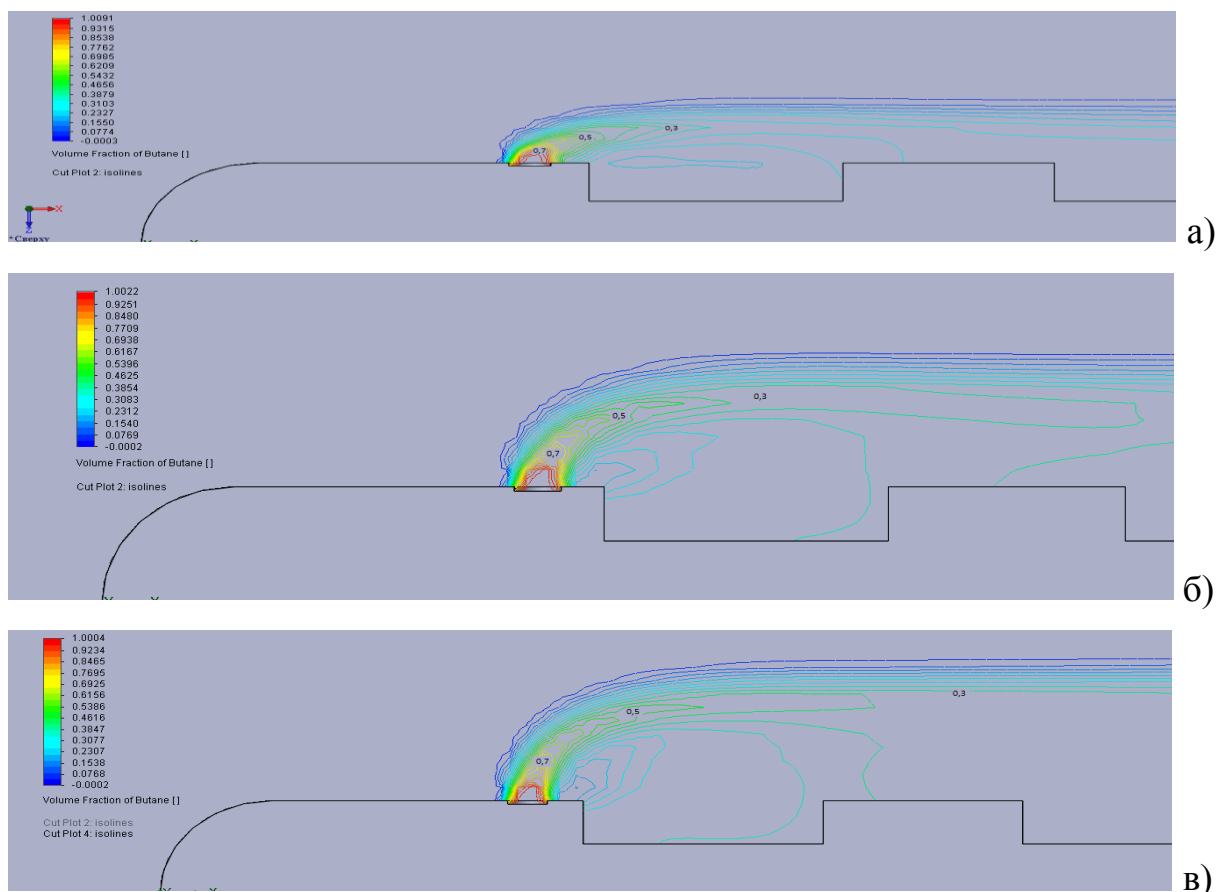
Схема модульного двонішевого комбінованого пальника з подачею і альтернативного і високореакційного газових палив із зривних кромок перед нішевими поглибленнями показана на рис. 3.1,в.

За допомогою програмного комплексу ANSYS Fluent [39] був виконаний аналіз течії струменів палива (пропан-бутан) при виході з газових отворів, що розміщені на кромці стабілізатора перед нішеvim поглибленням.

На рис. 3.13 показано лінії концентрації палива (пропан-бутан), що виходить з газового отвору, що розміщений перед зривною кромкою першого нішевого поглиблення.

Розрахунки виконувались для осі газового струменя. Швидкість повітря складала $W_{\text{п}} = 10,0$ м/с, швидкість газових струменів приймалося в діапазоні $W_{\text{г}} = 7,0$ м/с, $10,0$ м/с, $25,0$ м/с.

Як показує аналіз результатів розрахунків, при подачі газу з отворів перед зривною кромкою нішевого поглиблення відбувається часткове попереднє перемішування газу з повітрям. В результаті в дослідженому діапазоні зміни швидкості струменів (витрати палива) концентрація палива в самому нішевому поглибленні менше, ніж при подачі палива з отворів в



Параметри системи: $d_{\text{г}} = 5,0$ мм: $W_{\text{п}} = 10$ м/с; а) - $W_{\text{г}} = 7,0$ м/с; б) - $W_{\text{г}} = 15,0$ м/с; в) - $W_{\text{г}} = 25,0$ м/с.

Рисунок 3.13 - Розрахункові поля концентрацій палива (пропан-бутан) при подачі газу з отвору, який розміщено на кромці перед першим нішевим поглибленням;

нішевому поглибленні, але також знаходиться в концентраційних межах горіння.

На рис. 3.14 показано розподілення концентрацій палива (пропан-бутан) по осі газового струменя вздовж корпусу двонішевого стабілізатора при подачі газу з кромки перед першим (а) і другим нішевими поглибленнями, $W_{\Pi} = 10$ м/с; $W_{\Gamma} = 25$ м/с.

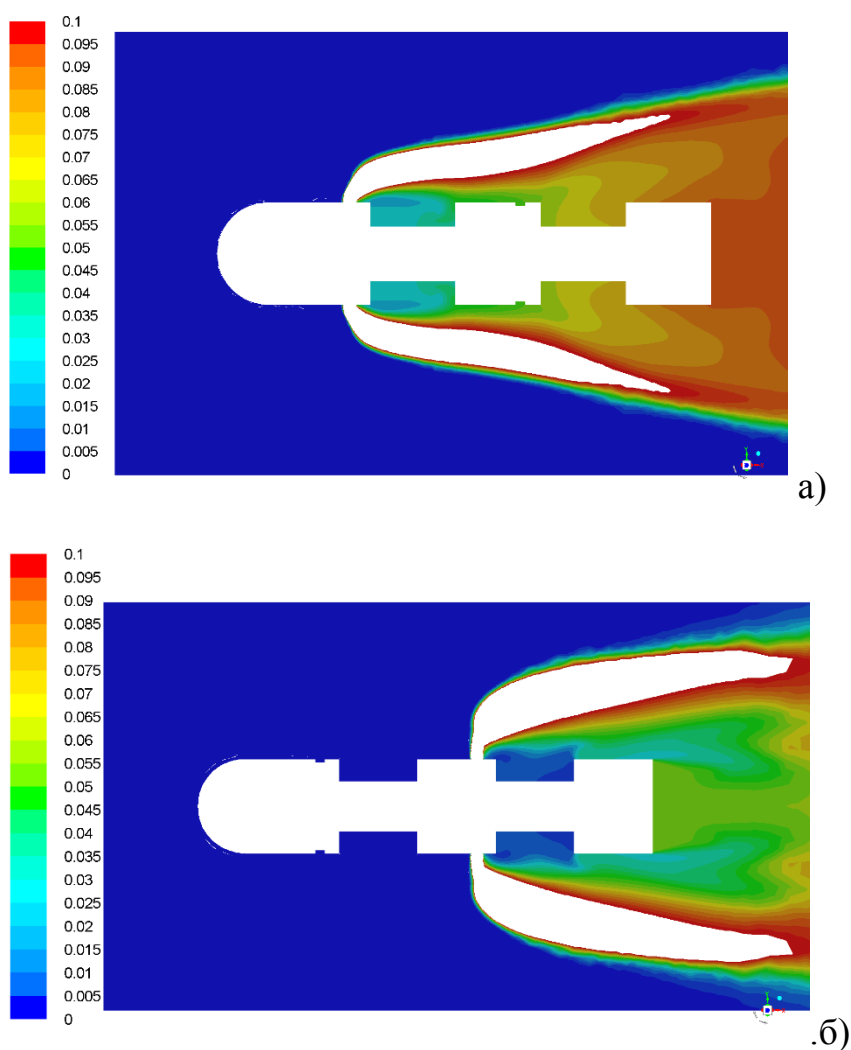


Рисунок 3.14 - Розподілення концентрацій палива (пропан-бутан) по осі газового струменя вздовж двонішевого стабілізатора при подачі газу з кромки перед першим (а) і другим (б) нішевими поглибленнями; $W_{\Pi} = 10$ м/с; $W_{\Gamma} = 25$ м/с.

Як видно, при подачі палива перед першою нішею відбувається більш інтенсивне перемішування газу і повітря, ніж у першому варіанті, але і цьому

випадку якась частина палива попадає в другу нішу і далі в зону відриву за стабілізатором.

Розрахунки за допомогою програмного комплексу Fluent дозволили організувати одночасну комбіновану подачу палива з кромки перед нішевим поглибленням без злиття струменів.

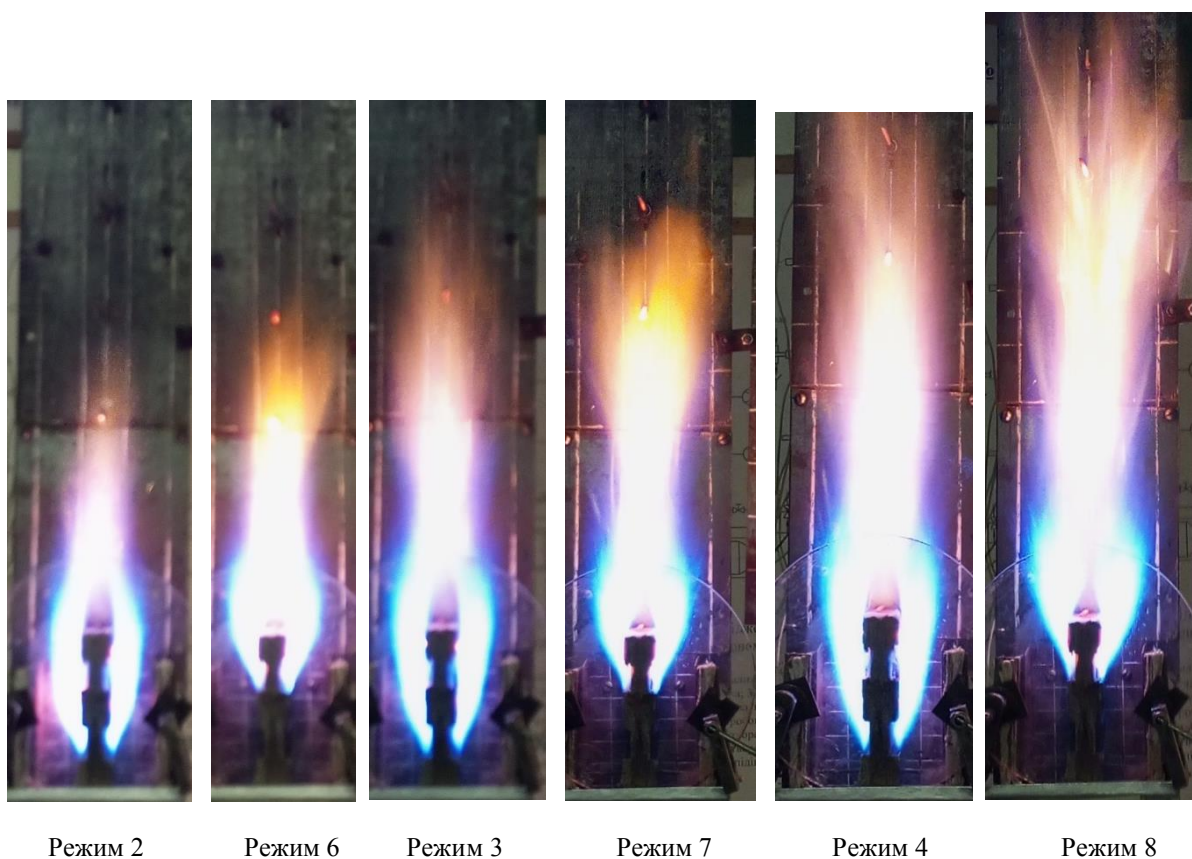
Шляхом зміни діаметру газових отворів, кроку їх розташування на зривних кромках, відстані від кромки до нішевого поглиблення можна регулювати ступінь перемішування палива і повітря з метою впливу на характеристики процесу горіння і підвищення ефективності процесу спалювання палива.

3.3.2 Довжина факелу і зміна температури вздовж його довжини

На дослідному стенді були проведені вогневі випробування варіанту двонішевого пальникового пристрою, виконаного за схемою рис. 3.1,в, при подачі газу через отвори, які розміщені перед зривними кромками першого і другого нішевого поглиблень.

На рис. 3.15 приведені порівняльні фотографії довжини факелів при трьох витратах газу для двох схем подачі при однакових витратах палива.

Як видно, на всіх виконаних режимах з однаковою витратою газу довжина факелів при подачі газу з кромки другого нішевого поглиблення дещо вище, ніж при подачі з кромки першого нішевого поглиблення навіть з урахуванням того, що отвори подачі газу з кромки перед першим нішевим поглибленням знаходяться на відстані у 54 мм далі від зривної кромки стабілізатора назустріч повітряному потоку. По відношенню до отворів подачі газу перед другим нішевим поглибленням. Це свідчить про трохи більшу дифузійність процесу горіння палива при подачі газу з отворів на кромки перед другим нішевим поглибленням.

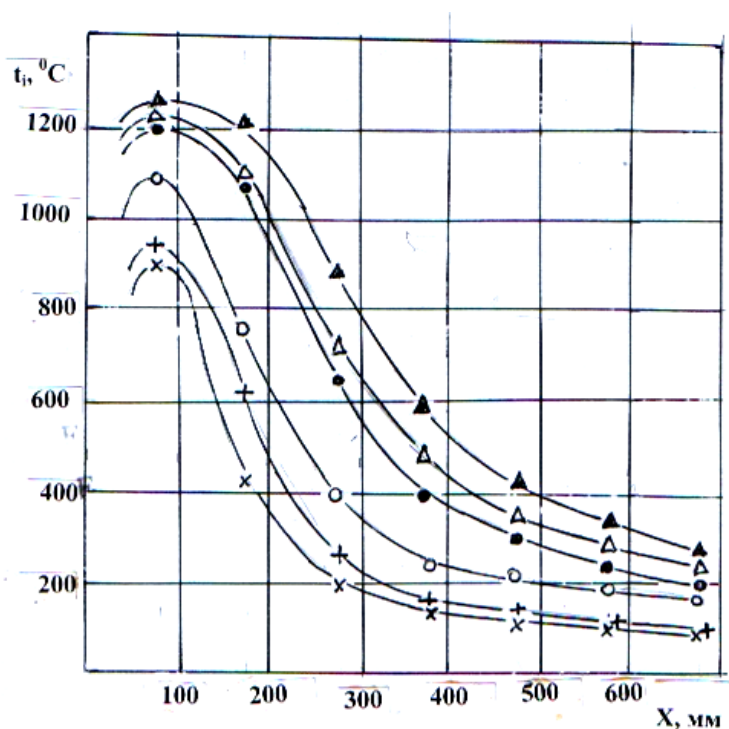


$W_k = 7,0$ м/с; Витрати газу: режими 2,6 - $(G_{\Gamma}^{1н})^п. = (G_{\Gamma}^{2н})^п. = 0,64$ г/с; режими 3,7 - $(G_{\Gamma}^{1н})^п. = (G_{\Gamma}^{2н})^п. = 1,0$ г/с; режими 4, 8 - $(G_{\Gamma}^{1н})^п. = (G_{\Gamma}^{2н})^п. = 1,3$ г/с.

Рисунок 3.15 - Порівняння довжини факелів за стабілізатором при однакових витратах газу, який подається із зривних кромки перед першим $(G_{\Gamma}^{1н})^п.$ (режими 2, 3, 4) – і другим – $(G_{\Gamma}^{2н})^п.$ (режими 6, 7, 8) нішевыми поглибленнями.

Порівняльні температури продуктів горіння для трьох режимів, замірені вздовж осьової лінії сліду за стабілізатором, наведено на рис. 3.16. З графіків видно, що рівень температури факелів також дещо вище при подачі газу з кромки перед другим нішевым поглибленням, що також визвано наближенням процесу горіння до дифузійного.

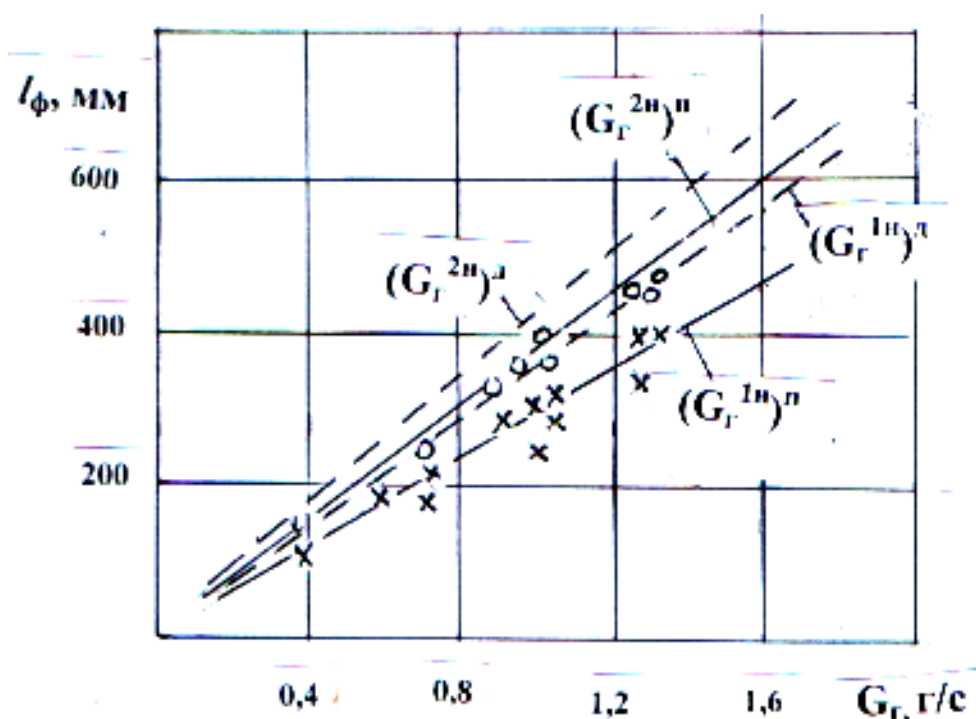
З наведених графіків видно, що максимальна температура факелу при роботі другої ніші знаходиться в межах $900^{\circ}\text{C} - 1200^{\circ}\text{C}$, що повинно забезпечувати надійне запалювання низькорекційного палива, яке подається з отворів на кромках перед першою нішею.



Номер режиму	1	2	3	5	6	9
$(G_T^{1H})^n$, г/с	0,42	0,64	1,0	0	0	0
$(G_T^{2H})^n$, г/с	0	0	0	0,42	0,70	1,0
Умовне позначення на рис. 3.16	x	o	Δ	+	●	▲

Рисунок 3.16 - Порівняльні дані по температурі продуктів горіння вздовж осової лінії сліду за стабілізатором при подачі палива з кромки перед першою і другою нішами

Узагальнені порівняльні дані щодо залежності довжини факелу за стабілізатором від витрати газу при подачі палива з отворів, які розміщуються безпосередньо в першому і другому нішевому поглибленню і отворів на кромках перед цими поглибленнями, від швидкості газових струменів приведені на рис. 3.17.



Позначення даних на графіках.

$(G_r^{1n})^п$ – подача газу перед зривною кромкою першої ніші (x);

$(G_r^{2n})^п$ - подача газу перед зривною кромкою другої ніші (o);

$(G_r^{1n})^д$ - подача газу безпосередньо з нижньої стінки першої ніші;

$(G_r^{2n})^д$ - подача газу безпосередньо з нижньої стінки другої ніші.

Рисунок 3.17 - Залежність довжини факелу за стабілізатором при різних схемах подачі газу

Як видно з даних, найменша довжина факелу спостерігається при подачі газу з отворів, які розміщені на кромках перед першим нішевим поглибленням $(G_r^{1n})^п$, а найбільша – при подачі газу з отворів, що розміщені у другій за ходом повітря ніші $(G_r^{2n})^д$. Отримані данні дозволяють вибрати схему подачі газу в залежності від вимог, які висуваються щодо довжини факелу у конкретному випадку використання пальника.

Для даного варіанту стабілізатора з подачею газу з отворів перед нішовими поглибленнями і з нішевих поглиблень залежності довжини факелу від витрати можна представити такими формулами (розмірності $l_φ$ – в мм, G_r – в г/с).

Для першої ніші:

- подача палива з отворів на кромках перед нішевим поглибленням

$$l_{\phi}^{1п} = 288 (G_{\Gamma}^{1н})^п, \quad (3.8)$$

- подача палива з отворів в самих нішах

$$l_{\phi}^{1д} = 350 (G_{\Gamma}^{1н})^д, \quad (3.9)$$

Для другої ніші:

- подача палива з отворів на кромках перед нішевим поглибленням

$$l_{\phi}^{2п} = 375 (G_{\Gamma}^{2н})^п, \quad (3.10)$$

- подача палива з отворів в самих нішах

$$l_{\phi}^{2д} = 412 (G_{\Gamma}^{2н})^д, \quad (3.11)$$

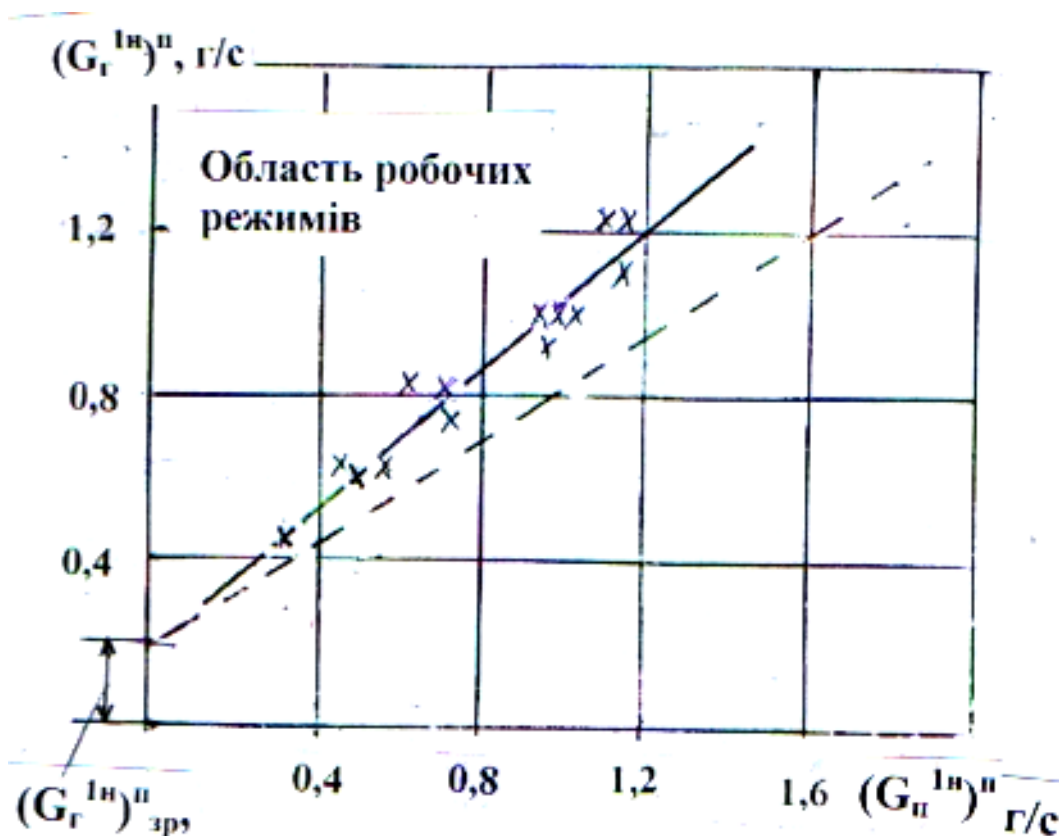
3.3.3 Вплив на сталість горіння попереднього підмішування баласту до паливного газу

Для визначення можливості роботи двонішевого стабілізатора на альтернативних забаластованих паливах у варіанті з подачею забаластованого газу з отворів на кромках перед першим нішевим поглибленням були виконані відповідні дослідження.

На рис. 3.18 наведені дані щодо сталості факелу в першій ніші при подачі повітря на попереднє сумішоутворення з газом.

Область можливих режимів роботи пальникового пристрою розміщується з лівого боку від лінії зриву факелу. Як видно з рис. 3.18, при збільшенні витрати палива можна також збільшити витрату домішки при збереженні сталості факелу.

З отриманих даних також видно, що область можливих режимів з подачею повітря на попереднє сумішоутворення і наступної подачі суміші з кромки перед першим нішовим поглибленням дещо вужче, чим при подачі безпосередньо з першого нішевого поглиблення (пунктирна лінія на рис. 3.18).



- - - пунктир – характеристика зриву факелу при подачі газо-повітряної суміші з отворів в першому нішевому поглибленні

Рисунок 3.18 - Вплив на межі сталої роботи пальника подачі повітря на попереднє сумішоутворення з газом і наступної подачі суміші з кромки перед першим нішевим поглибленням.

Це може бути пов'язане з тим, що при подачі суміші з нішового поглиблення додаткова стабілізація викликається гарячими газами зони рециркуляції в самому нішевому поглибленні.

Для конструкції пальника, яка була досліджена у випадку подачі забаластованого газу з отворів перед першим нішевим поглибленням, залежність витрати газу при роботі без зриву факелу $(G_r^{1n})^n$ і витрати баласту $(G_{\text{бал}}^{1n})^n$ (повітря) можна розрахувати за формулою

$$(G_{\text{бал}}^{1n})^n = K^n \cdot [(G_r^{1n})^n - (G_r^{1n})_{\text{зр}}^n] \quad (3.12)$$

де $K^n = 1,2$ дослідний коефіцієнт пропорційності для даної ніші;

$(G_r^{1n})_{\text{зр}}^n$ - витрата газу на режимі бідного зриву без подачі баласту.

3.3.4 Вплив подачі баласту на попереднє сумішоутворення з газом на довжину факелу

Вплив на довжину факелу подачі повітря на сумішеутворення з газом і подальшої подачі суміші з отворів на кромках перед першою нішею показано на рис. 3.19. На рис. 3.19,а приведена фотографія факелу при подачі одного високореакційного палива (пропан-бутан) з отворів на кромках перед першим нішевим поглибленням, а на рис. 3.19,б – режим з додатковою подачею повітря на попереднє сумішоутворення з газом і подачі на горіння суміші.



а)

б)

а) режим без подачі повітря на попереднє сумішоутворення з газом

$(G_r^{1H})^n = 1,0 \text{ г/с}$; позначення режиму на графіку рис. 3.20 – (х);

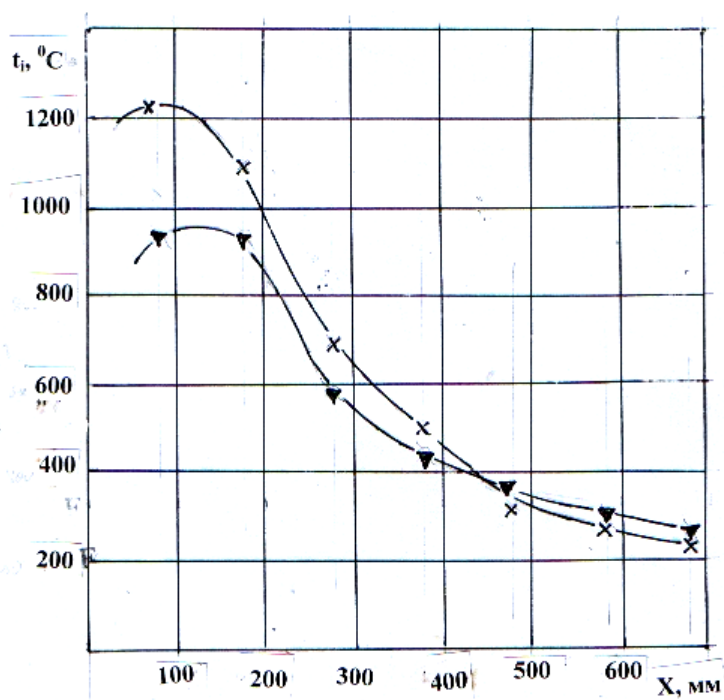
б) – режим з подачею повітря на попереднє сумішоутворення з газом,

$(G_{\text{сум}})^n = (G_r^{1H})^n + (G_n^{1H})^n$; $(G_r^{1H})^n = 1,0 \text{ г/с}$, $(G_n^{1H})^n = 0,7 \text{ г/с}$, $(G_n^{1H})^n / (G_r^{1H})^n = 0,70$; - позначення режиму на графіку рис. 3.20 – (▼).

Рисунок 3.19 - Вплив на довжину факелу за стабілізатором подачі повітря на попереднє утворення суміші з газом і наступної подачі суміші з отворів на кромках перед першим нішевим поглибленням.

Як і для випадку роботи пальника з подачею баласту на попереднє сумішоутворення з газом і наступної подачі суміші з нішевого поглиблення, довжина факелу зменшується внаслідок наближення режиму горіння до кінетичного процесу.

На рис 3.20 приведені дані щодо характеру температура газів вздовж осьової лінії сліду за стабілізатором для обох випадків.



x - режим без подачі повітря на попереднє сумішоутворення з газом,
 $(G_{\Gamma}^{1H})^n = 1,0 \text{ г/с}$

▼ - подача повітря на попереднє сумішоутворення з газом,
 $(G_{\text{сум}})^n = (G_{\Gamma}^{1H})^n + (G_{\Pi}^{1H})^n ; (G_{\Gamma}^{1H})^n = 1,0 \text{ г/с}, (G_{\Pi}^{1H})^n = 0,7 \text{ г/с},$
 $(G_{\Pi}^{1H})^n / (G_{\Gamma}^{1H})^n = 0,70$

Рис. 3.20 - Температура газу вздовж осі сліду за стабілізатором при роботі на чистому газі (x) і при подачі додаткового повітря на попереднє утворення суміші з газом і наступної подачі суміші з кромки перед першим нішевим поглибленням (▼).

Як показали результати випробувань, подача такого баласту, як повітря, на попереднє сумішоутворення з газом і наступна подача газо-повітряної суміші з отворів на кромках перед першим нішевим поглибленням

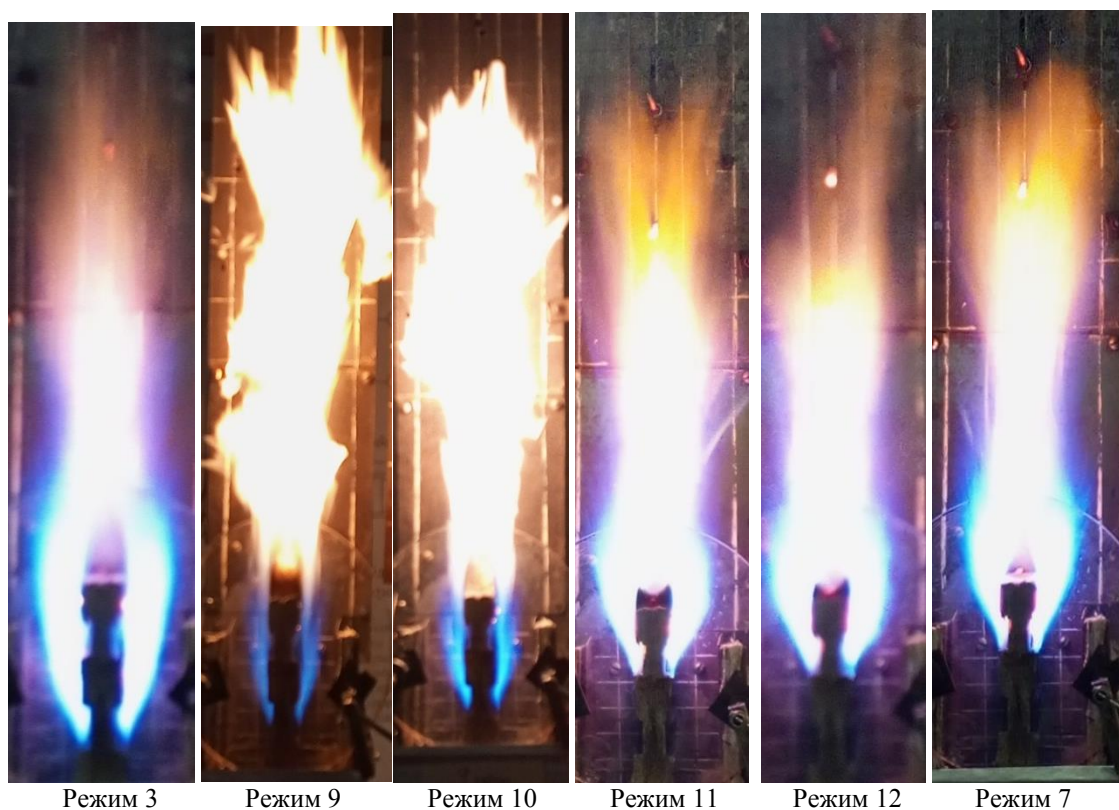
призводить як до скорочення довжини факелу, так і до зменшення рівня температури продуктів горіння.

3.3.4 Робота пальника на комбінованому режимі з подачею баласту на сумішоутворення з газовим паливом, що подається із зривної кромки перед першою нішею

У відповідності з прийнятою в даній роботі методикою організації процесу спалювання газів у двонішевому стабілізаторі, у разі виходу концентрації паливної суміші, $[(G_r^{1н})^п + (G_n^{1н})^п]$, що подається з кромки перед першою нішею, за межі сталої роботи, для підтримки процесу горіння пропонується подавати високореакційне паливо через отвори, що розміщені на кромках перед другим за ходом повітря нішевим поглибленням $-(G_r^{2н})^п$.

Результати роботи на режимах такої комбінованої роботи обох ліній при сумісній одночасній подачі палива перед обома нішами показано на рис. 3.21 у вигляді фотографій факелу і на рис. 3.22 і 3.23 - замірених температур газу по довжині зони горіння при різних режимах.

Під час випробувань на всіх режимах приймалась постійною теплова потужність пальника $Q_{пал} = Q_r^{1н} + Q_r^{2н} = const$. Зменшення витрати палива з отворів на кромках перед першою нішею компенсувалось збільшенням його витрати з отворів на кромках перед другою нішею.



№ режиму	$(G_r^{1n})^n$ $\cdot 10^3$, кг/с	$(G_r^{2n})^n$ $\cdot 10^3$, кг/с	$(G_r^{\Sigma})^n$ $\cdot 10^3$, г/с	$(G_n^{1n})^n$ $\cdot 10^3$, кг/с	G_n^{1n} / G_r^{1n}	Умовне познач.
3	1,0	0	1,0	0	0	Х
9	0,5	0,5	1,0	0	0	о
10	0,5	0,5	1,0	0,45	0,9	Δ
11	0,5	0,5	1,0	0,6	1,2	
12	0,5	0,5	1,0	1,0	2,0	●
7	0	1,0	1,0	0	0	▲

Режими 3, 9, 7 порівняння показників при роботі без подачі повітря в першу нішу

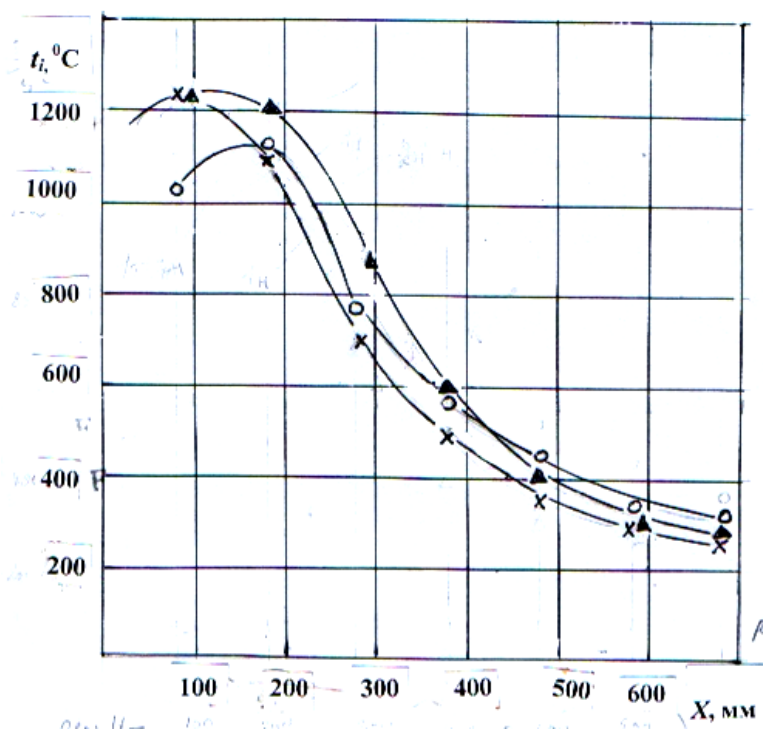
Режими 9, 10, 12 – вплив подачі повітря в першу нішу на сумішоутворення

Рисунок 3.21 - Характеристики факелу в двонішевому стабілізаторі при роботі за комбінованою схемою з подачею повітря на попереднє сумішоутворення з газом і подачею суміші з отворів перед першою нішею.

Зміна температури газів вздовж осьової лінії сліду за стабілізатором на режимах 3, 9, 7 (див. рис. 3.22) при однаковій сумарній витраті газу $(G_r^{\Sigma})^n = 1,0$ г/с без подачі повітря на попереднє сумішоутворення показана на рис. 3.23.

Як видно з отриманих даних, якщо розділити загальну витрату палива між газовими отворами, що обслуговують першу і другу нішу (реж 9, $(G_r^{1H})^n = (G_r^{2H})^n = 0,5$ г/с, $(G_r^{\Sigma})^n = 1,0$ г/с), то довжина факелу у випадку незмінної загальної витрати газу $(G_r^{\Sigma})^n = \text{const}$ і роздільної подачі його з кромek перед першим і другим нішевими поглибленнями знаходиться практично між двома другими значеннями довжини факелів першого і другого нішового поглиблень - реж. 3 - $(G_r^{1H})^n = 1,0$ г/с) і реж. 7 $(G_r^{2H})^n = 1,0$ г/с.

Візуальні спостереження показують, що при роздільній подачі палива між обома нішами (реж. 9, $(G_r^{1H})^n = (G_r^{2H})^n = 0,5$ г/с) спостерігається зміна окраски і структури факела – утворення жовтого полум'я і поява турбулентного режиму течії, що більш характерно для дифузійного горіння.



Режим 3 – (x) - подача газу з кромek перед першою нішею – $(G_r^{1H})^n = 1,0$ г/с;

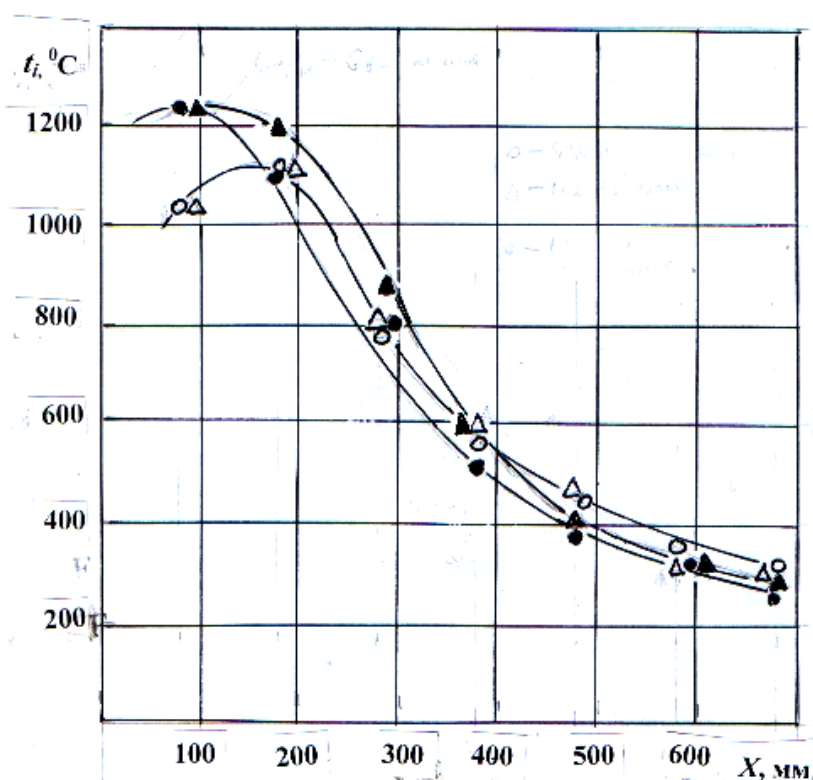
Режим 7 – (▲) - подача газу з кромek перед другою нішею – $(G_r^{2H})^n = 1,0$ г/с;

Режим 9 – (○) - подача газу з кромek перед першою і другою нішевими поглибленнями – $(G_r^{1H})^n = (G_r^{2H})^n = 0,5$ г/с

Рис. 3.22. Температура газів вздовж осьової лінії сліду за стабілізатором на режимах 3, 9, 7 (див. рис. 3.22) при однаковій сумарній витраті газу $(G_r^{\Sigma})^n = 1,0$ г/с без подачі повітря на попереднє сумішоутворення з паливним газом.

На рис. 3.23 приведені температури газів вздовж осьової лінії сліду за стабілізатором при роботі за комбінованою схемою з подачею повітря на попереднє сумішоутворення з газом і подальшої подачі суміші з отворів на кромках перед першим нішевим поглибленням.

На цьому рисунку приведені режими з комбінованою подачею палива через отвори на кромках перед першою і другою нішами і подачею повітря на попереднє сумішоутворення з газом.



№ режиму	$(G_r^{1n})^n \cdot 10^3, \text{ кг/с}$	$(G_r^{2n})^n \cdot 10^3, \text{ кг/с}$	$(G_r^{\Sigma})^n \cdot 10^3, \text{ г/с}$	$(G_p^{1n})^n \cdot 10^3, \text{ кг/с}$	G_p^{1n} / G_r^{1n}	Умовне познач.
7	0	1,0	1,0	0	0	▲
9	0,5	0,5	1,0	0	0	○
10	0,5	0,5	1,0	0,45	0,9	Δ
12	0,5	0,5	1,0	1,0	2,0	●

Рисунок 3.23 - Температура газів вздовж осьової лінії сліду за стабілізатором на режимах 7, 9, 10, 12 (див. рис. 3.22) при однаковій сумарній витраті газу $(G_r^{\Sigma})^n = 1,0$ г/с і подачі повітря на попереднє сумішоутворення з паливним газом, що виходить з кромки перед першою нішею (режими 10,12).

На режимі 9 паливо (пропан-бутан) подавалось через отвори на обох кромках перед першим і другим нішевим поглибленням $(G_r^{1н})^n = (G_r^{2н})^n = 0,5$ г/с, $(G_r^{\Sigma})^n = 1,0$ г/с).

На режимі 10 до газу, що подавався з отворів перед першою нішевою кромкою, додавалось повітря $((G_n^{1н})^n = 0,45$ г/с, $(G_n^{1н})^n / (G_r^{1н})^n = 0,9$). При цьому в першій ніші відбувалась стабілізація факелу і подальше горіння газу в сліді за стабілізатором. Візуальна структура факелу наблизилась до виду дифузійного факелу (рис. 3.22). Максимум температур спостерігався на

більшій відстані від стабілізатора, але потім при інтенсивному горінні і сумішоутворенні рівень температур в кінці факелу зрівнявся.

На режимі 12 до газу, що подавався з отворів перед першою нішевою кромкою, витрата додаткового повітря збільшувалась $((G_n^{1н})^n = 1,0$ г/с, $(G_n^{1н})^n / (G_r^{1н})^n = 2,0$). На цьому режимі відбувалось згасання факелу в першому нішевому поглибленні. Візуально структура факелу не зазнала значних змін.

У цьому випадку струмені низько реакційного палива, кількість газу в якому виходила за концентраційні межі горіння, підпалювались високотемпературними струменями високореакційного газу, який виходив з отворів на кромках перед другим нішевим поглибленням.

Структура факелу (рис. 3.22) і рівень температур газу в факелі (рис. 3.24) практично були ідентичні характеристикам горіння факелу палива, що виходило з отворів на кромках перед другою нішею.

З даних, які наведені на рис. 3.22 – 3.24, можна зробити висновок, що загалом довжина комбінованого факелу і температура газів при спалюванні

низькорекційного палива визначається характеристиками стабілізуючого високореакційного палива при однаковій суммарній витраті газу (див. рис. 3.22-3.24, реж. 12, $(G_r^{2n})^n = (G_r^{\Sigma})^n = 1,0 \text{ г/с}$).

Загалом, як показують візуальні спостереження і заміри температури факелу, при подачі негорючої суміші палива і баласту з кромки перед першою нішею, а високореакційного палива – з кромки перед другою нішею, не відбувається суттєвого збільшення довжини факелу і зниження температури горіння.

Таким чином, запропонований принцип організації процесу спалювання газу в двонішевому стабілізаторному модулі і досліджену конструкцію стабілізатора можна рекомендувати як основу для розробки пальникових пристрів, які призначені для спалювання різних видів паливних газів, в тому числі низько реакційних, навіть на режимах при виході суміші палива і баласту за концентраційні межі запалювання.

Метою подальшої роботи має бути вдосконалення конструкції моделі пальника з точки зору охолодження вихідної частини стабілізатора і скорочення довжини факелу при роботі з подачею газу у другу нішу.

3.4 Висновки до розділу 3

1. Розроблено двонішеві пальники стабілізаторного типу для спалювання нетрадиційних газових палив із змінним вмістом домішок і проведено їх випробування при зміні концентрації домішок (повітря, диоксид вуглецю) в широкому діапазоні

2. В результаті спалювання палива, яке забаластоване інертними домішками виявлено, що при збільшенні кількості баласту в паливі спостерігається поступове скорочення факелу, зменшення значення максимальної температури спалювання і при критичному вмісті домішки в газі як наслідок зниження тепловиділення спостерігається згасання факелу. Отримані залежності стійкості горіння від вмісту баласту.

3. Запропоновано дві конструкції двонішевих стабілізаторних пальників, в яких можливе забезпечення сталого горіння низькорекційного палива, концентрація домішок в якому змінюється від 0 % (чистий високо реакційний газ) до 100 % (відсутність палива - подача тільки домішок).

При цьому використана комбінована подача газів, при якій струмені альтернативного газового палива проходять через струмені високо температурних запалюючих факелів. Таким чином виконується сталість процесу горіння обох газів незалежно від концентрації палива в забаластованому газі. При зменшенні витрати високореакційного палива в суміші і зниженні потужності пальника вона підтримується шляхом підвищення витрати палива, яке подається на черговий () факел. У цьому випадку характеристики горіння визначаються в основному характеристиками чергового факелу.

ВИСНОВКИ

З розглянутого в роботі матеріалу можна зробити такі висновки:

1. Нетрадиційні або альтернативні палива, здебільшого, мають у своєму складі високореакційний газ, наприклад, метан, і баластні домішки - азот, повітря, двоокис вуглецю, біогаз тощо. Ці домішки приводять до зменшення діапазону сталого горіння палива, причому в більшій мірі, чим вище вміст домішок в паливі.

2. При спалюванні нетрадиційних палив з'являються певні труднощі організації процесу горіння. Вони пов'язані з такими факторами:

- в газових паливах різних видів і різного виробництва спостерігається різна концентрація баласту;
- склад альтернативних газів, як правило, може коливатись у часі;
- склад нетрадиційних газів може виходити за концентраційний діапазон горіння.

В результаті для спалювання нетрадиційних палив неможливо використання звичайних технологій і конструкцій пальникових пристроїв.

3. Такий фактор значно обмежує можливості використання нетрадиційних газових палив, наприклад, в ГТУ і ПГУ, які значну частку часу працюють у змінних режимах.

4. Для організації спалювання забаластованих газових палив, як правило, використовують засоби щодо підвищення сталості горіння. Це призводить до ускладнення конструкції пальника і системи регулювання робочого процесу.

5. Розроблені в ННІ АТЕ НТУУ «КПІ ім. Ігоря Сікорського» на кафедрі ТАЕ пальникові модульні пристрої стабілізаторного типу характеризуються високоефективним спалюванням різних газів при зміні режимів в широкому діапазоні. Використання таких пальників може бути одним з напрямків розв'язання питання спалювання нетрадиційних газових палив.

6. При реалізації роботи була виконана модернізація дослідного стенду і розроблено два двонішевих стабілізаторних пальника з різними методами подачі газу і повітря. Виконані дослідження роботи пальників при спалюванні газового палива, в якому змінювався вміст баластних домішок - повітря та двоокису вуглецю.

Розроблений двонішевий стабілізаторний пальник має два нішевих поглиблення (ніші), які послідовно розташовуються один за другим за ходом повітря.

7. В одному пальнику нетрадиційне низькорекційне газове паливо (суміш пропан-бутану з повітрям чи двоокисом вуглецю) роздається через систему отворів, які розміщені в першій за ходом повітря ніші, а високо реакційне підпалюючи паливо подається через отвори у другій за ходом повітря ніші. Як результат, при роботі обох схем подачі палива струмені низькорекційного нетрадиційного палива першого нішевого поглиблення проходять між високотемпературними факелами високореакційного палива з другого нішевого поглиблення і запалюються від них. Таким чином, діапазон сталого горіння низькорекційного палива не залежить від складу нетрадиційного палива, концентрація баласту в якому може змінюватись від 0% (чисте високо реакційне паливо) до 100% (відсутність палива). Прийнята схема подачі палив забезпечує високу сталість горіння при зміні режимних параметрів в широкому діапазоні.

В другому варіанті двонішевого модульного пальника обидва види палива – і нетрадиційне низькорекційне і високо реакційне, роздаються через отвори, які розташовані на кромках корпусу стабілізатора перед нішевими поглибленнями. В цьому варіанті відбувається часткове попереднє перемішування газу обох зон з повітрям, що набігає, і довжина факелу зменшується. Діапазон сталої роботи пальника по коефіцієнту надлишку повітря в цьому пальнику стає меншим.

Характеристики пальника при спалюванні палив з великим вмістом домішок визначаються характеристиками стабілізуючого палива.

При використанні різних схем подачі газового палива в пальниках можна мати вплив на характеристики стійкості факелу, горіння газу, температуру факелу і утворення оксидів азоту і вуглецю.

8. Таким чином, одним з ефективних методів вирішення питання спалювання низькокалорійних нетрадиційних палив змінного складу може бути розробка двонішевого модульного стабілізатора з комбінованою подачею палив, при якій струмені низькокалорійного альтернативного палива першого за ходом повітря нішевого поглиблення стабілізуються високотемпературними газами другого нішевого поглиблення.

9. Використання забаластованих низькокалорійних нетрадиційних горючих газів може дати значну економію коштів за рахунок зменшення постачання дорогих імпортованих енергетичних ресурсів, тому що загальні ресурси альтернативних газів значно перевищують розвідані запаси природного газу.

СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ

1. Спейшер В.А. Сжигание газа на электростанциях и в промышленности. М.: Энергия, 1967 – 250 с.].
2. Морган М., Кан В. Влияние инертных разбавителей на скорость распространения и температуру пламени // Вопросы горения и детонационных волн. М.: Оборонгиз, 1958 – С. 219-224.
3. Hasko Iajos. Szendioxid-es nitrogendus fuldgazok telitesi vizgoztartalma.// Energia as atomtechn, 1967, 20 - №10 - P. 453-458.
4. Спейшер В.А. Огневое обезвреживание промышленных выбросов. М.: Энергия, 1977 262 с.
5. James E. Broadwell, Wemcr J A. Dahm, M. Godfrey Mngal. Blowout of turbulent diffusion flames // 12 Simp. (Internat. on combustion) The combust. Inst., 1984 - P. 303-310
6. Deponiegas - Aufbereitung und-verwertung in Bereich der Deponie Berlin-Wannsee. / Schneider Joachim // Baust Recycle Depometechn -1988, 4, № 6, P. 9-11
7. Walter D K., Brooks C. Refuse conversion to methane (Re.flom) a proof-of-concept anaerobic digestion facility. // IEEE Trans Power Appar. and Syst, 1980, 99, № 6, P.2363-
8. Газогорелочные устройства для сжигания биогаза в котлах / И.Я. Сигал, Ф.В. Марасин, А.В. Смихула. *Энерготехнологии и ресурсосбережение*. 2014 № 3. С. 68-72
<http://dspace.nbuu.gov.ua/handle/123456789/127295>
9. Спейшер В.А. Интенсификация процесса сжигания низкокалорийных газов: сб. науч. ст. / Теория и практика сжигания газа. Вып. 2. Л.: Недра, 1964 С. 176-191
10. Арсеев А.В. Результаты исследований ВНИИМТ в области сжигания газов: сб. науч. ст. / Теория и практика сжигания газа. Вып. 1. Л.: Недра, 1958 С. 150 – 167

11. Гелетуха Г.Г., Железна Т.А. Розвиток біоенергетики як інструмент заміщення природного газу в Україні / Біоенергетика, 2015 - №1 – С. 15-20,
12. Климчук О.В. , Грох Н.В. Виробництво біогазу: досвід зарубіжних країн та перспективи розвитку в Україні. *Зб. Наукових праць ВНАУ*. 2012 № 2 (64). С. 50-54 <http://econjournal.vsau.org/files/pdfa/869.pdf>
13. Liu C. Structures and burning velocity of biomass derived gas flame / C. Liu, B. Yan, G. Chen, X.S. Bai // International journal of hydrogen energy, 2010 – V. 35 – N 2. – P. 542-555. <https://www.cheric.org/research/tech/periodicals/view.php?seq=1206902>
14. Экспериментальное исследование биогаза как топлива для котлов / И.Я. Сигал, А.В. Смихула, А.В. Марасин, В.П. Куц, Э.П. Домбровская, В.А. Колчев, Е.С. Кернажицкая. *Энерготехнологии и ресурсосбережение*. 2013 № 5. С26-32 <http://dspace.nbu.gov.ua/handle/123456789/127237?show=full>
15. Экспериментальное исследование горения биогаза и его использование в промышленных котлах / И.Я. Сигал, А.В. Марасин, А.В. Смихула, А.И. Сигал, В.А. Колчев. *International Scientific Journal for Alternative Energy and Ecology*, № 17 (139) 2013. – pp. 84-89. Получено из <https://cyberleninka.ru/article/n/eksperimentalnoe-issledovanie-goreniya-biogaza-i-ego-ispolzovanie-v-promyshlennyh-kotlah/viewer>
16. Марасін О. В. Розробка та дослідження пальникових пристроїв для спалювання біогазу в промислових котлах: автореф. дис. канд. техн. наук: 05.14.06 / Інститут газу НАН України. К., 2015. 22 с.
17. Колієнко В.А., Галінська Т.А., Шеліманова О.В. Комбіноване спалювання суміші природного та генераторного газу. *Науковий вісник НУБіП України*. 2015 № 5 С. 136-138 http://nbuv.gov.ua/UJRN/nvnau_tech_2015_224_26

18. Колієнко В. А., Шеліманова О.В. Особливості спалювання горючих газів із змінними характеристиками процесу горіння. *Науковий вісник Національного університету біоресурсів і природокористування України. Серія : Техніка та енергетика АПК*. 2015 Вип. 209(2). С. 181-188 - Режим доступу: [http://nbuv.gov.ua/UJRN/nvnau_tech_2015_209\(2\)_29](http://nbuv.gov.ua/UJRN/nvnau_tech_2015_209(2)_29)
19. Исследование особенностей рабочего процесса камеры сгорания ГТД мощностью 2,5 МВт, работающей на синтез-газе / С.И. Сербин, Н.А. Гончарова, В.В. Вилкул. *Вісник НТУ «ХПИ»*, 2015. - № 16 (1125). – С. 14-18. http://www.kpi.kharkov.ua/archive//16_15_02.pdf
20. Славинская Н. А.. Проект Европейского союза «Высокоэффективная газовая турбина с применением синтетического газа». *Газотурбинные технологии*. 2007. № 3. С. 24-27.
21. W. Anggono, ING Wardana, M. Lawes, K. J. Hughes, S. Wahyudi, N. Hamidi, A. Hayakawa. Biogas Laminar Burning Velocity and Flammability Characteristics in Spark Ignited Premix Combustion / *Journal of Physics: Conference Series* 423 (2013) 012015. – pp. 1-7. *Scopus*. Retrieved from <https://iopscience.iop.org/article/10.1088/1742-6596/423/1/012015/pdf>
22. S.E. Hosseini, G. Bagheri, M. Khaleghi and M.A. Wahid. Combustion of Biogas Released from Palm Oil Mill Effluent and the Effects of Hydrogen Enrichment on the Characteristics of the Biogas Flame / *Journal of Combustion*. Vol. 2015, Article ID 612341, 12 pages. <http://dx.doi.org/10.1155/2015/612341> *Scopus*
23. M. Escudero, A. Jimenes, C. Gonzales, R. Nieto, I. Lopez. Analysis of the Behaviour of Biofuel-Fired Gas Turbine Power Plants / *Thermal Science: Year* 2012, Vol. 16, № 3. – pp. 849-884. DOI: 10.2298/TSCI120216131E. Retrieved from <http://www.doiserbia.nb.rs/img/doi/0354-9836/2012/0354-98361200131E.pdf>

- 24.A. Rowhani, S. Tabejamaat. Experimental Study of the Effect of Swirl and Air Dilution on Biogas Non-premixed Flame Stability / Thermal Science:Year 2015, Vol. 19, No 6, pp. 2161-2169.
https://www.researchgate.net/publication/274506712_Experimental_study_of_the_effects_of_swirl_and_air_dilution_on_biogas_nonpremixed_flame_stability
25. Olga Chernousenko O., Butovsky L., Granovska O., Moroz O., Starchenko O. Determining basic characteristics of stabilizer micro torch burners for the combustion of ballasted fuel gas // Eastern-European Journal of Enterprise Technologies" - Energy-saving technologies and equipment, 5 (8 (113)), 51-65, 2021. doi: <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2021.242984>. (Scopus).
26. Эстеркин Р.И., Иссерлин А.С., Певзнер М.И. Теплотехнические измерения при сжигании газового и жидкого топлива / Л.: Недра, 1981 424 с.
27. ГОСТ 29134-97. Пальники газові промислові. Методи випробувань. М. 1997. 22 с.
28. ГОСТ 21204-97. Пальники газові промислові. Загальні технічні вимоги; чинний від 01.06.1998 М.: Держстандарт Росії. 1997 16с.
29. Терембовля В.І., Фінгер Є.Д., Авдєєва А.О. Теплотехнічні випробування котельних установок / М.: Енергоатоміздат. 416 с.
30. Стаскевич Н.Л., Северинець Г.Н., Вигдорчук Д.Я. Справочник газопостачання та використання газу. Л.: Надра. 1990 762 с.
31. ГСТУ 3-59-68-95. Пристрої газопальникові для котлів та побутової техніки тепловою потужністю до 0,115 МВт. Загальні технічні умови.
32. Кузнецов І.Є., Троїцька Т.М. Захист повітряного басейну від забруднення шкідливими викидами. М.: Хімія, 1979. 296 с.
33. Комбінований двонішевий газовий пальник. Черноусенко О.Ю.,

Бутовський Л.С., Грановська О.О., Мороз О.С., Старченко О.С.: пат. 136625 України: МПК (2019.01) F23C 1/00, F23C 1/08 (2006.01), F23C 5/00. № u 201902546; заявл.15.03.2019; опубл. 27.08.2019. Бюл. № 16.

https://library.ukrpatent.org/document?fund=2&id=261437&to_fund=2

34. M. Z. Abdulin, A. Siryi, O. M. Tkachenko, A. A. Kunyk. Boilers modernization due to energy-ecological improvement technology of burning, Bulgarian Chemical Communications, 2020, Volume 52, Special Issue F (pp. 14-19) DOI:10.34049/bcc.52.F.0002. **(Scopus)** Retrieved from http://www.bcc.bas.bg/bcc_volumes/Volume_52_Special_F_2020/BCC-52-F-2020-14-19-Abdulin-2.pdf

35. Сірий О.А. Вплив параметрів струменево-нішевої системи на робочий процес пальникових пристроїв: автореф. дис. канд. техн. наук: 05.14.14/НТУУ «КПІ». К.: 2016 26 с.

36. Иссерлин А.С. Основы сжигания газового топлива. Справочное пособие. Л.: Недра, 1987 360 с.

37. Альошко С.О. Системи охолодження мікрофакельних пальникових пристроїв з плоскими стабілізаторами полум'я: автореф. дис. канд. техн. наук: 05.14.06/ Інститут технічної теплофізики НАН України. 2013. 23 с.

38. Эффективность систем охлаждения горелочных устройств струйно-стабилизаторного типа / Н.М. Фиалко, В.Г. Прокопов, М.З. Абдулин, Л.С.Бутовский и др. *Технологические системы*. 2012. № 1 (58). С.52-57.

39. Ansys Fluent 14.0 TheoryGuide [Електронний ресурс] – Режим доступу: \www/ URL: <https://www.scribd.com/doc/140163341/Ansys-Fluent-14-0-Theory-Guide>

ДОДАТОК А

Список наукових праць

Доросевича Всеволода Сергійовича

Ч. ч	Найменування праць	Рукописні або друковані	Назва видавництва, журналу (номер, рік) або номер авторського свідчення, номер диплома на винахід	Кількість друкованих аркушів або сторінок разом	Прізвища співавторів праць
1	Стендові випробування натурної двозонної високотемпературн ої камери згоряння	Друк	Вчені записки Таврійського національного університету імені В.І. Вернадського. Серія «Технічні науки», Том 35 (74), № 2, 2024. С.47-54.	8 стор.	Черноусенко О.Ю. Бутовський Л.С. Рудик М.А.

Автор

Всеволод ДОРОСЕВИЧ

